

Effet tunnel, intrication,  
téléportation, ordinateur...

# Quantique

LES NOUVELLES  
PROMESSES

PHYSIQUE  
QUANTIQUE  
**6** ŒUVRES D'ART  
POUR LA  
COMPRENDRE



# MAJ

ÉTHOLOGIE, SANTÉ, TECHNOLOGIE...

L'information  
scientifique  
Mise À Jour

*Votre rendez-vous  
avec l'actualité  
de la recherche*

REWORLD  
MEDIA

L 19057 - 318 H - F: 6,90 € - RD



BEL: 7,10 € - ESP: 7,20 € - GRB: 7,20 € - DOM S: 7,60 € - DOM A: 8,90 € - ITA: 7,20 € - LUX: 7,10 € - PORT CONT: 7,20 €  
CAN: 10,50 CAD - MAR: 73 MAD - TOM S: 990 CFP - TOM A: 1850 CFP - CHE: 9 CHF - TUN: 15 TND

# JOURNÉE SPÉCIALE INVENTEURS

## SCIENCE & VIE

Science & Vie vous donne rendez-vous pour découvrir les inventions des jeunes qui ont participé au **concours Innovez de Science & Vie Junior** ainsi que celles des startups qui ont intégré **l'Incubateur Science & Vie**.

**Venez en famille**  
**Entrée gratuite !**



**ZOOM SUR UNE STARTUP**  
DE L'INCUBATEUR SCIENCE & VIE

**halis**

Un dispositif innovant pour quantifier, améliorer et communiquer les performances socio-environnementales des entreprises.

**Vous êtes startupper ?**  
Venez pitcher pour intégrer la 2<sup>e</sup> promotion de l'Incubateur Science & Vie à 14 h 15.



Un événement



**SCIENCE & VIE**

**Dimanche**  
**2 MARS**

au musée des  
Arts et Métiers,  
à Paris, de 10h à 17h

**ENTRÉE GRATUITE**



Programme  
sur le site  
du musée

**AU PROGRAMME**

**TOUTE LA JOURNÉE**

**> ANIMATIONS & ATELIERS**

- Pour les 3-6 ans et 7-12 ans : retrouvez les **Savants Fous** pour des ateliers de manipulation **robotique** et repartez avec votre propre machine fabriquée sur place !
- Pour les ados : **bienvenue au Fab Lab de l'école ESIEA !** Imprimante 3D, pilotage de robot en vue embarquée, atelier de programmation, manipulation de machine de prototypage rapide...

**> EXPOSITION  
DES INVENTIONS**

et échanges avec leurs inventeurs

**LES MOMENTS FORTS**



**11h** La course du futur avec nos lauréats **Innovez 2024** encadrés par l'école ESIEA

**14 h 15** Le pitch contest pour intégrer la 2<sup>e</sup> promotion de l'Incubateur Science & Vie

**15 h 30** La remise des **Trophées Innovez**, le concours des jeunes inventeurs de l'année + le prix spécial **Innove pour la planète**





**ÉDITEUR**  
 Reworld Media Magazines SAS  
 Siège social: 40 avenue Aristide-Briand, 92220 Bagneux  
 Directeur de la publication: Gautier Normand  
 Actionnaire: Président Reworld Media France  
 (RCS Nanterre 477 494371)  
 Tél. accueil: 01 41 33 55 00  
 www.science-et-vie.com  
 SERVICE LECTEURS: sev.lecteurs@reworldmedia.com

**RÉDACTION**  
 DIRECTRICE DE LA RÉDACTION: Karine Zagaroli  
 DIRECTEUR ADJOINT DES RÉDACTIONS SCIENCE & VIE:  
 Philippe Bourbeillon  
 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 Doval, Vincent Ourso,  
 Olivier Vignancour  
**ONT COLLABORÉ À CE NUMÉRO:** Armelle Camelin, Adrien  
 Denèle, Marie Dormoy, Évrard-Ouicem Eljaouhari, Hugo  
 Leroux, François Mallordy, Sandrine Mary, Charlotte Mauger,  
 Étienne Thierry-Aymé

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

**PUBLICITÉ**  
 DIRECTRICE GÉNÉRALE: Élodie Bretaudeau-Fontailles  
 DIRECTRICE DU PÔLE COMMERCIAL: Catherine Mireux (19 02),  
 Anne Lefeuve  
 PLANNING: Angélique Consoli (53 52), Stéphanie Guillard (53 50)  
 RESPONSABLE TRAFIC: Catherine Leblanc (43 86)

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

**ABONNEMENTS ET DIFFUSION**  
 DIRECTRICE MARKETING CLIENT: Catherine Grimaud  
 CHEF DE GROUPE: Davina Champaigne  
 CHEF DE PRODUIT: Laure Letellie  
 RESPONSABLE VENTES MARCHÉ: Siham Daassa  
 RESPONSABLE DIFFUSION: Isabelle Fargier

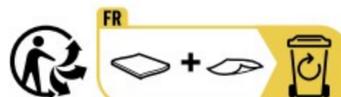
**RELATIONS CLIENTÈLE ABONNÉS**  
 Une question sur votre abonnement? Appelez-nous au 01 46 48 48 96  
 (de 9 h à 19 h, du lundi au vendredi, et le samedi de 9 h à 18 h, prix d'un  
 appel local). Ou rendez-vous sur [www.serviceabomag.fr](http://www.serviceabomag.fr), dans votre  
 espace client.  
 Vous voulez vous abonner? Rendez-vous sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com)  
 Par courrier: **Service abonnement Science & Vie,**  
**59898 LILLE Cedex 9**

Prix de vente: 6,90 €  
 Prix de l'abonnement annuel: 58,80 € (12 numéros) ou 100,20 €  
 (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](mailto:reworld@edigroup.ch)  
 Pour la Belgique: Edigroup Belgique, 070 233 304  
[reworld@edigroup.be](mailto: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  
 COMPOS JULIOT: Hélène Bernardi, Valérie Brunehaut

**PRÉPRESSE**  
 RESPONSABLE DE SERVICE: Sylvain Boularand  
 Imprimeur: Maury - France  
 N° ISSN: 1966-9437  
 N° de commission paritaire: 1020 K 79977  
 Dépôt légal: février 2025



## Cantique de la quantique

“Il y a deux types de révolutionnaires, écrit l'écrivain Roger Martin du Gard : les apôtres et les techniciens.” Il semble qu'avec la physique, nous soyons passés de l'ère des premiers à celle des seconds. Transistors, lasers, GPS : tout ça, c'est la “première révolution quantique” et c'est du concret. S'il est une théorie qui a vraiment changé nos vies, c'est bien la physique quantique. Le comble pour une mécanique à laquelle personne n'entend rien, physiciens exceptés – et encore. Prochaine étape : l'ordinateur quantique, une machine à la puissance de calcul potentiellement infinie. Pour y arriver, il faut maîtriser la technologie des qubits, les particules nanoscopiques à la base du calcul quantique. En la matière, les annonces sensationnelles se succèdent à un train d'enfer. Juillet 2024 : la société française Pasqal annonce avoir franchi la barre des 1 000 atomes piégés en une seule opération. Sauf qu'un ordinateur quantique, ça fait des erreurs. Alors, six mois plus tard, Google présente Willow, une puce capable de réduire de façon exponentielle ses erreurs de calcul. Et ça n'est qu'un début. Les grandes puissances informatiques – États, mais aussi Gafam – se sont lancées dans une course folle à la quantique, menée tambour battant par des cohortes de techniciens visionnaires (merci, Martin du Gard). Voici que se profile une nouvelle révolution quantique : celle qui verrait l'homme maîtriser non seulement le calcul instantané, mais aussi l'effet tunnel et l'intrication. Le premier nous aiderait à concevoir des molécules ex nihilo : médicaments, matériaux, gènes ; le deuxième nous permettrait de nous déplacer instantanément à travers la matière ; le troisième nous emmènerait explorer les trous noirs. Alors, bien sûr, ces lendemains qui chantent font sourcil-ler plus d'un philosophe... Et si nous n'étions nous-mêmes que les créatures d'un superordinateur quantique capable de calculer l'univers dans lequel nous vivons? Argh! Comment savoir? Vite, rendez-nous les apôtres!

Olivier Carpentier



## AVANT-PROPOS

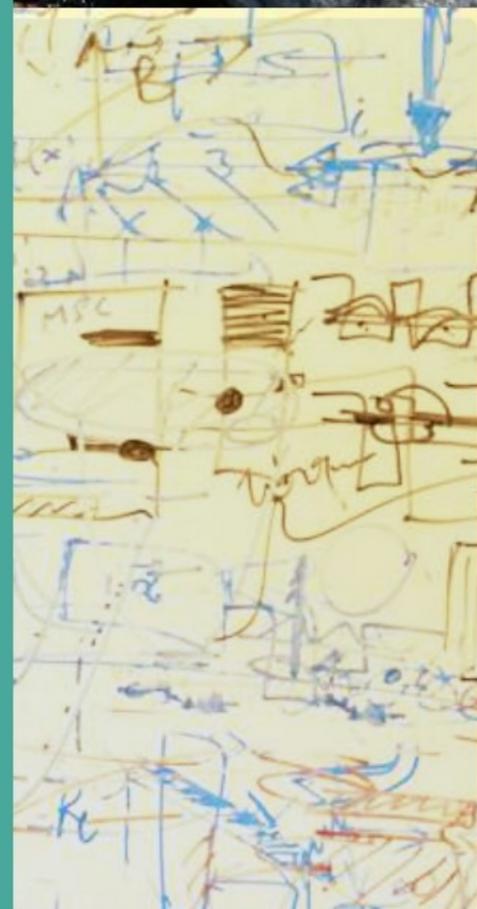
### 6 "Aller en terrain inconnu... c'est ainsi que l'on révolutionne la physique"

Philippe Grangier et Alexia Auffèves, tous deux directeurs de recherche au CNRS, reviennent sur l'engouement pour la physique quantique, alors que l'on célèbre le centième anniversaire de son avènement, en 2025.



## COMPRENDRE

- 16 Une théorie complexe expliquée par l'art  
Six spécialistes de la physique quantique ont chacun choisi une œuvre d'art pour expliquer un concept a priori abstrait... et, soudain, tout s'éclaire!
- 22 Parlons quantique  
Un petit lexique de survie à feuilleter dès que c'est nécessaire.
- 24 Six expériences fondatrices  
De la controverse qui opposa Bohr et Einstein, à la preuve de l'intrication fournie par Alain Aspect, la théorie quantique en six dates.
- 28 La lumière, un cas d'école  
Tantôt décrite comme une onde, tantôt comme une particule... Mais qu'est-ce au juste que ce rayonnement composé de photons?
- 30 Quantique ou toc?  
La S.F. s'est emparée de la physique quantique pour créer des intrigues aussi farfelues que plausibles.



Recevez Science & Vie et ses Hors-Série  
Votre bulletin d'abonnement se trouve en p. 102. Pour commander d'anciens numéros, rendez-vous sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com)

Vous pouvez aussi vous abonner par téléphone au 01 46 48 47 08 ou par internet sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com)



## APPLIQUER

### 36 La révolution est parmi nous

La première révolution quantique a accouché de nombreuses technologies que l'on utilise au quotidien.

### 40 Le temps quantique est-il universel ?

S'écoule-t-il de la même façon et à la même vitesse pour tous ? Pas si sûr.

### 42 Dans l'intimité de l'ordinateur du futur

L'ordinateur quantique promet

de faciliter les calculs complexes, mais comment fonctionne-t-il ?

### 48 Les Français dans la course

De nombreuses start-up travaillent sur diverses technologies pour développer l'ordinateur quantique.

### 50 Médecine, la deuxième vague

La seconde révolution quantique se penche sur notre santé grâce à l'utilisation de capteurs quantiques.

## S'INTERROGER

### 56 La biologie quantique existe-t-elle ?

Photosynthèse, déplacement des oiseaux migrateurs... Est-ce bien quantique ?

### 62 Quel rapport entre un tardigrade et un qubit ?

Toute théorie a une limite, alors les scientifiques cherchent où se trouve celle de la physique quantique.

### 64 Neutrino, la chasse au fantôme

Élucider le mystère de cette particule élémentaire venue de l'espace pourrait révolutionner notre compréhension de la matière.

### 68 Arnaque à la quantique

Cosmétiques et spa quantique, thérapies énergétiques... Les termes impressionnent mais sont vides de sens.

### 70 "On cherche à marier mécanique quantique et relativité générale"

Pourquoi est-il si difficile de combiner ces deux théories ? Réponse avec les professeurs de physique et chercheurs Etera Livine et Barak Shoshany.

### 74 La conscience peut-elle être quantique ?

Cette idée a été suggérée dans les années 1990. Elle connaît aujourd'hui de nouveaux rebondissements.

## VOTRE NOUVEAU RENDEZ-VOUS AVEC L'ACTUALITÉ



## IMAGINER

### 80 Pourra-t-on passer par un trou de ver ?

Cette hypothèse veut que des raccourcis spatio-temporels se cachent dans les trous noirs.

### 86 Le web rêve de téléportation

La téléportation quantique d'information permettra de relier les ordinateurs entre eux et de communiquer de façon ultra sécurisée.

### 88 Vers la cryptographie ultime

On la dit inviolable, mais est-ce bien le cas ?

### 92 Un casse-tête énergétique

Développer une nouvelle technologie demande, en parallèle, d'anticiper la demande en énergie.

### 94 "Et si notre réalité était une simulation informatique ?"

Cela peut sembler une idée complètement farfelue. Pourtant, le physicien Melvin M. Vopson et le philosophe Nick Bostrom décryptent la théorie des univers simulés et ses conséquences.

### 100 Bibliographie

## PAGE 103

### MAJ COMME MISE À JOUR

Peut-on stocker le CO<sub>2</sub> dans les fonds marins ?

Les manchots ont-ils des superpouvoirs dépolluants ? Un tissu peut-il s'adapter à la chaleur ?

Douze pages d'actualité scientifique et de questions-réponses pour faire le point sur vos thématiques favorites.



“Aller  
en terrain  
inconnu...  
c’est ainsi  
que l’on  
révolutionne  
la physique”

Alors que l’ONU célèbre en 2025 le centième anniversaire du développement de la mécanique quantique, les financements publics et privés consacrés aux technologies quantiques se chiffrent en milliards d’euros. Le point sur cette révolution avec deux spécialistes, Philippe Grangier\* et Alexia Auffèves\*\* . PAR HUGO LEROUX



**SVHS: Comment vivez-vous l'engouement actuel autour de la quantique ?**

**Philippe Grangier :**

L'apparition depuis une dizaine d'années de gros investisseurs et d'acteurs privés a métamorphosé la recherche.

Les nombreuses start-up contribuent beaucoup au concours d'idées, c'est très vivifiant. Cependant, tout cela est le fruit d'une évolution pas si récente. La publication de

l'algorithme du mathématicien Peter Shor, en 1994, a constitué un premier tournant. Il montrait qu'un hypothétique ordinateur quantique pourrait craquer en un temps record les clés cryptographiques des communications actuelles, basées sur la factorisation de nombres premiers. Les implications stratégiques ont commencé à interpeller politiques, banques et industriels. La seconde grosse étape remonte à 2014 avec la première publication scientifique des équipes de Google sur l'ordinateur quantique. Le fait que les Gafam investissent massivement dans le domaine a entraîné le monde entier dans leur sillage.

**Alexia Auffèves :** La recherche fondamentale a besoin de temps long et de silence pour avancer. Il est essentiel que cette logique, très différente de la logique

industrielle, puisse être respectée pour permettre l'émergence de nouvelles ruptures technologiques. C'est un vrai défi pour les politiques d'inventer un système où le chercheur puisse s'intégrer aux problématiques sociétales et industrielles, tout en gardant intacte sa créativité.

**SVHS: On parle aujourd'hui de seconde révolution quantique. Mais en quoi consistait la première ?**

**P. G. :** Tout part d'un problème fondamental qui tenait les physiciens en échec depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Dans le cadre de la physique classique, on voyait l'atome comme un petit modèle planétaire où les électrons tournent autour du noyau. Or, dans ce modèle, les électrons devraient perdre rapidement leur énergie pour s'écraser sur le noyau. Comment expliquer alors que la matière ne s'effondrait pas sur elle-même ? En 1900, Max Planck a proposé l'idée des "quanta", selon laquelle l'énergie s'échange par "sauts", selon des valeurs discrètes, non continues. Niels Bohr a ensuite proposé qu'un électron ne puisse se situer que sur certaines orbites bien définies et pas en dessous d'une orbite fondamentale. Mais il a fallu attendre 1925 pour que soient mises au point les équations de la mécanique quantique, qui fournissent

# “ La recherche fondamentale a besoin de temps long et de silence pour avancer ”

d'un coup un cadre explicatif plus général à une variété de phénomènes qui restaient mystérieux : la conductivité électrique des métaux, la capacité calorifique des matériaux, les interactions entre lumière et matière, etc.

**A. A. :** L'excellente capacité de prédiction de la mécanique quantique a permis de concevoir des objets exploitant ces phénomènes à partir des années 1960. Elle a donné naissance aux technologies qui font la société de l'information actuelle :

le transistor qui a mené à la microélectronique, le laser aux communications longue distance et à internet, la résonance magnétique nucléaire à l'imagerie médicale, les horloges atomiques au GPS...

**SVHS :** En quoi la "seconde révolution quantique" est-elle différente ?

**P. G. :** La première se basait sur le comportement des particules manipulées en grand nombre, via une approche statistique. La grosse différence, c'est que nous savons aujourd'hui manipuler des particules individuelles. Les

pères fondateurs de la discipline pensaient d'ailleurs que c'était impossible, car cela impliquerait d'accepter des phénomènes mystérieux prédits par la théorie, comme la superposition d'états – c'est le fameux chat de Schrödinger à la fois mort et vivant – ou que deux particules puissent être "intriquées", c'est-à-dire que l'état de l'une est fortement corrélé avec l'état de l'autre. Actuellement, la manipulation et l'intrication d'atomes individuels sont une réalité concrète : dès 2001, mon équipe a démontré le premier piège à atome unique, et on observe aujourd'hui quotidiennement ces phénomènes dans les laboratoires.

**A. A. :** La seconde révolution quantique vise à exploiter ces phénomènes contre-intuitifs pour calculer plus efficacement, mesurer plus précisément et sécuriser

## MORT OUVIF ?

L'expérience de pensée du chat de Schrödinger illustre l'ambiguïté de la quantique. Un chat est placé dans une boîte avec un dispositif qui libère un gaz mortel, en fonction de la désintégration d'un atome radioactif. Or, selon la physique quantique, l'atome se trouve dans deux états superposés "désintégré" et "non désintégré". Le chat doit donc être à la fois vivant et mort. Pourtant, si l'on ouvre la boîte, on observera que le chat est soit mort, soit vivant.





les communications. Il est extraordinaire qu'elle ait commencé par des débats métaphysiques enflammés entre Einstein et Bohr au début du siècle dernier. Ces débats ont donné lieu aux fameuses inégalités de Bell en 1964, qui fournissaient un critère mathématique pour distinguer les deux visions du monde. Il a ensuite fallu la ténacité d'Alain Aspect pour mener à bien les expériences qui, en 1982, ont montré que la vision de Bohr était la bonne, et qu'il fallait accepter que l'intrication et la cohérence quantiques, si complexes à appréhender pour un esprit "classique", faisaient bien partie de la structure de notre monde.

**SVHS:** Quels phénomènes la cryptographie et les capteurs quantiques exploitent-ils ?

**A. A. :** La cryptographie se base sur le "problème de la

mesure", soit le fait qu'au moment où l'on mesure l'état d'un objet quantique, on le modifie. C'est-à-dire que lorsqu'on observe le chat de Schrödinger, celui-ci passe de l'état "à la fois mort et vivant" à l'état soit "mort", soit "vivant". En cryptographie quantique, on utilise ainsi des particules de lumière, des photons, qu'un espion ne peut pas intercepter sans modifier leur état. Ce principe permet aux interlocuteurs d'échanger des clés de chiffrement de façon parfaitement sûre.

À gauche, Albert Einstein, fondateur de la théorie de la relativité générale, prix Nobel de physique en 1921. À droite, Alain Aspect, prix Nobel en 2022 pour ses travaux sur la physique quantique.

**P.G. :** Pour ce qui est des capteurs, on exploite la faculté des particules quantiques à réagir à des variations infimes de certains phénomènes – pression, température, champ magnétique... Ce qui donne des mesures très précises. Par exemple, la compagnie Exail commercialise des gravimètres que l'on peut embarquer dans un avion pour mesurer les variations du champ

*“ Les équations de la mécanique quantique ont fourni d'un coup un cadre explicatif à une variété de phénomènes mystérieux ”*



gravitationnel de la Terre, ou sur des volcans pour surveiller leurs mouvements souterrains, tel un super-sismomètre.

**SVHS :** *Où en est-on du fameux "avantage quantique", ce moment où un ordinateur quantique exécutera un calcul "utile" plus rapidement que les meilleurs superordinateurs classiques ?*

**A. A. :** L'unité de base d'un ordinateur quantique est le qubit, qui peut être dans des états superposés "0 et 1", ce qui permet théoriquement d'exécuter certains calculs en beaucoup moins d'opérations que les ordinateurs classiques, qui sont construits à partir de bits pouvant prendre la valeur 0 ou 1. Mais les ordinateurs quantiques sont pour l'instant limités par le phénomène de décohérence, le fait que les qubits perdent rapidement leur état quantique, car ils sont extrêmement sensibles aux perturbations extérieures. Cela génère des erreurs de calcul presque inévitables.

**P. G. :** Pour y parer, il y a plusieurs pistes : construire des qubits plus robustes,

pouvoir les connecter plus facilement, et développer des "codes correcteurs" qui jouent sur la redondance et aussi sur l'intrication des qubits pour contourner leurs erreurs. Le nombre de qubits qu'il faudrait atteindre dépend beaucoup des problèmes que l'on veut résoudre. Alors que, aujourd'hui, les machines les plus avancées atteignent une centaine de qubits, il en faudrait des millions pour faire tourner l'algorithme de Shor. Mais pour d'autres applications comme la simulation de molécules, cela pourrait démarrer à quelques centaines, voire quelques milliers.

**SVHS :** *Augmenter ce nombre est-il seulement un défi technologique, ou risque-t-on de rencontrer des barrières plus fondamentales ?*

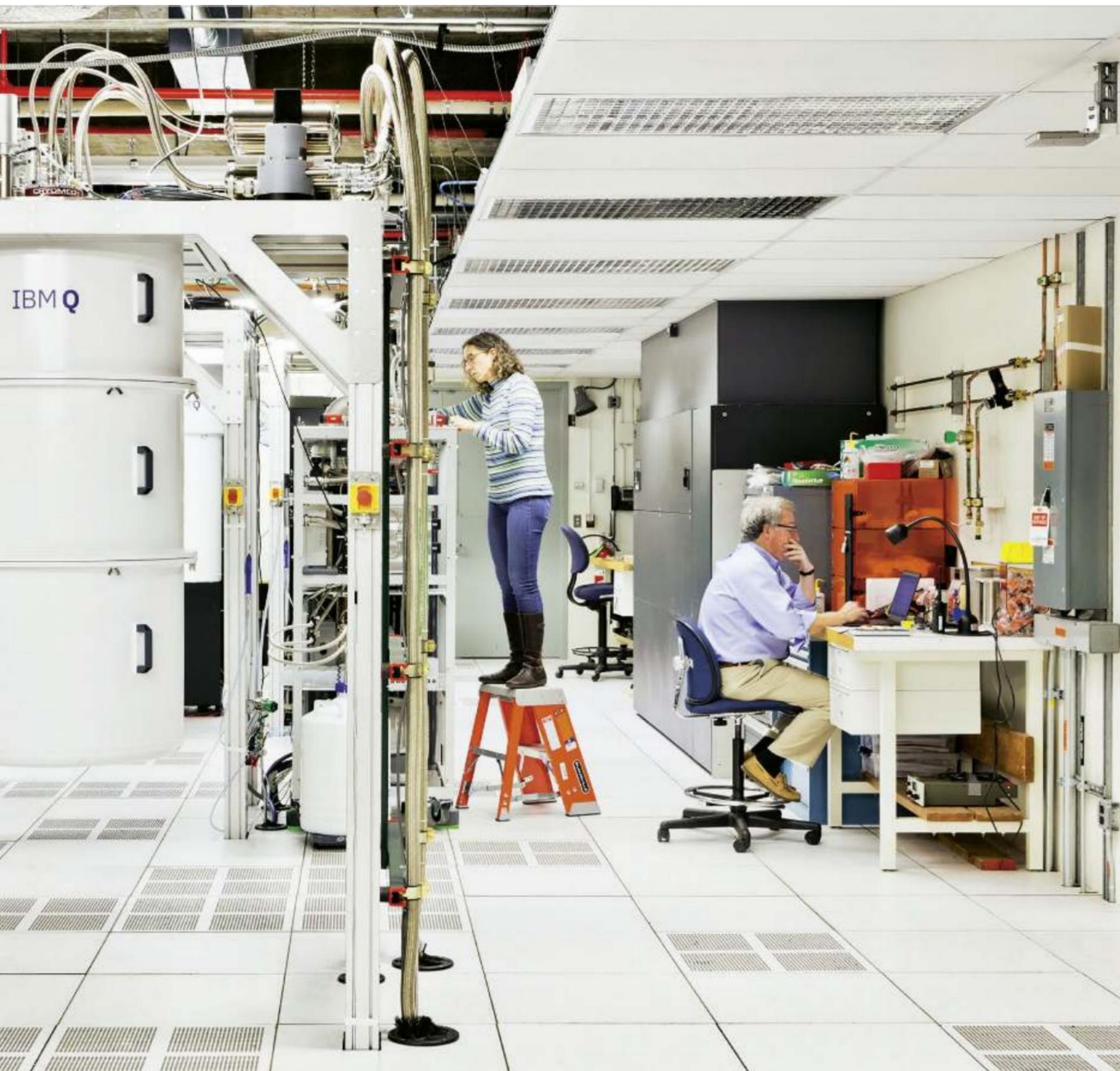
**A. A. :** Votre question est celle de la frontière entre monde classique et monde quantique, ou "cut de Heisenberg" : existe-t-il une taille critique en dessous de laquelle un objet a des propriétés quantiques et au-delà de laquelle il n'en a plus ? En dessous de laquelle le chat de Schrödinger sera dans



un état superposé "mort et vivant" avant la mesure, et soit mort soit vivant au-delà ? Cette question, la science fondamentale n'y a toujours pas répondu de façon satisfaisante. Malheureusement, elle n'attire guère les financements. Les technologues travaillent en effet sur un problème plus immédiat, celui de faire coexister quelques dizaines de qubits et de corriger leurs erreurs. Savoir

*“ La mécanique quantique a donné naissance aux technologies qui font la société de l'information actuelle ”*





si la limite sera à un million ou à un milliard leur semble encore lointain.

**SVHS :** *L'engouement ne risque-t-il pas de retomber sachant que les applications peuvent arriver des décennies après les avancées scientifiques ?*

**P.G. :** Il est vrai que le processus peut être lent. La publication d'Einstein sur l'émission stimulée de photons date de

1917, et le premier laser n'a été construit qu'en 1960. Il est aussi vrai que depuis que les Gafam sont entrés dans l'affaire, il y a beaucoup de promesses excessives et de hype. Faire des promesses peut pousser à avancer, mais c'est évidemment très risqué.

**A.A. :** Je préfère aller sur le fond plutôt que de prédire ce qui va arriver dans cinq ans. Sur ce plan, il y a une vraie question trop souvent

**Un ordinateur IBM Q quantum (cylindres blancs, à gauche) dans un centre de recherche de la firme. IBM, comme les Gafam, est en pointe dans les travaux sur l'ordinateur quantique.**

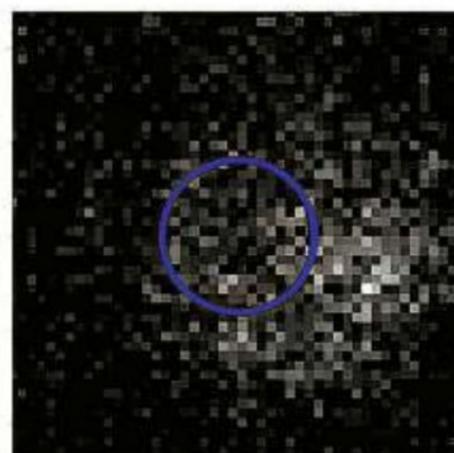
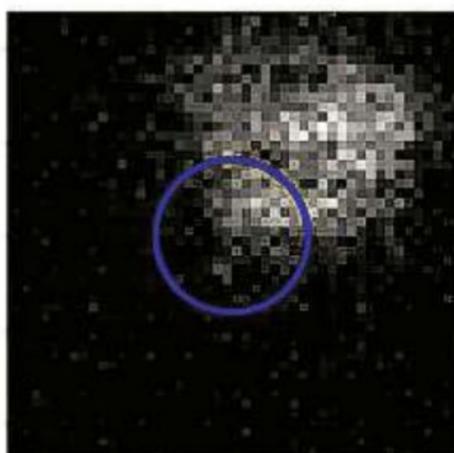
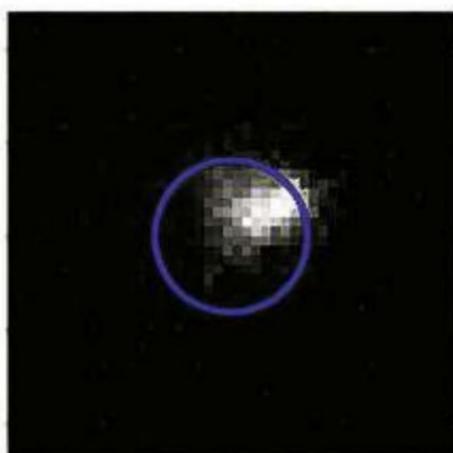
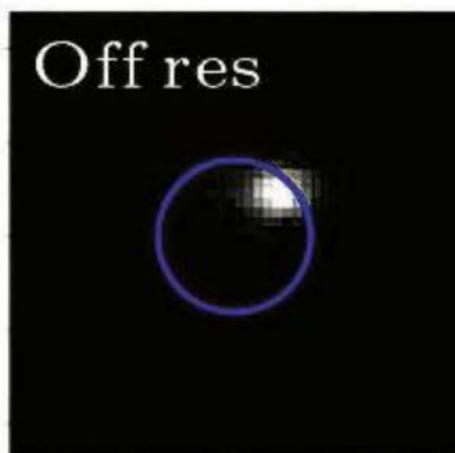
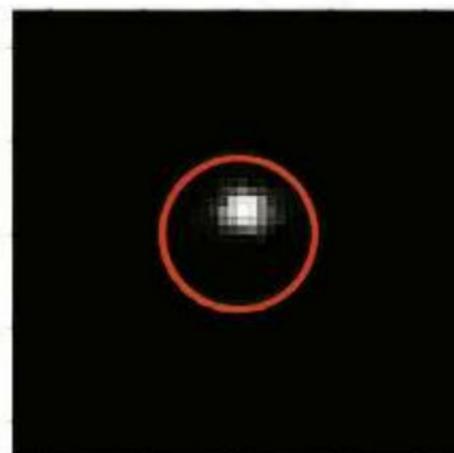
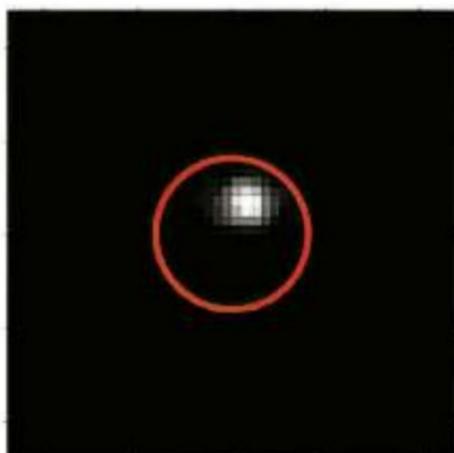
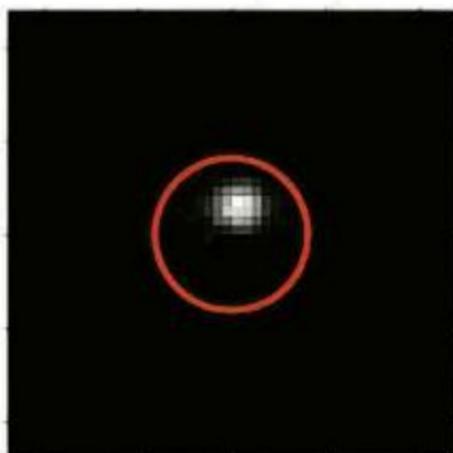
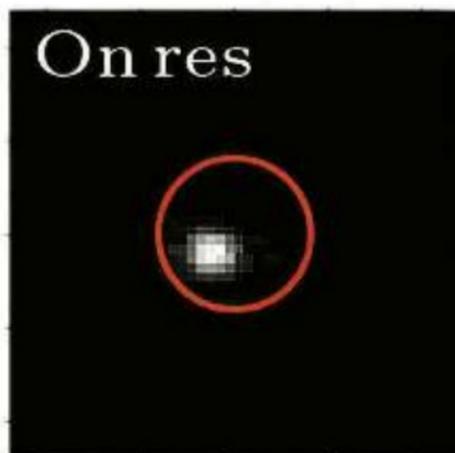
ignorée : est-il souhaitable de développer un ordinateur quantique qui va calculer plus vite à l'heure où la finitude des ressources a des conséquences évidentes ? C'est pourquoi j'ai cofondé la Quantum Energy Initiative (QEI), une nouvelle ligne de

$t=1s$

$t=40s$

$t=70s$

$t=100s$



recherche internationale qui s'intéresse à l'efficacité énergétique des processus quantiques, et notamment des ordinateurs quantiques.

**SVHS:** *Comment lever la part de mystère qui reste dans la théorie de la physique quantique ?*

**P. G. :** Rappelons d'abord que la plupart des physiciens jugent cette entreprise vaine. Ils constatent que les prédictions de la mécanique quantique ne sont jamais prises en défaut expérimentalement et que cela suffit à produire des applications utiles pour la société. Alors, à quoi bon chercher une interprétation des phénomènes sur le plan conceptuel ? L'autre école – dont nous faisons partie avec Alexia – considère que la science progresse en essayant d'éclaircir les zones d'ombre, y compris celles cachées dans les bases mêmes de la théorie que nous utilisons.

## PARTICULE PIÉGÉE!

Le piégeage d'atomes par laser est l'une des avancées majeures de la physique moderne. Depuis sa mise au point il y a une trentaine d'années, cette technique n'a cessé de progresser. Ici, un "piège", développé en 2024 à l'Institut nanotechnologique de Lyon, qui amplifie l'intensité du laser grâce au phénomène de résonance photonique. Cette approche permet de piéger efficacement des particules constituées d'un grand nombre d'atomes (*ligne du haut*). Lorsque le laser est hors résonance, les particules s'échappent – le nuage apparaît alors comme une image floue, hors du plan focal (*ligne du bas*).

**A. A. :** L'une des questions fondamentales est d'établir un formalisme unique pour le monde quantique et le monde classique. Philippe travaille actuellement à expliciter certains résultats de von Neumann pour étendre le formalisme usuel de la mécanique quantique à des objets de plus grande taille, grâce à des outils mathématiques connus, mais peut-être sous-exploités par les physiciens. Un tel modèle aurait des répercussions concrètes : permettre de modéliser non seulement un processeur quantique, mais également le contexte expérimental qui

le protège de la décohérence. Il donnerait aussi accès à des coûts énergétiques minimaux pour l'exécution d'un calcul – résultat actuellement hors de portée de nos théories.

**SVHS:** *Quid de la quête de la gravité quantique ?*

**Comment réconcilier la relativité générale, qui décrit l'infiniment grand, avec la mécanique quantique, qui décrit l'infiniment petit ?**

**P. G. :** L'équipe de Markus Aspelmeyer, à l'université de Vienne, conduit en ce moment une expérience intéressante sur ce sujet. Elle consiste à construire

deux mini-interféromètres, de manière que les atomes contenus dans un interféromètre exercent une attraction gravitationnelle sur les atomes de l'autre. C'est très difficile, car il faut construire des "billes" d'atomes assez grosses pour que leur interaction gravitationnelle soit mesurable, mais pas trop grosses pour qu'elles conservent un comportement quantique. L'expérience est controversée, certains théoriciens pensent qu'elle ne prouvera rien du tout, même si on parvient à la mettre en œuvre. Je fais partie des enthousiastes.

**SVHS: Quels autres travaux actuels sont excitants pour l'avenir de la physique, selon vous ?**

**A. A. :** Mes rêves sont plus d'ordre philosophique et sociétal que scientifique : comment concilier le beau et l'utile ? Comment construire au long cours dans un monde d'immédiateté ? Comment préserver la recherche fondamentale dans un monde aux ressources limitées ?

**P. G. :** Si l'on reste sur cette grande question de la gravité quantique, un problème majeur est qu'elle devrait se manifester essentiellement dans le régime non linéaire de la gravitation, qui se manifeste dans les objets supermassifs comme les trous noirs... Or, un nouveau moyen d'observation de ces objets est né de la détection des ondes gravitationnelles en 2015. Celles que nous parvenons à mesurer proviennent pour l'instant de



l'effondrement de trous noirs, soit des phénomènes à l'échelle galactique, a priori peu quantiques. Mais une leçon que j'ai apprise au cours de ma carrière est que si on peut aller explorer un terrain inconnu, il faut le faire. C'est ainsi que l'on découvre des phénomènes inattendus, qui pourraient dans ce cas révolutionner la physique. ■

\* Philippe Grangier est directeur de recherche au CNRS à l'institut d'optique Graduate School (université Paris-Saclay).

**Un satellite en orbite autour de la Terre. La première révolution quantique a permis la mise au point du GPS. La seconde pourrait chambouler la cryptographie, toujours à l'aide des satellites.**

*Il a participé à l'expérience qui a valu à Alain Aspect le prix Nobel de physique 2022, primordiale pour la validation du phénomène d'intrication quantique.*  
\*\* Alexia Auffèves est directrice de recherche au CNRS et directrice du laboratoire international MajuLab (Singapour). Elle a cofondé une initiative internationale de recherche sur le thème de l'énergétique quantique.

*Existe-t-il une taille critique en dessous de laquelle un objet a des propriétés quantiques et au-delà de laquelle il n'en a plus ?*

# COMPRENDRE





Cet imposant détecteur CMS (solénoïde compact pour muons) est installé sur le LHC (grand collisionneur de hadrons) du Cern. Il permet d'étudier le résultat des collisions entre particules élémentaires.

© COSMOS

# Une théorie com expliquée par



# plexe l'art



Tableaux et sculptures permettent parfois d'accéder à un monde qui nous est étranger. Nous avons donc demandé à six scientifiques de choisir une œuvre d'art pour nous aider à mieux comprendre quelques grands concepts de la physique quantique.

PAR SANDRINE MARY

## LA DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE

**LES PYRAMIDES DE PORT-COTON, BELLE-ÎLE, CLAUDE MONET (1886)**

**Nora Berrah, professeur émérite de physique, chaire d'excellence internationale Blaise-Pascal, coauteure de Physique quantique, le guide de référence (éd. Trédaniel).**



*la superposition, mais aussi comme une particule avec des propriétés totalement différentes, telles que la localisation et l'interaction directe avec d'autres particules ; tout dépend de la manière dont on choisit de l'observer."*

*"Dans Les Pyramides de Port-Coton, nous explique Nora Berrah, si l'on regarde l'eau, on y voit des ondulations à la surface de la mer : l'eau est donc une onde qui se propage. Mais si l'on décide de regarder de plus près, comme le ferait un chimiste ou un physicien, on observe que l'eau est composée de molécules  $H_2O$  qui se comportent comme de la matière. Cette différence dépend de la manière dont on observe cette mer : onde ou matière ? Dans le concept de la dualité onde-corpuscule en physique quantique, c'est la même chose. Une particule peut se comporter comme une onde, montrant des propriétés telles que la diffraction, l'interférence et*

*La dualité onde-corpuscule est l'une des premières étrangetés observées expérimentalement en physique quantique. En 1801, le physicien Thomas Young fait passer de la lumière à travers deux fentes et observe sur un écran placé derrière des motifs d'interférence typiques d'un comportement ondulatoire. Il conclut que la lumière est une onde. Cependant, la lumière est aussi composée de photons, des particules qui se comportent comme telles. La dualité onde-corpuscule a ensuite été généralisée à toutes les particules étudiées en physique quantique. "Accepter cette dualité est un véritable changement de paradigme, mais c'est une réalité qu'il faut admettre : c'est ça, la physique quantique", conclut Nora Berrah.*



## LE NON-DÉTERMINISME

**VISION POÉTIQUE  
ACRYLOPTACYANOTIQUE,  
RUI PRAZERES (2016)**

**Christine Guerlin, enseignante-chercheuse à Sorbonne Université, laboratoire Kastler-Brossel.**

*“Dans cette œuvre, je vois deux mondes qui se touchent. Dans la partie haute, le monde déterministe de la physique classique où l'on voit bien les cercles : ils sont parfaitement délimités. Dans la partie basse, on a l'impression que ces mêmes cercles se transforment*

*en ondes, comme si l'information sur leur forme ou leur position se diluait dans un champ des probabilités. C'est le monde quantique, qui est non-déterministe : il n'y a pas de certitude, mais des probabilités de résultats de mesures”,* explique Christine Guerlin.

En mécanique classique, si l'on connaît les conditions initiales, par exemple la position et la vitesse d'un ballon, il est possible d'en déduire sa position finale. En revanche, en mécanique quantique, le résultat d'une mesure

ne peut pas être anticipé de manière certaine.

*“C'est une probabilité de résultat que*

*nous obtenons, ajoute Christine Guerlin. Cette notion a fait, et fait encore aujourd'hui couler beaucoup d'encre, car on ne sait toujours pas pourquoi la mesure en physique quantique est non-déterministe.”*





## LA SUPERPOSITION

**QUANTUM MAN, JULIAN VOSS-ANDREAE (2006)**  
Charles Antoine, maître de conférences à Sorbonne Université, auteur de *Schrödinger à la plage* (éd. Dunod) et du spectacle *“Equi-Quanto”*, qui met la science moderne en poésie équestre.

“Cette sculpture représente un homme composé d’une multitude de fines lamelles de métal espacées entre elles, décrit Charles Antoine. Selon l’angle de vue, le personnage apparaît alors pleinement ou disparaît progressivement jusqu’à devenir complètement invisible. Chacun de ces états de ‘visibilité’ coexiste tant qu’on n’a pas choisi un angle précis pour le regarder. En complète analogie avec la notion de superposition quantique : une particule peut



en effet coexister dans plusieurs états et n’a donc pas d’état bien déterminé avant qu’on effectue une mesure.”

Pour parvenir à illustrer ce phénomène en apparence paradoxal, l’artiste a créé une illusion d’optique saisissante en donnant

l’impression de maîtriser le vide.

“Souvent, le grand public pense que la superposition d’états signifie qu’une particule peut se trouver à deux endroits à la fois, mais c’est une interprétation incorrecte. La superposition d’états quantiques est une sorte de champ de probabilités qui coexistent tant qu’on n’a pas effectué de mesure, ajoute le physicien. C’est une notion centrale en physique quantique, qui nous plonge dans une réalité bien différente de celle que nous pensons connaître.”

## L’INTRICATION

**LES AMANTS, RENÉ MAGRITTE (1928)**

Tom Darras, physicien, cofondateur de Welinq.



“Cette œuvre illustre étonnamment bien le principe d’intrication. On voit deux amants recouverts d’un voile ; on ne sait pas qui est qui, mais on comprend qu’ils sont liés. C’est la même chose pour le concept d’intrication où, lorsque deux particules sont créées au même point et au même instant dans l’espace, elles sont profondément liées, elles partagent la même existence”, nous explique Tom Darras.

La première expérience d’intrication quantique a été réalisée par Alain Aspect sur deux photons distants de 12 m. Il a pu constater que leur polarisation était instantanément corrélée. “Lorsque l’intrication quantique a été formulée mathématiquement dans les années 1920, Albert Einstein a parlé d’une ‘spooky action’ ou ‘phénomène étrange’, ajoute Tom Darras. Il était sceptique, mais, depuis, l’ensemble des technologies développées au cours des dernières décennies nous permet de manipuler cette propriété d’intrication, même si c’est une notion a priori contre-intuitive.”





## LE PRINCIPE DE COMPLÉMENTARITÉ

**CONVERGENCE, JACKSON POLLOCK (1952)**

**Tobias Hürter, mathématicien et philosophe, auteur des Maîtres des atomes (éd. Les Arènes).**

*“Dans cette œuvre de Pollock, je vois d’abord des figures colorées bleues, rouges et jaunes qui s’entremêlent, puis je discerne un autre tableau, cette fois-ci uniquement composé de noir et de blanc. Je ne parviens pas à voir l’un en même temps que l’autre, même s’ils forment un tout. J’ai l’impression d’être devant deux tableaux opposés, mais indissociables. C’est ainsi que l’on pourrait résumer le principe de complémentarité”, affirme Tobias Hürter.*

Niels Bohr énonce le principe de complémentarité en 1927, selon



lequel il y a des propriétés dans des systèmes quantiques qui s’excluent mutuellement, mais qui doivent être intégrées pour une compréhension complète de la réalité, comme l’énergie et le temps. Ces propriétés complémentaires ne peuvent pas être observées simultanément, tout comme nous ne pouvons pas mesurer en même temps la

position et la vitesse d’une particule, mais elles sont toutes deux valides et essentielles dans des contextes différents. *“En développant ce principe, Niels Bohr a voulu proposer une vision du monde pour intégrer la réalité quantique. C’est pourquoi le principe de complémentarité est plus une notion philosophique que scientifique. Le monde quantique est si déroutant qu’il me semble nécessaire aussi de modifier peut-être notre façon de voir le monde macroscopique.”*

*“ Le monde quantique est si déroutant qu’il faut peut-être modifier notre façon de voir le monde macroscopique ”*

# L'EFFONDREMENT DE LA FONCTION D'ONDE

**VIBRATION JAUNE,  
JESÚS-RAFAEL SOTO  
(1965)**

**Marlène Assié,  
physicienne  
et chargée  
de recherche  
au CNRS, laboratoire  
de physique des 2 infinis.**

*“Dans l'œuvre de Jesús-Rafael Soto, explique Marlène Assié, on observe une rupture nette entre le jaune*

*vif dans la partie haute de l'œuvre et les lignes jaunes dans la partie basse, qui bougent et vibrent car il s'agit de tiges métalliques suspendues par des fils de nylon au rebord supérieur de l'œuvre. C'est similaire au concept de l'effondrement de la fonction d'onde, qui introduit une rupture nette entre le monde quantique et le monde classique. En*

*physique quantique, une particule peut être décrite par une fonction d'onde, c'est-à-dire par un champ de possibilités sur son état. Dès que cette particule interagit avec son environnement, elle perd cette superposition d'états pour n'en présenter qu'un seul. C'est pourquoi on parle d'effondrement de la fonction d'onde, c'est-à-dire que l'on passe d'une superposition d'états à un seul état.”*

Serge Haroche, prix Nobel de physique en 2012, a montré, par une expérience sur des photons, que le temps d'effondrement est d'autant plus court que le nombre de photons mesurés est grand. Cela expliquerait pourquoi les systèmes macroscopiques, formés d'un nombre gigantesque de particules, apparaissent toujours comme classiques et non quantiques. *“Les vibrations jaunes de l'œuvre représentent pour moi la superposition d'états d'une particule. La rupture au centre de l'œuvre, c'est le passage du monde quantique à notre échelle qui réduit la particule à un seul état, un aplat jaune. Ça paraît incroyable, ce foisonnement de possibilités quantiques qui se fige en un état unique et classique, mesurable dans notre monde macroscopique”,* conclut Marlène Assié.



# PARLONS QUANTIQUE

Voici quelques définitions de base pour maîtriser le vocabulaire d'une physique aussi complexe que contre-intuitive. PAR SANDRINE MARY

## DÉCOHÉRENCE QUANTIQUE

Aussi appelée effondrement de fonction d'onde, c'est un phénomène par lequel un système quantique, sous l'effet de son interaction avec l'environnement, perd sa cohérence quantique. Sa superposition d'états est détruite et le système est alors régi par les lois de la physique classique.

## DUALITÉ ONDE-PARTICULE

Selon ce principe, une particule peut présenter, suivant la situation, un comportement ondulatoire ou corpusculaire.

## EFFET TUNNEL

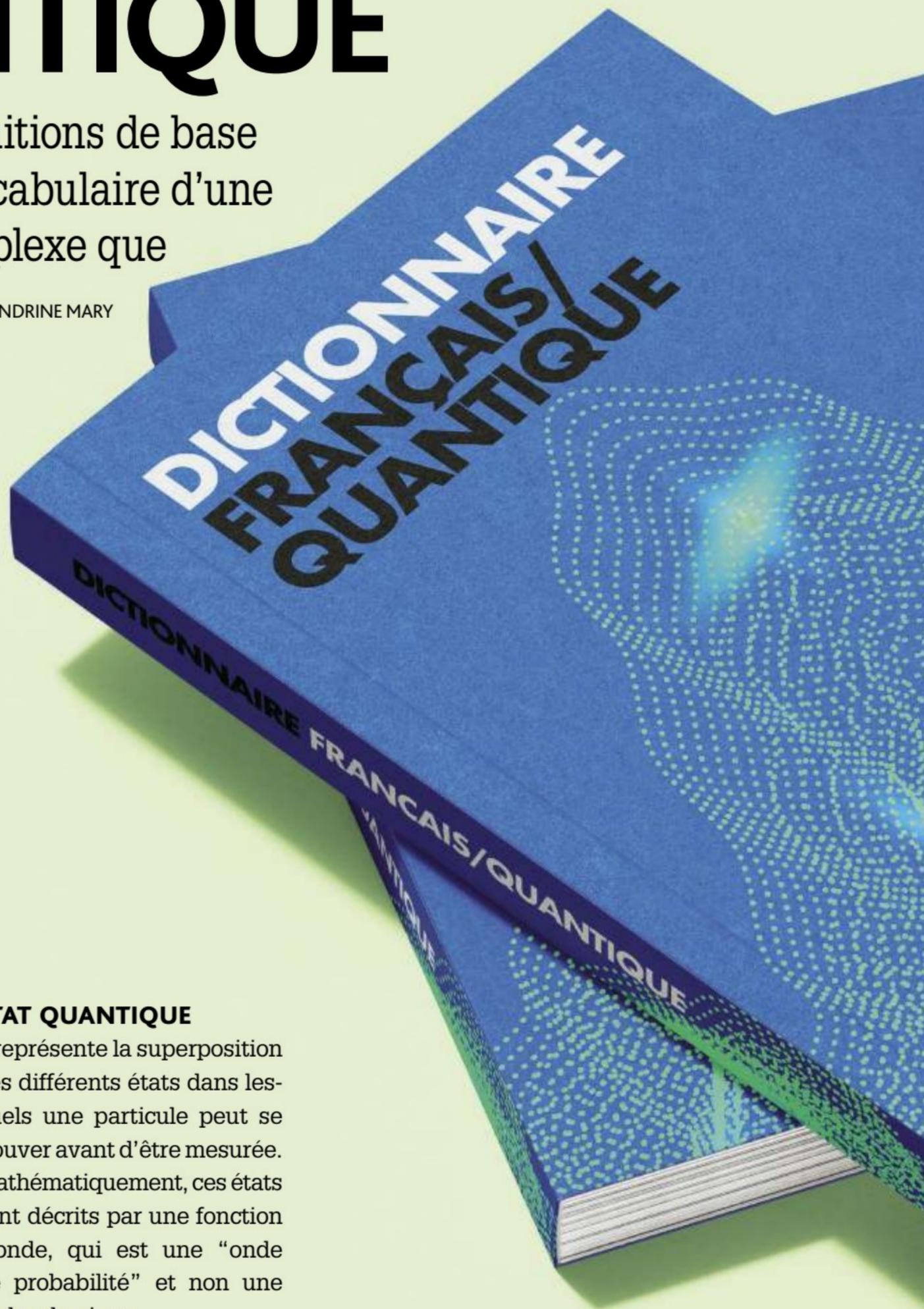
Imaginez que votre voiture est dans un garage avec la porte fermée. Dans le monde quantique, elle pourrait franchir cet obstacle et se retrouver de l'autre côté sans avoir à ouvrir la porte. En mécanique quantique, les particules peuvent traverser des barrières de potentiel même si leur énergie est inférieure à l'énergie nécessaire pour les franchir.

## ÉTAT QUANTIQUE

Il représente la superposition des différents états dans lesquels une particule peut se trouver avant d'être mesurée. Mathématiquement, ces états sont décrits par une fonction d'onde, qui est une "onde de probabilité" et non une onde physique.

## INCERTITUDE D'HEISENBERG

En 1927, le physicien allemand, Werner Heisenberg, démontre qu'il est impossible



de connaître simultanément et avec précision la position et la quantité de mouvement (la vitesse multipliée par la masse) d'une particule. Cette limitation n'est pas due à la qualité des instruments de mesure, mais aux propriétés fondamentales de la mécanique quantique.

### INFORMATIQUE QUANTIQUE

Elle s'appuie sur les principes de la physique quantique, notamment la superposition et l'intrication quantiques.

### INTRICATION

Phénomène qui lie deux particules de telle sorte que les propriétés de l'une dépendent de celles de l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare.

### MATHÉMATIQUES QUANTIQUES

La physique quantique est née d'un formalisme mathématique. C'est l'une des

premières fois dans l'histoire des sciences où la théorie devance l'observation. Paul Dirac, Werner Heisenberg, Max Planck, Niels Bohr, les grands noms de la physique quantique ont élaboré des outils mathématiques pour décrire ce qui, à l'époque, n'avait pas encore été observé. Par exemple, Dirac a imaginé la notation bra-ket pour décrire les états quantiques, et la plus célèbre des équations est celle d'Erwin Schrödinger, qui décrit l'évolution dans le temps d'un état quantique :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle = \hat{H} |\Psi\rangle$$

### MÉMOIRE QUANTIQUE

C'est un qubit qui permet de surmonter la limitation imposée par le principe de non-clonage (*voir infra*) en stockant et restituant un état quantique sans le mesurer ni le perturber.

### PHOTON

Particule élémentaire de la lumière, il est doté d'un spin 1 et d'une masse nulle.

### PHYSIQUE QUANTIQUE

Ensemble des lois physiques qui régissent le comportement du monde au niveau nanoscopique : photons, électrons, atomes, molécules et cristaux.

### PRINCIPE DE NON-CLONAGE

Il implique qu'il est impossible de copier un état quantique inconnu de manière exacte. Ce principe est une limitation importante dans le développement des

réseaux quantiques, car il empêche d'amplifier un signal quantique en créant des copies identiques.

### QUBIT

C'est l'équivalent quantique du bit (0 et 1) utilisé dans un ordinateur classique. Un qubit peut être un atome, un ion, un électron ou un photon, et il présente une superposition d'états (0, 1 ou 0 et 1).

### SPIN

Propriété intrinsèque aux particules (aussi fondamentale que le sont leur masse et leur charge) qui retranscrit, pour prendre une image, leur "rotation" sur elles-mêmes.

Le spin ne peut prendre que certaines valeurs : par exemple, un électron a un spin, en notation simplifiée, de  $\frac{1}{2}$  si le spin est vers le haut et  $-\frac{1}{2}$  vers le bas. Si un électron est utilisé comme qubit, la projection de son spin sur un axe peut donner l'état  $|0\rangle$  pour le spin vers le haut, l'état  $|1\rangle$  pour le spin vers le bas, et une superposition d'états où le spin n'est pas strictement orienté – il peut être dans une direction intermédiaire.

### SUPERPOSITION D'ÉTATS

Une particule peut exister simultanément dans une superposition d'états quantiques. C'est le concept illustré par l'expérience de pensée d'Erwin Schrödinger, physicien du  $xx^e$  siècle, selon laquelle un chat dans une boîte fermée peut être à la fois mort et vivant. ■

# Six expériences fondatrices

**L**a mécanique quantique est un peu une histoire de famille pour les physiciens, rien de plus normal par conséquent qu'elle soit marquée dès l'origine par un désaccord entre Niels Bohr et Albert Einstein. La cause de leur discordance tient aux fondements mêmes de la mécanique quantique, et à une question de philosophie des sciences : qu'est-ce que le réel ? *"Pour Niels Bohr, il n'était pas fondamental d'y réfléchir, car selon lui, ce qui se passait dans le monde quantique n'était pas réel"*, résume le physicien Daniel Hennequin, du laboratoire PhLAM de Lille. *"Ce qui dérangeait fondamentalement Einstein."* Car même si chaque "monde" est déterminé par des équations bien établies (physique classique ou fonction d'onde), c'est le passage du monde quantique au nôtre qui reste le point de discordance. La question taraude les physiciens depuis des décennies. *"Werner Heisenberg, par exemple, a toujours cru que la mécanique*

*quantique était une théorie 'parfaite', dans le sens où aucune amélioration n'est possible"*, raconte Scott Walter, professeur d'histoire des sciences à l'université de Nantes. *"Mais Einstein ou Paul Dirac n'étaient pas d'accord."* Ainsi en 1935, Einstein, Boris

Podolsky et Nathan Rosen proposent le paradoxe EPR pour démontrer ce qu'ils perçoivent comme des limitations de la mécanique quantique. Ils montrent que, si celle-ci est complète, alors elle implique une "action à distance" instantanée, qui leur semble par ailleurs impossible. *"On possède des lettres d'Einstein envoyées à Schrödinger, disant en substance que les implications de la mécanique quantique sont absurdes, rappelle Daniel Hennequin. Il faut imaginer ces physiciens s'envoyer des lettres !"* L'une d'elles deviendra célèbre : *"Einstein y imagine un baril d'explosif quantique, explosé et non explosé"*, résume Daniel Hennequin. Schrödinger imagine pour sa part un certain chat, mort et/ou vivant... ancrant ainsi la mécanique quantique dans l'imaginaire collectif. Finalement, dans cette dispute entre Einstein et Bohr, c'est le second qui va peu à peu l'emporter – à chaque nouvelle expérience prouvant l'étrangeté du monde quantique.

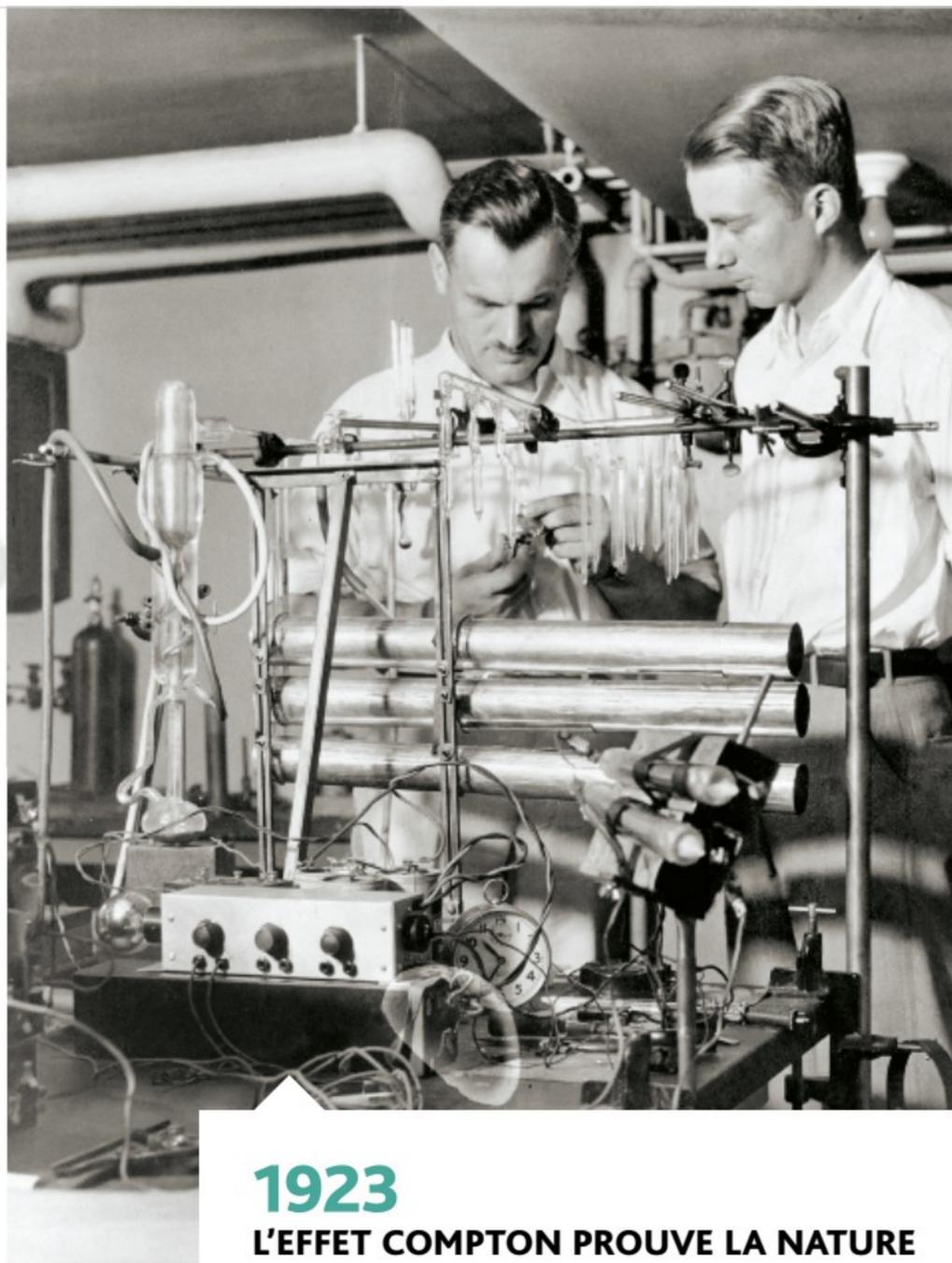
Niels Bohr et Albert Einstein, photographiés en 1925 par le physicien Paul Ehrenfest, à Leyde (Pays-Bas).



## 1922

### AVEC STERN ET GERLACH, LE SPIN TOURNE

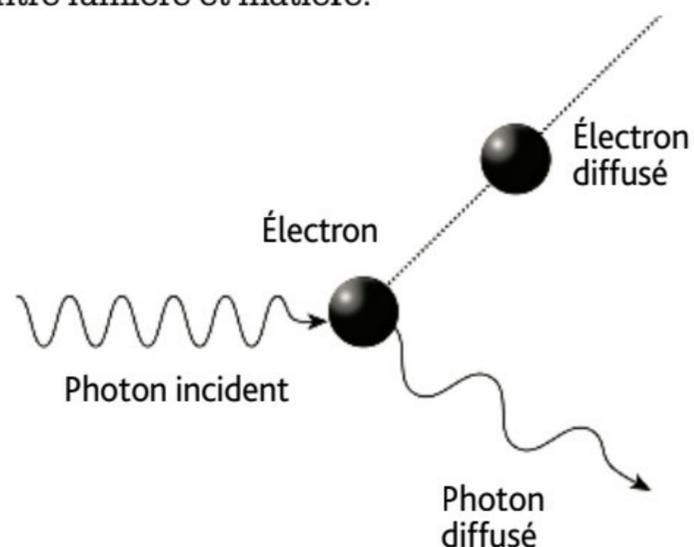
Les physiciens Otto Stern (*ci-dessous*) et Walther Gerlach font passer des atomes d'argent à travers un dispositif doté d'un champ magnétique, pour que leur moment cinétique, leur rotation propre, soit nul. Sauf qu'à la sortie du dispositif, les faisceaux divergent... L'explication donne lieu à la description d'un phénomène quantique : le spin, rotation fondamentale des atomes, qui les dévie sur des positions bien précises plutôt qu'aléatoires.

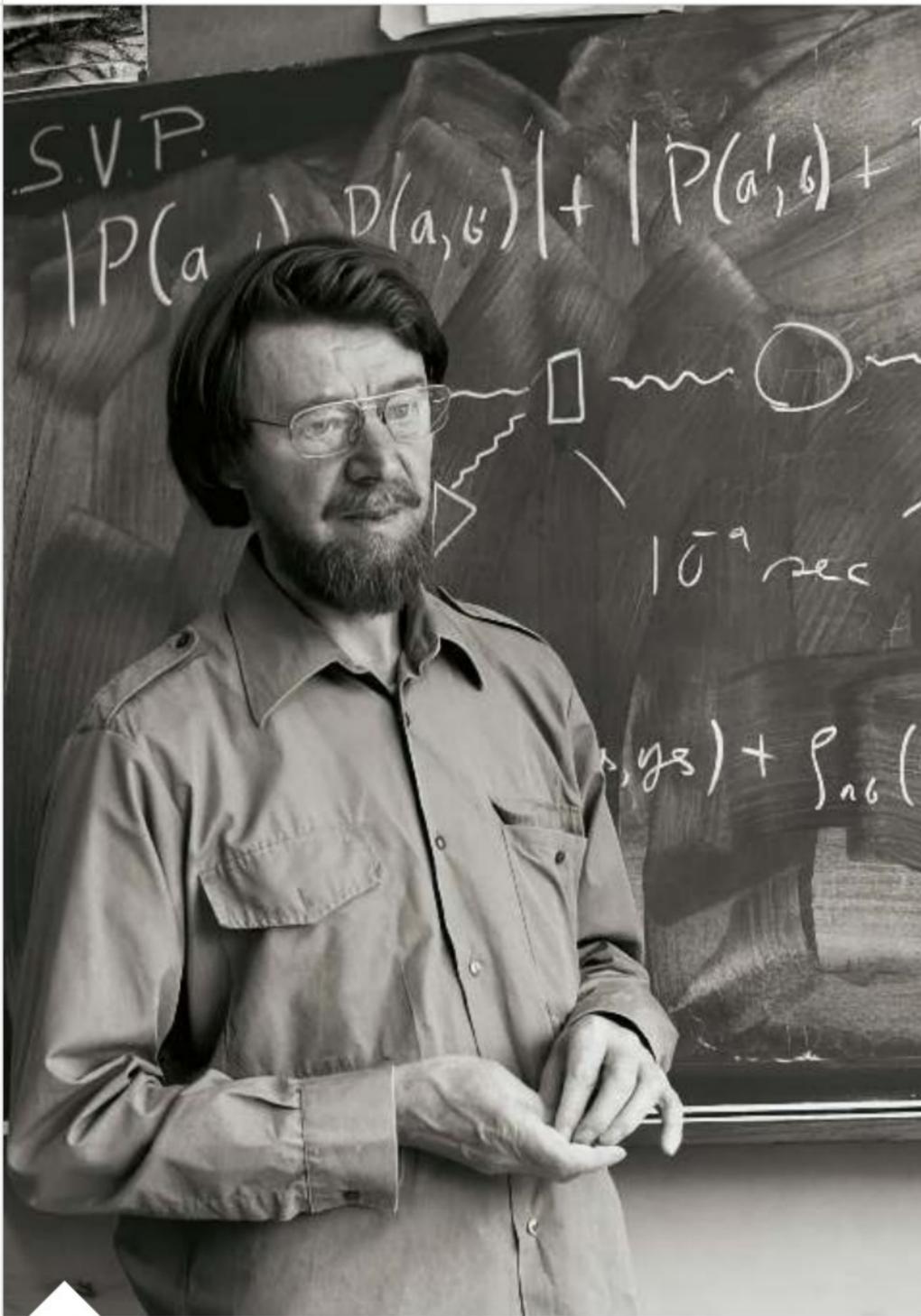


## 1923

### L'EFFET COMPTON PROUVE LA NATURE PARTICULAIRE DES RAYONS X

En 1923, Arthur Compton (*ci-dessus, à gauche*) bombarde des électrons avec des rayons X et mesure la longueur d'onde de la lumière diffusée. Il observe que celle-ci change après diffusion, prouvant que les photons (les "grains de lumière" à l'époque) transfèrent une partie de leur énergie aux électrons lors de la collision, comme le font les particules. L'effet Compton est reproduit aujourd'hui dans des dispositifs expérimentaux utilisant des détecteurs de rayons X et des chambres à vide pour mieux comprendre les interactions fondamentales entre lumière et matière.





## 1978

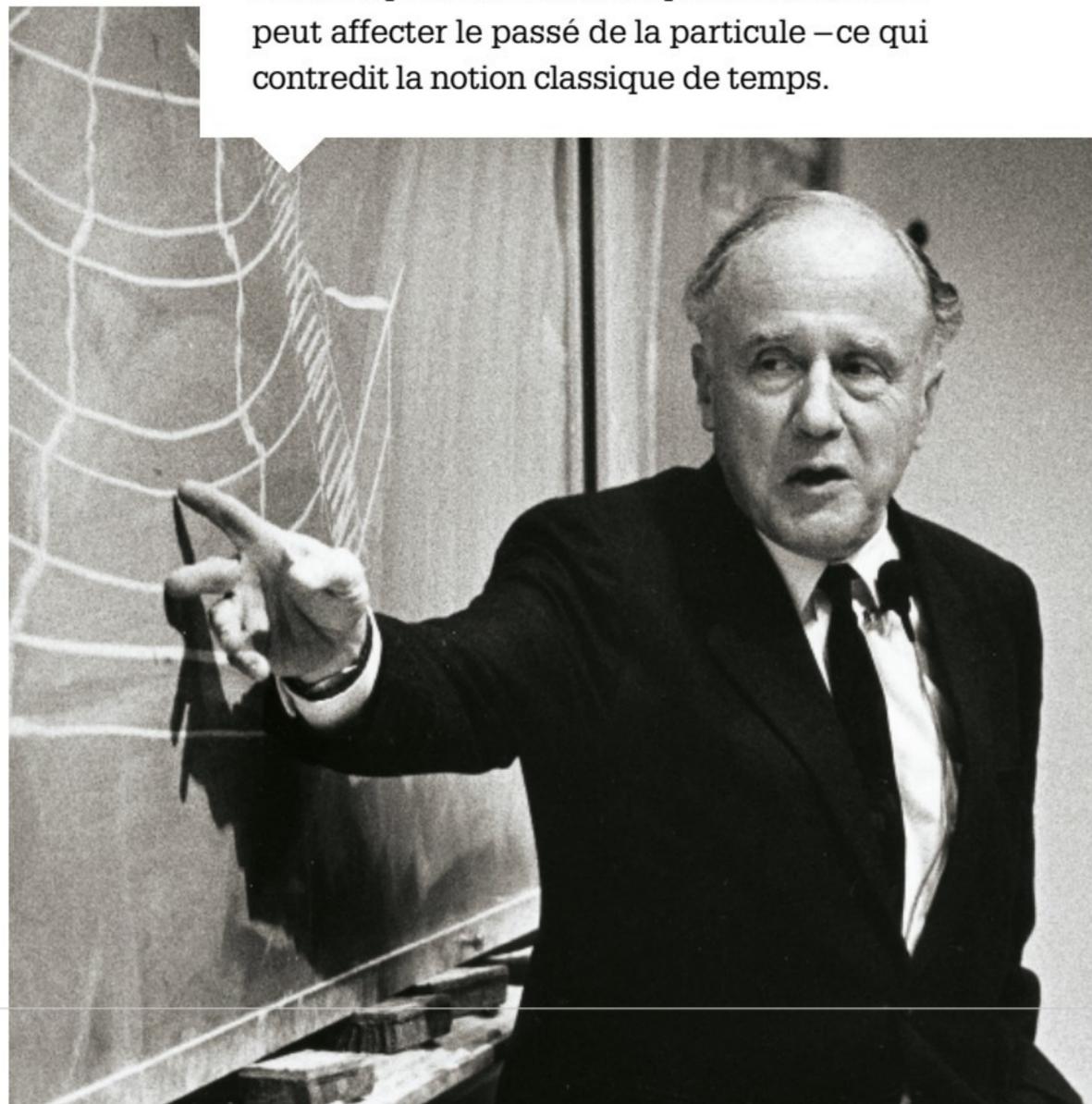
### JOHN WHEELER ET L'EXPÉRIENCE DU CHOIX RETARDÉ

John Wheeler a proposé une version de l'expérience des fentes de Young avec un choix différé. Pour la comprendre, reprenons cette expérience fondatrice : en 1801, le jeune Thomas Young projette vers un écran un faisceau lumineux passant par deux étroites fentes parallèles. Lorsque les photons passent par les fentes, on s'attendrait, selon la physique classique, à voir deux bandes correspondant aux fentes. Or, ce sont des franges d'interférence qui apparaissent, similaires à celles produites par des ondes... La lumière possède donc des propriétés ondulatoires. Dans l'expérience pensée par Wheeler, la décision de mesurer les propriétés d'une particule est prise après qu'elle est censée avoir passé les fentes. On envoie un photon vers un interféromètre où il peut passer par deux chemins distincts. Un détecteur est placé pour mesurer soit le comportement ondulatoire (interférence) soit le comportement particulaire (trajectoire). La configuration du détecteur est décidée après que le photon a traversé l'interféromètre, mais les résultats montrent que le photon "semble savoir" a priori quel type de mesure va être effectué. Cette expérience montre que l'observation peut affecter le passé de la particule – ce qui contredit la notion classique de temps.

## 1964

### LES INÉGALITÉS DE BELL CRÉENT LA SURPRISE

John Bell développe une série d'"inégalités", des statistiques mathématiques qui permettent de tester le principe de localité des particules. Selon ce principe, il n'existe pas d'action à distance possible entre deux particules éloignées, alors que la mécanique quantique soutient que deux particules intriquées, même situées à grande distance l'une de l'autre, forment un même objet physique. Les inégalités de Bell, en utilisant l'existence de variables cachées alors inconnues, vont permettre d'établir un lien mathématique entre les états intriqués et le principe de localité. Dilemme : soit ces inégalités sont pertinentes, et l'explication quantique est erronée ; soit elles ne le sont pas, et alors c'est le principe de réalisme local qui est faux.

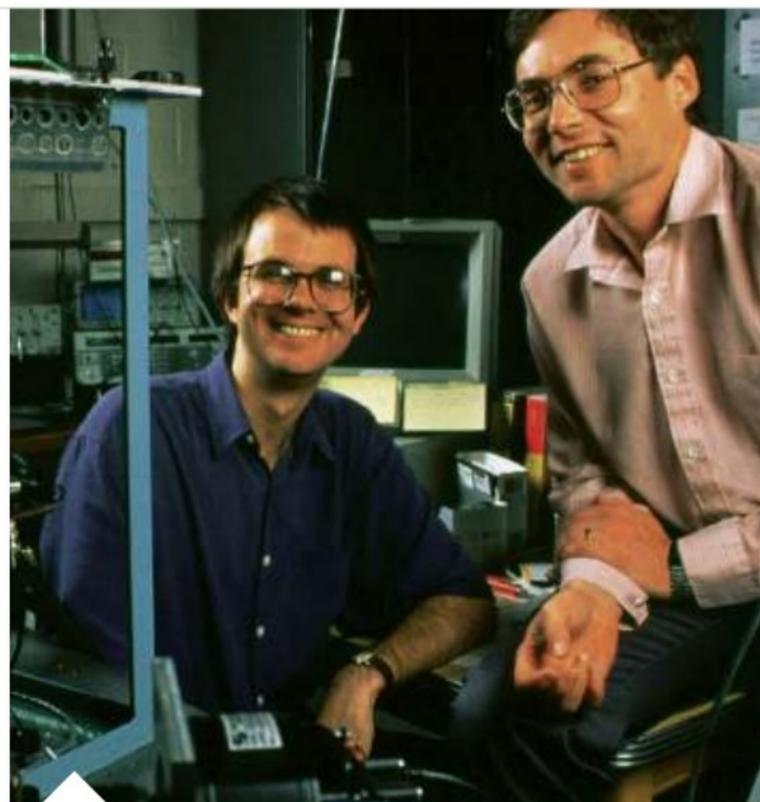




## 1983

### ALAIN ASPECT PROUVE LA RÉALITÉ DE L'INTRICATION

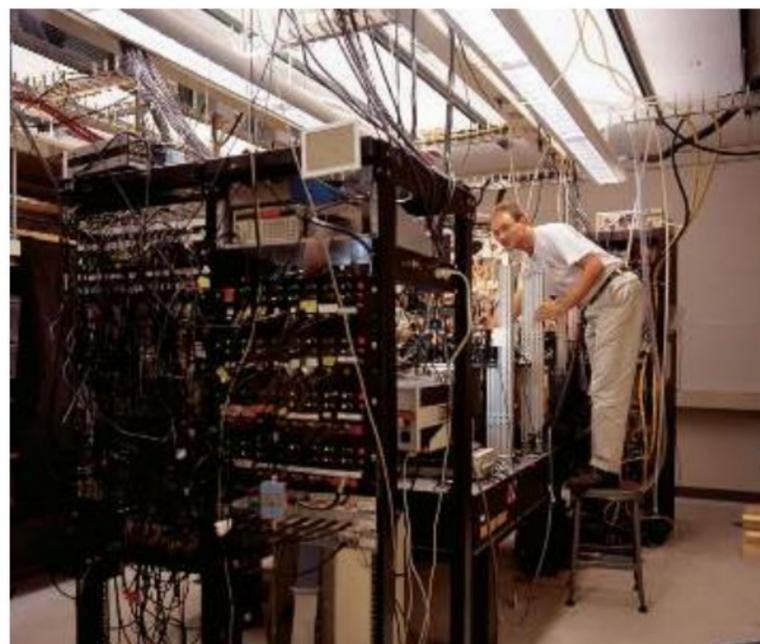
*“La plus belle des expériences !”* de l'avis de la physicienne Alexia Auffèves, directrice du Majulab de Singapour. *“Elle a contribué à changer la vision du monde en résolvant le débat métaphysique né avec la physique quantique, qui opposait Einstein et Bohr.”* Concrètement, Alain Aspect s'est attaqué aux inégalités de Bell, en testant plus profondément l'intrication quantique. Il utilise pour cela des paires de photons intriqués, créés à partir d'un cristal dédié. Ensuite, les photons de chaque paire sont envoyés dans des directions opposées vers des détecteurs placés à des centaines de mètres l'un de l'autre. À chaque détecteur, un dispositif aléatoire change la direction de la polarisation, la “direction” de son champ magnétique, observée juste avant que le photon ne soit mesuré. Aspect a constaté que les résultats de mesure restaient corrélés, prouvant que l'intrication est un phénomène réel qui ne peut être expliqué par une influence locale. Il répond ainsi aux questions soulevées par les inégalités de Bell, et prouve que la mécanique quantique s'explique par un réalisme non localisé. En contradiction totale avec la vision d'Einstein ! Pour Alexia Auffèves, *“Cette expérience a montré la réalité physique de l'intrication, et a ouvert la voie aux technologies quantiques.”*



## 1995

### ERIC CORNELL ET CARL WIEMAN OBTIENNENT UN CONDENSAT DE BOSE-EINSTEIN

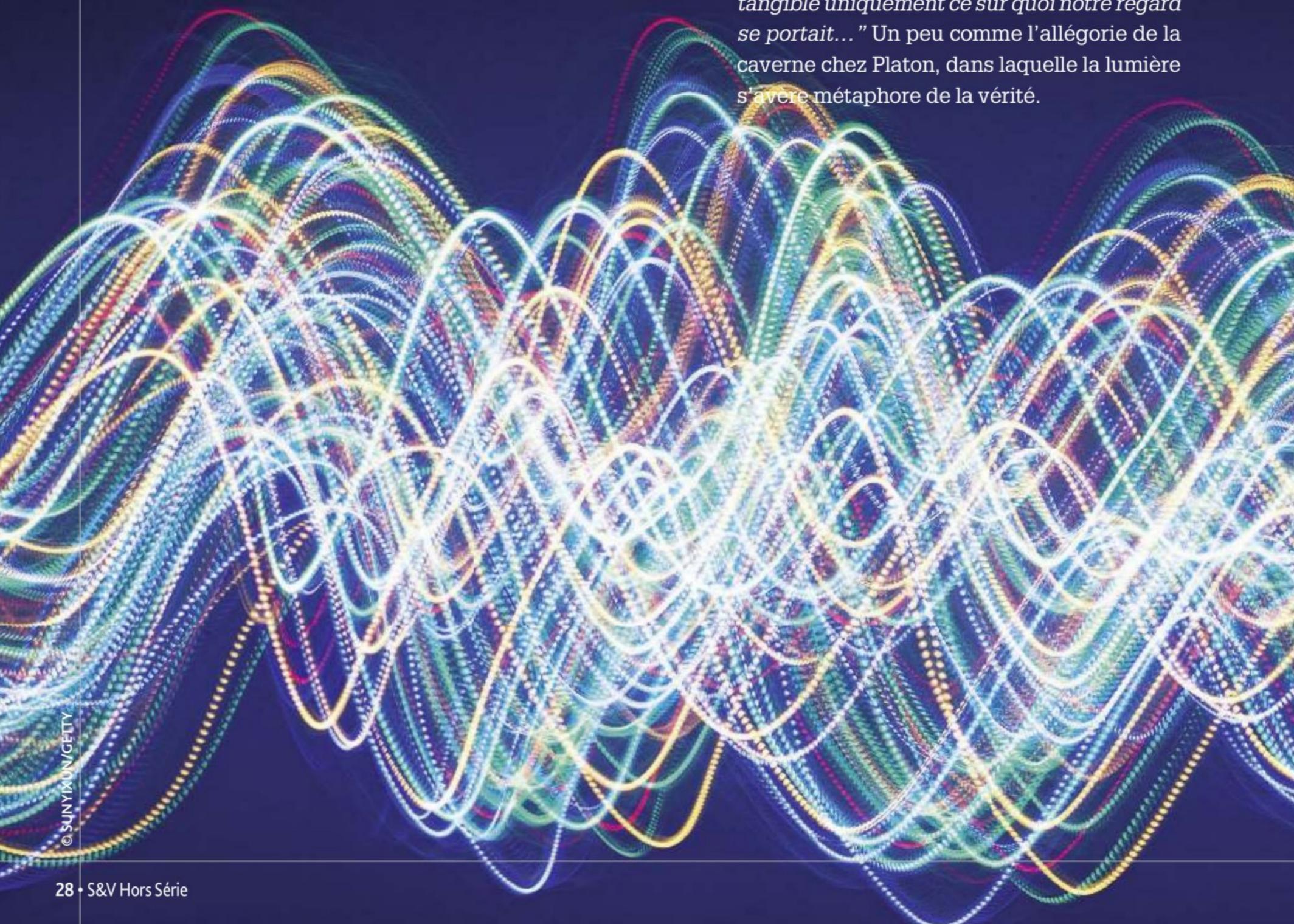
En refroidissant des atomes de rubidium à des températures extrêmement basses, proches du zéro absolu, Cornell et Wieman obtiennent un état de la matière prévu par Einstein et Satyendranath Bose dans les années 1920, appelé le condensat de Bose-Einstein. Selon la physique quantique, les atomes du condensat se comportent globalement comme une seule onde, à la manière d'un banc de poissons regroupé. Ce condensat est visible à l'œil nu, et offre une plateforme inédite pour observer des phénomènes quantiques à notre échelle (*photo ci-dessous*). Il favorise également la superfluidité : un écoulement sans aucune résistance ni viscosité. Cette propriété, appliquée par exemple à l'hélium liquide, permet l'existence des accélérateurs de particules tels que le LHC de Genève. ■



# LA LUMIÈRE, UN CAS D'ÉCOLE

Onde, particule... Qu'est-ce que la lumière ? Depuis l'Antiquité, la réponse a bien évolué. Jusqu'à donner naissance à la physique quantique. PARADRIEN DENÈLE

**F** *acta est lux*, et la Lumière fut, certes... mais qu'est-ce que c'est ? De nos jours, les physiciens la décrivent comme un rayonnement électromagnétique, composé de particules énergétiques élémentaires, les photons. Cette description englobe la lumière visible, les UV, les infrarouges et les ondes radio. Bien loin de la vision des premiers savants ! *“Les Grecs pensaient que la lumière était émise par nos yeux”*, rappelle Daniel Hennequin, physicien au laboratoire optique PhLAM de Lille. *“Ce concept d'extramission' rendait réel et tangible uniquement ce sur quoi notre regard se portait...”* Un peu comme l'allégorie de la caverne chez Platon, dans laquelle la lumière s'avère métaphore de la vérité.



Au Moyen Âge, vers l'an 1000, le savant arabe Ibn al-Haytham propose, dans son *Livre de l'optique*, que la lumière provient des objets et arrive jusqu'à l'œil en ligne droite. Il va influencer les penseurs européens, lesquels découvrent dans la foulée l'optique, les prismes et les lentilles, mais il ne les éclaire pas sur un point essentiel : la nature profonde de la lumière reste un sujet de débat.

## DES INTERFÉRENCES

Six siècles plus tard, le philosophe et mathématicien français René Descartes suggère que la lumière se déplace dans un milieu invisible, l'éther, telle une vague dans une eau translucide. Mais un autre mathématicien, Isaac Newton, soutient qu'elle est composée de petits corpuscules. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, c'est sa vision qui s'impose. *“À l'époque, Newton est considéré comme une autorité absolue par ses confrères, rappelle Daniel Hennequin. Pourtant, il a eu tout faux sur ce point !”*

Le premier à s'attaquer au “Dieu Newton” est le physicien anglais Thomas Young. En 1801, il met au point une expérience faisant passer de la lumière par deux fentes, qui dévoile des bandes d'interférence, un phénomène exclusif aux ondes... *“Mais il ne parvient pas à s'imposer, regrette le chercheur du*

*PhLAM. D'autres physiciens croient encore à la théorie corpusculaire, et expliquent les interférences par des rebonds des particules.”* Le coup de grâce à la théorie de Newton est donné par le Français Augustin Fresnel en 1822. Il reprend les travaux de Young et prouve la nature ondulatoire de la lumière. Cette fois c'est sûr : la lumière est une onde !

Sauf que... la réalité est plus complexe : *“En 1905, Albert Einstein analyse l'effet photoélectrique, l'émission d'électrons par un métal sous l'effet d'un rayonnement lumineux. Il montre qu'il ne s'explique que par la composition corpusculaire de ce rayonnement”,* résume Édouard Brézin, physicien membre de l'Académie des sciences. Les deux anciennes visions rivales doivent se réconcilier : la lumière se comporte certes comme une onde, mais sa nature est faite de corpuscules d'énergie, des “quanta”... La physique quantique s'annonce. Et elle va révolutionner bien plus que la lumière. *“En 1924, Louis de Broglie postule que la dualité ‘photon-onde’ est un phénomène universel, valable pour tous les corps, électrons, atomes, etc.,* ajoute Édouard Brézin. *Le siècle suivant va permettre, par d'innombrables expériences, de montrer le caractère universel de cette nouvelle conception de la matière.”* ■

# Quantique ou toc ?

Drapée dans ses mystérieuses équations, la physique quantique inspire les auteurs de science-fiction. Des multivers à la téléportation, qu'en dit la science ? PAR HUGO LEROUX

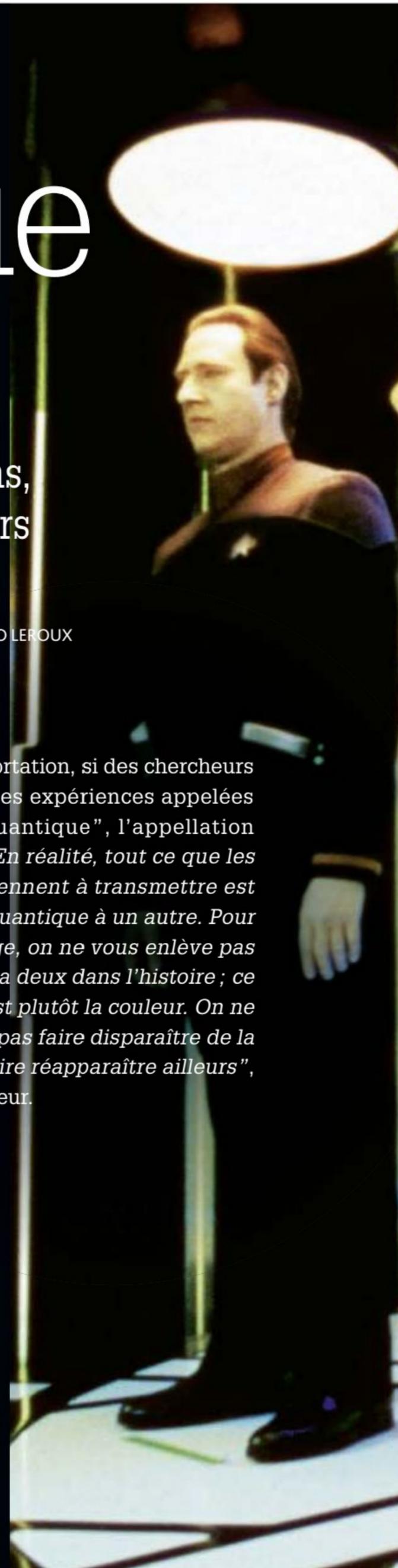
## LA TÉLÉPORTATION

**LA FICTION :** dans la série Netflix *Le Problème à 3 corps*, une civilisation extra-terrestre établit avec l'humanité une communication instantanée en se basant sur l'intrication de particules. Ce phénomène peut aussi justifier la téléportation, comme dans *Star Trek*.

**LA RÉALITÉ :** l'intrication est l'un des phénomènes les plus contre-intuitifs, et pourtant bien réels, de la physique quantique. Lorsque deux particules sont intriquées, si l'on mesure l'état de l'une (par exemple son spin), cela modifie instantanément l'état de l'autre. Il suffirait donc de jouer sur la valeur du spin des particules pour communiquer des informations en binaire (0 ou 1) à travers l'espace. Sauf que... en pratique, cette idée ne marche pas : *"Dans le monde quantique, le résultat de la mesure des particules est toujours aléatoire, donc on ne peut pas savoir s'il s'agit du résultat d'une intrication ou non. En clair, les états de ces deux particules sont seulement coordonnés et ne permettent pas de transmettre une information"*, résume Julien Bobroff, professeur à l'université Paris-Saclay.

Quant à la téléportation, si des chercheurs ont bien réalisé des expériences appelées "téléportation quantique", l'appellation est trompeuse. *"En réalité, tout ce que les chercheurs parviennent à transmettre est l'état d'un objet quantique à un autre. Pour prendre une image, on ne vous enlève pas votre jean, il y en a deux dans l'histoire ; ce qu'on transfère est plutôt la couleur. On ne peut absolument pas faire disparaître de la matière pour la faire réapparaître ailleurs"*, poursuit le chercheur.

Dans la série comme dans le film de Jonathan Frakes, *Star Trek : Insurrection* (1998), avec Patrick Stewart (à droite) et Brent Spiner (à gauche), la téléportation est l'un des principaux modes de déplacement.





# LE VOYAGE TEMPOREL

**LA FICTION :** le blockbuster *Tenet* s'appuie sur la mécanique quantique pour justifier son histoire d'inversion du temps. Tout comme *Avengers : Endgame* dans lequel des héros utilisent de mystérieuses "particules de Pym" pour inverser le temps.

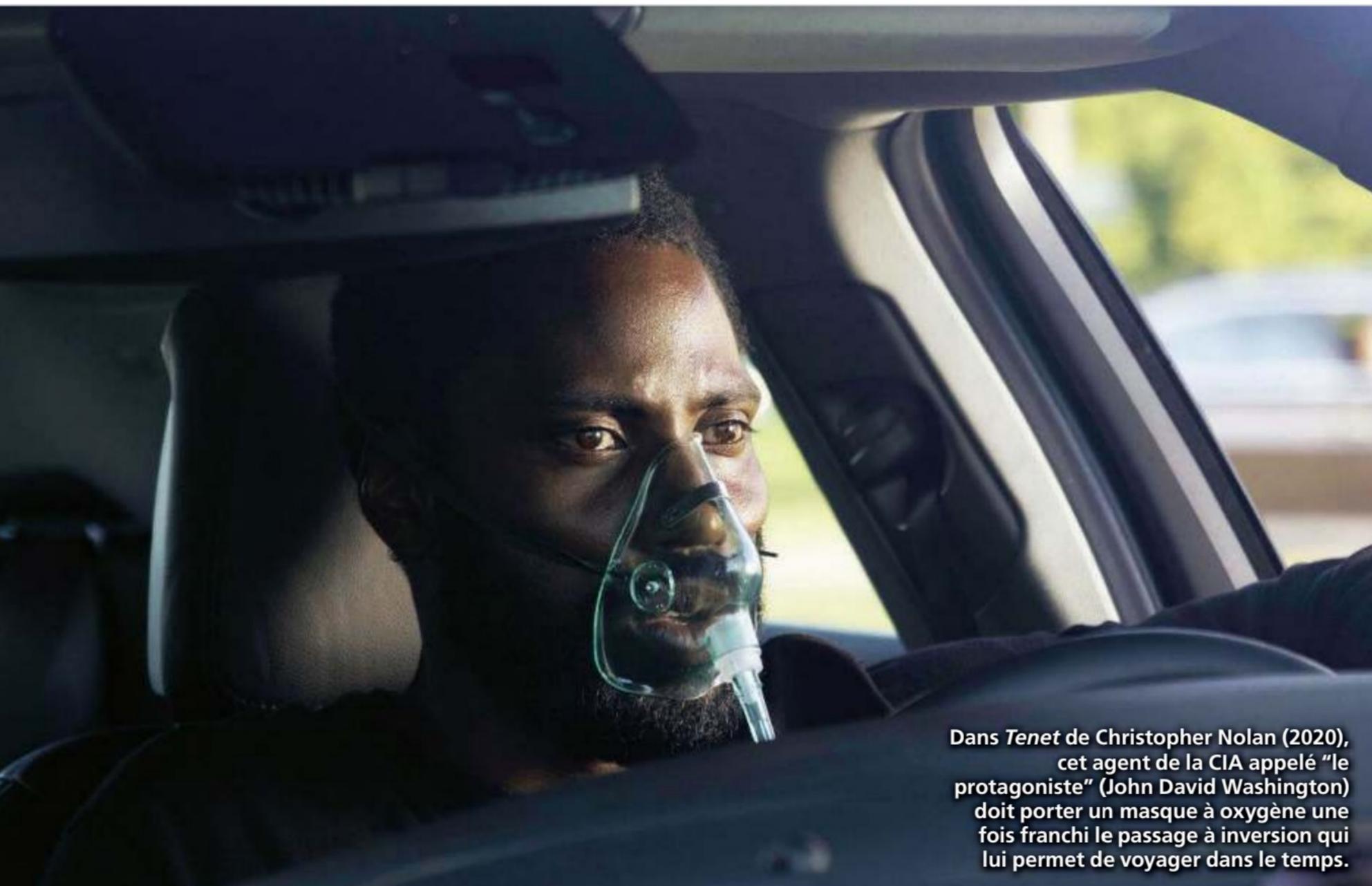
**LA RÉALITÉ :** à première vue, l'aspect quantique relève de la poudre aux yeux. "Dans le cadre quantique, le temps s'écoule de façon tout à fait classique et linéaire. Il n'y a que dans le cadre de la relativité générale qu'il peut être déformé", souligne Roland Lehoucq, astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). La relativité décrit en effet la gravité comme une courbure de l'espace-temps provoquée par l'énergie et la matière. "En théorie,

un champ gravitationnel extrêmement puissant, comme celui généré par un trou noir ou un trou de ver, pourrait donc recourber l'espace-temps sur lui-même pour générer ce que l'on appelle des boucles temporelles fermées", résume le chercheur. Le concept reste cependant controversé devant les paradoxes qu'il induit. Si quelqu'un décidait de voyager dans le temps pour tuer son ancêtre, il mettrait du même coup un terme à sa propre existence... et s'empêcherait de revenir dans le passé pour tuer son ancêtre, et ainsi de suite. Cependant, des chercheurs comme Rod Sutherland, à l'université de Sydney, ont proposé l'existence de boucles temporelles quantiques. Celles-ci ne nécessiteraient pas de structures massives comme les trous noirs, mais se

dérouleraient à l'échelle des particules, et pourraient influencer des événements passés. C'est une piste pour expliquer l'intrication, où deux particules deviennent interconnectées, quelle que soit la distance qui les sépare, sans violer la limite de la vitesse de la lumière. Mais attention : ces boucles temporelles quantiques ne fonctionneraient pas sur des objets massifs. "C'est un subterfuge récurrent de la S.-F. de transposer les effets quantiques à échelle humaine alors qu'il est prouvé qu'ils ne fonctionnent plus dès que les objets sont trop chauds ou trop gros. Pour intriquer les milliards d'atomes d'un corps humain, il faudrait le plonger dans le zéro absolu [-273°C, NDLR] et dans le vide... mais on ne serait plus vivant!", pointe Julien Bobroff.

Dans *Dark Matter*, série de Blake Crouch (2024), sur Apple TV, chacune des portes se trouvant dans un couloir quantique s'ouvre sur une autre dimension de la réalité.





Dans *Tenet* de Christopher Nolan (2020), cet agent de la CIA appelé "le protagoniste" (John David Washington) doit porter un masque à oxygène une fois franchi le passage à inversion qui lui permet de voyager dans le temps.

## LES MULTIVERS

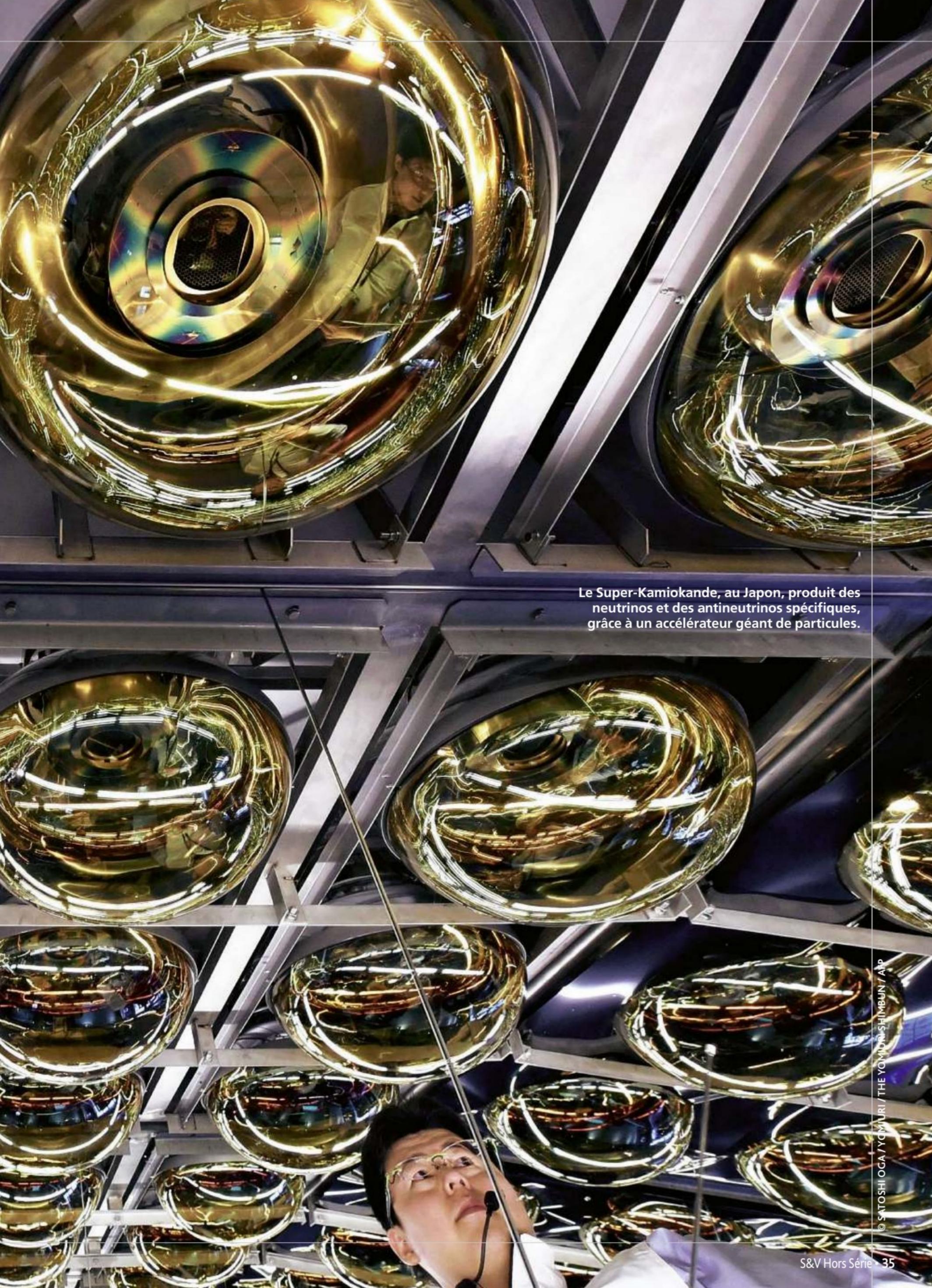
**LA FICTION :** dans *Dark Matter*, un professeur de physique se débat pour sortir du labyrinthe de ses multiples vies parallèles. Dans *Constellation*, après une expérience de physique spatiale qui tourne mal, une femme revient sur Terre et découvre que des parties importantes de sa vie semblent avoir disparu. Ces deux séries diffusées en 2024 sur Apple TV explorent la théorie des mondes multiples résultant de la physique quantique.

**LA RÉALITÉ :** cette hypothèse est réellement discutée par des physiciens ! Tout part de la "superposition d'états", ce phénomène selon lequel un objet en physique quantique est décrit comme une onde, ou un "nuage" d'états possibles. Lorsqu'on effectue une mesure sur cet objet, l'onde se réduit en une particule dotée d'un état précis. « Or, on ne comprend pas bien comment s'opère cette réduction du paquet d'onde », résume Julien Bobroff. En 1957, le physicien Hugh Everett en propose une interprétation :

au moment de la mesure, le nuage de probabilité ne "choisirait" pas un état particulier, ce serait plutôt l'Univers qui se subdiviserait en autant de branches qu'il existe d'états possibles ! Le parallèle avec la S.-F. s'arrête là. *"D'abord, on ne sait pas si cette hypothèse pourra un jour être testée expérimentalement, donc si l'on est dans la science ou plutôt dans la philosophie. Ensuite, ces 'mondes multiples' ne semblent avoir aucune connexion, et nous demeureraient donc inaccessibles"*, conclut Julien Bobroff. D'autres formes de multivers sont également possibles dans le cadre de théories "exotiques" comme la théorie des cordes, visant à réunir relativité générale et physique quantique. Mais là encore, *"ces cadres d'hypothèses restent pour l'heure difficiles à vérifier. Leurs prédictions se produisent à des niveaux d'énergie tellement élevés, ou des échelles spatiales si réduites, que cela dépasse notre capacité à les tester avec la technologie actuelle"*, témoigne Roland Lehoucq.

# APPLIQUER





Le Super-Kamiokande, au Japon, produit des neutrinos et des antineutrinos spécifiques, grâce à un accélérateur géant de particules.

# La révolution est parmi nous

La première révolution quantique s'est penchée sur le comportement des électrons et des atomes. Avec pour résultat l'électronique moderne, les transistors, les circuits intégrés, les lasers et le GPS. PAR CHARLOTTE MAUGER

**Q**uand on évoque "technologie quantique", on pense aujourd'hui à l'ordinateur qui supplantera nos vieux supercalculateurs. Pourtant, nul besoin de regarder vers le futur pour mesurer l'impact de la mécanique quantique au quotidien. Ses applications sont déjà là : dans l'application GPS, quand on écrit un mail, ou quand on regarde un Blu-ray. *"Pour bien comprendre cette révolution technologique, il faut savoir que la physique elle-même a subi une révolution au début du xx<sup>e</sup> siècle"*, rappelle Alexandre Wang, chercheur à l'école d'ingénieur Esiea. En 1900, le physicien Max Planck trouve la fameuse loi qui portera son nom, et qui permet de décrire le rayonnement émis par un corps noir, un objet qui absorbe toute la lumière qu'il reçoit. *"Mais Einstein comprend qu'elle n'est pas compatible avec la physique classique et postule que la lumière est constituée de grains d'énergie"*, explique Gautier Depambour, chercheur en histoire des sciences au laboratoire Sphere.

*"Avant cette découverte, la lumière se comportait clairement comme une onde pour la majorité des physiciens"*, indique Pierre Fayet, chercheur au laboratoire de physique de l'École normale supérieure. Surtout que des expériences avaient montré

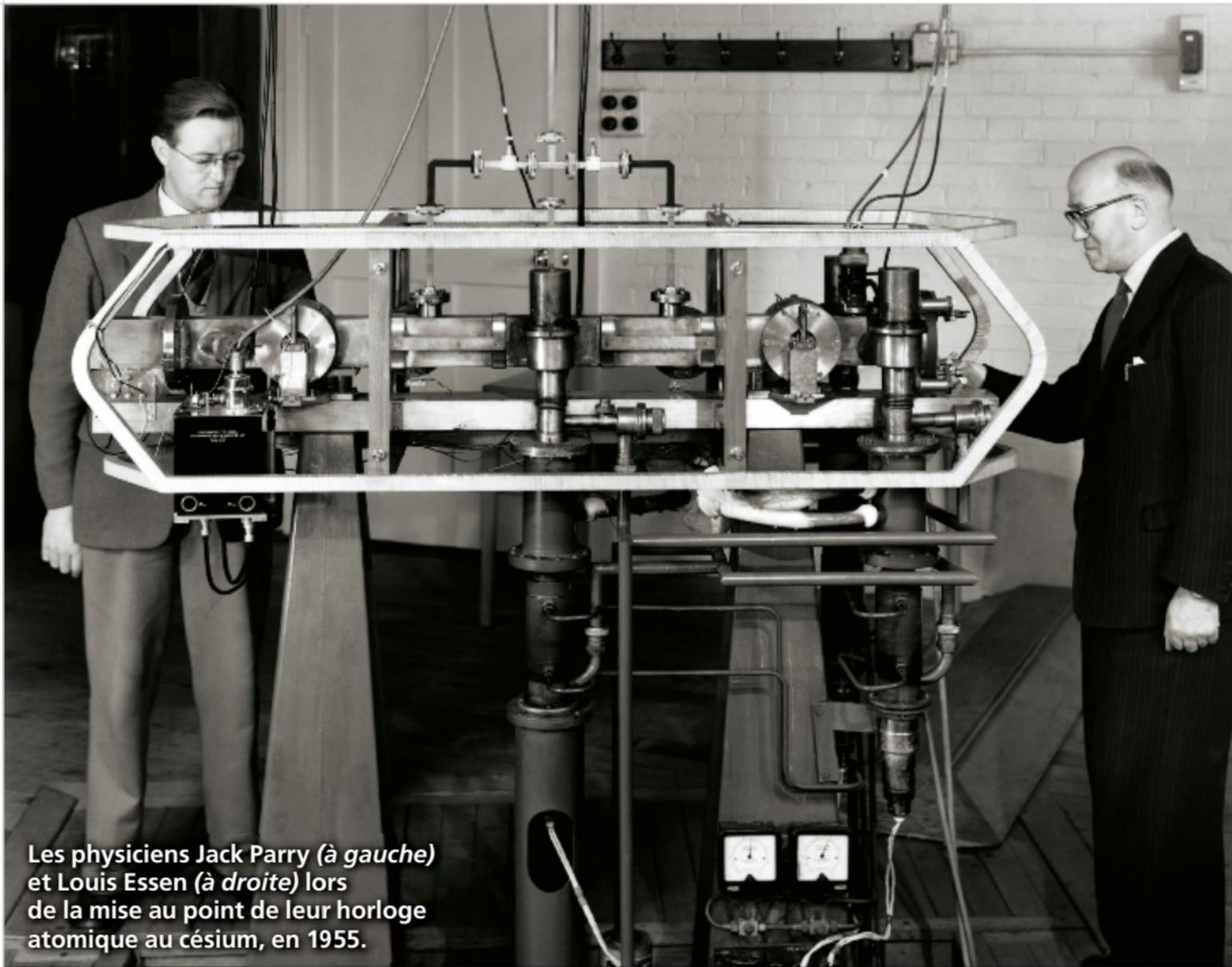
son comportement ondulatoire. Impossible, alors, d'imaginer que cette onde soit également faite de particules élémentaires, qui prendront le nom de photons. Pourtant, dans les années 1920, il faut se faire à l'idée : des expériences montrent un comportement corpusculaire de la lumière. Et Louis de Broglie, physicien français, montre que les particules de matière, tels les électrons, sont duales : elles se comportent comme une onde ou comme une particule selon les circonstances.

## LASER ET HORLOGE ATOMIQUE

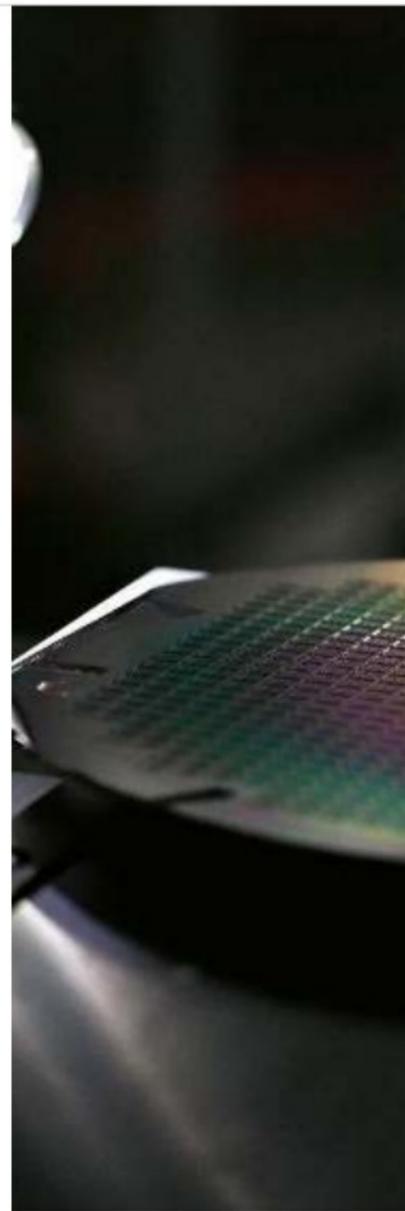
Mais la révolution ne s'arrête pas là. Avant les travaux de Niels Bohr, en 1913, les physiciens peinaient à comprendre la stabilité des atomes. *"Si on imagine des charges qui gravitent autour d'un noyau chargé, il est difficile de comprendre pourquoi l'électron ne s'écrase pas"*, présente Zaki Leghtas, chercheur à l'École des mines ParisTech PSL. Bohr propose alors un modèle dans lequel les électrons n'évoluent pas n'importe comment autour de l'atome, mais ne peuvent occuper que des étages, ou des niveaux d'énergie, bien définis. Ces progrès théoriques ne tardent pas à trouver des applications. Dans les années 1950 et 1960, l'horloge atomique puis le laser voient le jour. Chacun joue à sa manière avec la quantification des niveaux

En 1964, un chercheur de la Hughes Aircraft Company examine un laser expérimental, une technologie alors révolutionnaire, reposant sur le principe d'émission stimulée.





Les physiciens Jack Parry (à gauche) et Louis Essen (à droite) lors de la mise au point de leur horloge atomique au césium, en 1955.



d'énergie de l'atome. Le laser fonctionne sur le principe d'émission stimulée. La mécanique quantique indique qu'un électron d'un atome occupe un niveau d'énergie bien défini. Il est donc possible d'exciter l'atome quand l'électron passe à un niveau d'énergie plus haut. Quand celui-ci retourne dans son état fondamental, il recrache alors un photon.

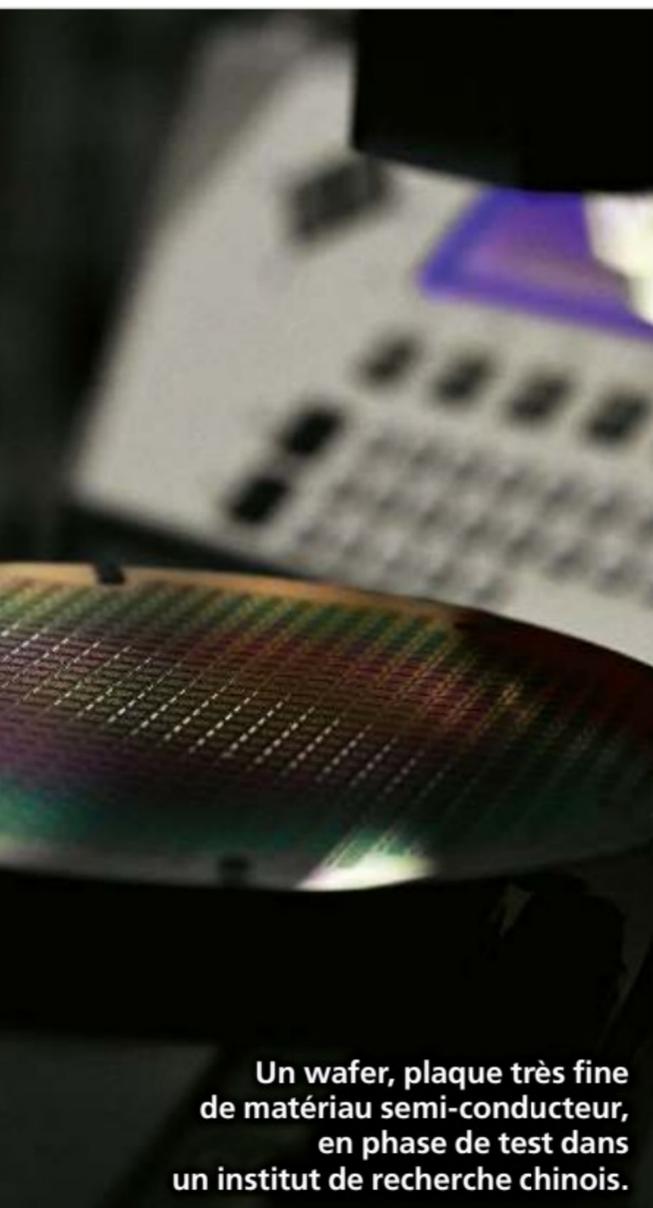
*“On peut amplifier ce principe en installant des miroirs : le photon fait des allers-retours entre les miroirs. Quand il est absorbé par un atome excité, ce dernier va émettre un autre photon. Plus il y a d'aller-retour et plus il y a de photons émis”,* décrit Alexandre Wang. Quand la quantité de lumière créée est suffisante, elle est émise sous la forme d'un rayon lumineux : un laser. Ils sont maintenant omniprésents : dans la lecture de disque, la fibre optique, l'impression 3D ou même le développement de certains ordinateurs quantiques !

L'horloge atomique elle aussi a trouvé sa place dans notre quotidien. Pour n'en citer que deux : la définition de la seconde et le GPS. *“Pour faire une horloge, il faut un phénomène qui se répète dans le temps de manière périodique”,* énonce Zaki Leghtas. Or, le passage d'un état d'énergie à un autre

d'un électron est l'un de ces phénomènes très réguliers qui, en plus, reste imperturbable – peu importe où l'atome est placé. Embarquées sur des satellites, les horloges atomiques permettent de synchroniser les signaux émis afin de déterminer la position d'un utilisateur.

### BANDE DE VALENCE

Autre champ d'application du modèle de Bohr : la matière condensée, *“une branche de la physique qui s'intéresse aux comportements non pas d'un atome, mais d'une collection d'atomes”,* décrit Guillaume Manzanares, enseignant-doctorant à l'université Grenoble-Alpes et à l'Esiee-IT. Dans un solide, comme dans un atome, les électrons ne peuvent prendre que des valeurs d'énergie précises, qui constituent ici des intervalles. Les deux principaux intervalles sont les bandes de valence et de conduction, séparées par une bande interdite qu'on appelle gap. Parfois le gap du matériau est très large, et les électrons ont alors beaucoup de difficultés à passer de la bande de valence vers la bande de conduction, même s'ils sont stimulés. Dans ce cas, le matériau est isolant ; dans l'autre cas, il est



Un wafer, plaque très fine de matériau semi-conducteur, en phase de test dans un institut de recherche chinois.



Les transistors, fruits de la révolution quantique, sont à la base du fonctionnement de nos téléphones portables.

“ Les applications de la première révolution quantique sont des objets qu'on peut manipuler sans connaissance de la physique. Ce n'est pas le cas pour la deuxième révolution ”

conducteur. Les matériaux semi-conducteurs se situent entre les deux. Quand les électrons ne sont pas stimulés par un courant électrique, ils occupent des niveaux d'énergie dont les plus élevés constituent la bande de valence. Si le matériau est excité, les électrons peuvent sauter la bande interdite et occuper la bande du dessus, la bande de conduction. Le passage de la bande de valence à la bande de conduction permet de créer une sorte d'interrupteur : quand le courant passe c'est un 1, quand il ne passe pas c'est un 0. “C'est la base de tous les dispositifs électroniques, car les transistors sont basés sur les semi-conducteurs”, appuie Guillaume Manzanares. Or, ces transistors sont au cœur des opérations logiques de nos ordinateurs, TV, téléphones... Ils ont révolutionné la manière de faire des calculs. Le début

de l'électronique se faisait avec des lampes, ce qui prenait énormément de place. Le transistor, à l'inverse, rend possible la miniaturisation des calculateurs, au point où les microprocesseurs ont aujourd'hui plus d'un milliard de transistors. Une question demeure : si on peut appliquer la physique quantique au quotidien, pourquoi l'ordinateur quantique résiste-t-il tant aux physiciens? “Les applications de la première révolution ont demandé de bien comprendre la mécanique quantique lors de leur création, mais une fois conçus, ce sont des objets qu'on peut manipuler sans connaissance de la physique. Ce n'est pas le cas pour la deuxième révolution”, explique Zaki Leghtas. Surtout quand celle-ci repose sur des principes contre-intuitifs, comme la superposition et l'intrication... ■

# LE TEMPS QUANTIQUE EST-IL UNIVERSEL ?

Dans le monde classique, celui des objets palpables, le temps s'écoule différemment selon que l'on est au repos ou en mouvement. Mais qu'en est-il dans un système quantique ?

PAR ÉVRARD-OUICEM ELJAOUHARI

**P**our Alexander Smith, physicien au Saint Anselm College et au Dartmouth College, aux États-Unis, un système quantique voit le temps s'écouler de manière différente selon la vitesse à laquelle il se déplace. Pour comprendre, revenons d'abord à la relativité restreinte. L'une des conclusions les plus étonnantes de cette théorie énoncée en 1905 par Albert Einstein est que notre conception du temps, telle qu'on se l'imagine depuis des siècles, est erronée. Il n'existe pas un seul et unique temps qui s'écoule pour tous et partout à la même vitesse. *"Le temps est en fait quelque chose de personnel, en ce sens que chacun possède sa propre horloge qui mesure ce que l'on appelle son temps propre, décrit Alexander Smith. Et ce temps propre s'écoule différemment selon la vitesse à laquelle on se déplace par rapport à quelqu'un d'autre."* Ce concept est illustré dans le paradoxe des jumeaux. Dans cette expérience de pensée, on considère des jumeaux, qui ont donc le même âge. L'un des deux entreprend un voyage spatial, à grande vitesse. À son retour sur Terre, l'horloge de son vaisseau indique qu'il a passé cinq ans dans l'espace. Mais quand il retrouve son frère, celui-ci l'attend depuis trente ans ! Résultat : les deux jumeaux n'ont plus le même âge. Celui qui s'est baladé dans l'espace est plus jeune. C'est ce que l'on appelle la dilatation du temps.

Qu'en est-il en mécanique quantique ? Dans le monde des particules, les lois physiques sont bien différentes de celles de la relativité d'Einstein. La superposition d'états, par exemple, est un phénomène purement quantique. Ici, un système peut être simultanément dans deux états différents, à l'image du chat de Schrödinger, à la fois vivant et mort. Et cette superposition est justement la clef trouvée par Alexander Smith et ses collègues pour démontrer l'existence d'une dilatation quantique du temps.

## ATOMES DE RUBIDIUM 87

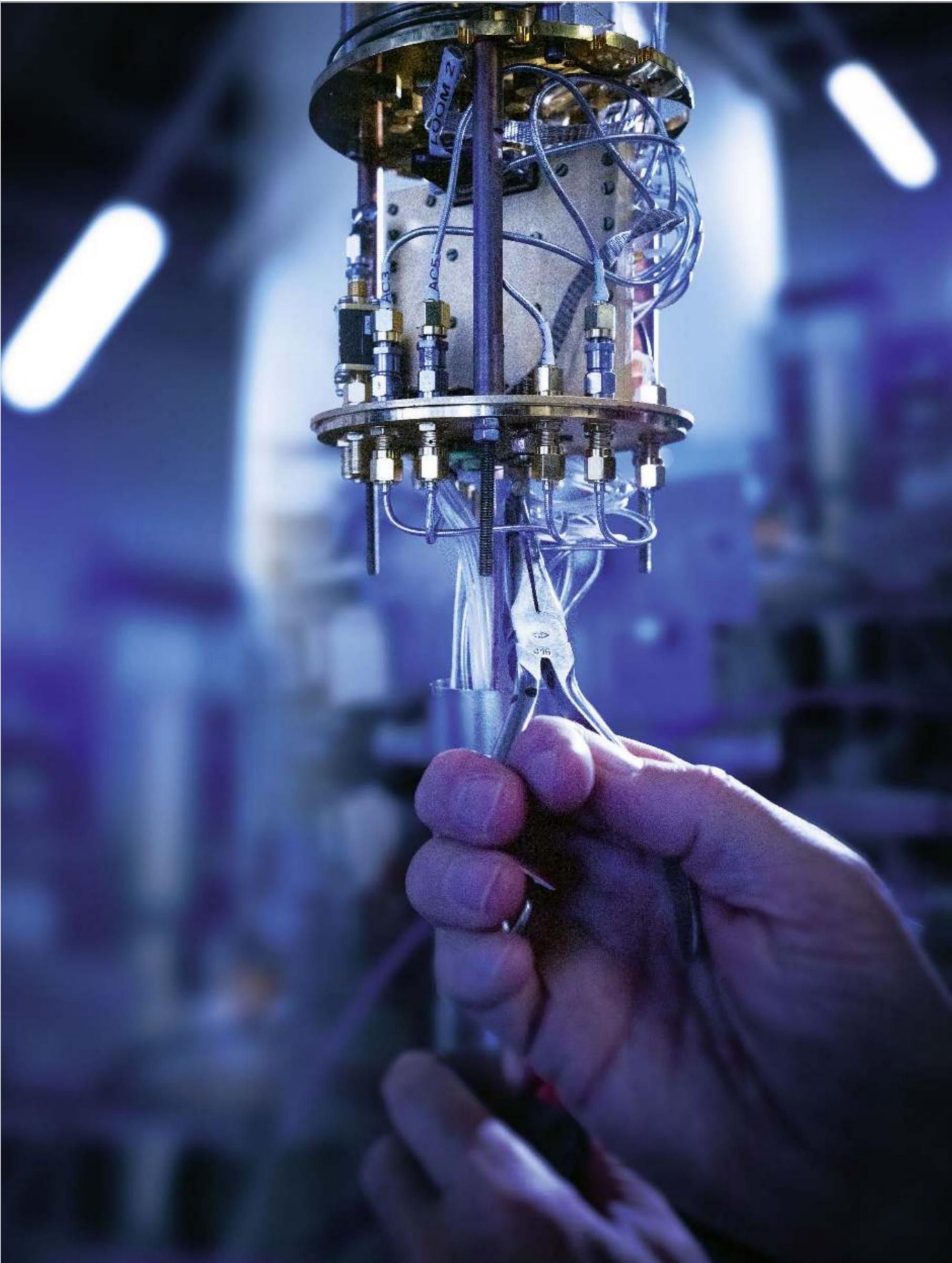
Pour ce faire, les chercheurs ont considéré des atomes de rubidium 87, qui sont des horloges atomiques : l'oscillation entre différents états de ces atomes bat la mesure et définit par la même occasion une unité de temps. *"On s'est demandé : qu'est-ce que l'on observerait si on plaçait de telles horloges dans une superposition de deux vitesses ?"*, rapporte le physicien. Comme si, pour le dire plus simplement, l'horloge avançait simultanément à deux vitesses différentes, à la manière d'une horloge de Schrödinger.

Plus précisément, les chercheurs ont étudié des atomes de rubidium 87 excités, c'est-à-dire

ayant une énergie supérieure à leur énergie minimale. Le temps que mettent ces atomes excités à revenir à leur énergie fondamentale est connu. La question était donc : ce temps est-il différent lorsque les atomes sont dans des états superposés de vitesse ? *“Et la réponse est oui, il y a bien une dilatation quantique du temps”*, assure Alexander Smith.

Pour l'heure, ces travaux sont purement théoriques. Mais les physiciens ont défini une expérience qui devrait permettre de vérifier que l'effet existe. *“Mettre les atomes en superposition de vitesse a déjà été fait, mais effectuer la mesure du temps de vie est complexe, révèle le scientifique. Je pense qu'on devrait y parvenir dans les dix ans.”* ■





# Dans l'intimité de l'ordinateur du futur

Les prouesses de l'ordinateur quantique fascinent la communauté scientifique, les industriels et même le grand public... Plongée dans les rouages microscopiques d'une technologie aussi complexe que prometteuse. PAR ÉVRARD-OUICEM ELJAOUHARI

L'ordinateur quantique promet de résoudre des problèmes hors de portée de nos ordinateurs classiques. Il pourrait ainsi accélérer les calculs complexes, notamment dans la cryptographie ou la simulation moléculaire, grâce à des principes de superposition et d'intrication quantiques. D'accord, mais comment une telle machine fonctionne-t-elle exactement ? La réponse dépend grandement de la brique technologique utilisée pour la construire : le qubit.

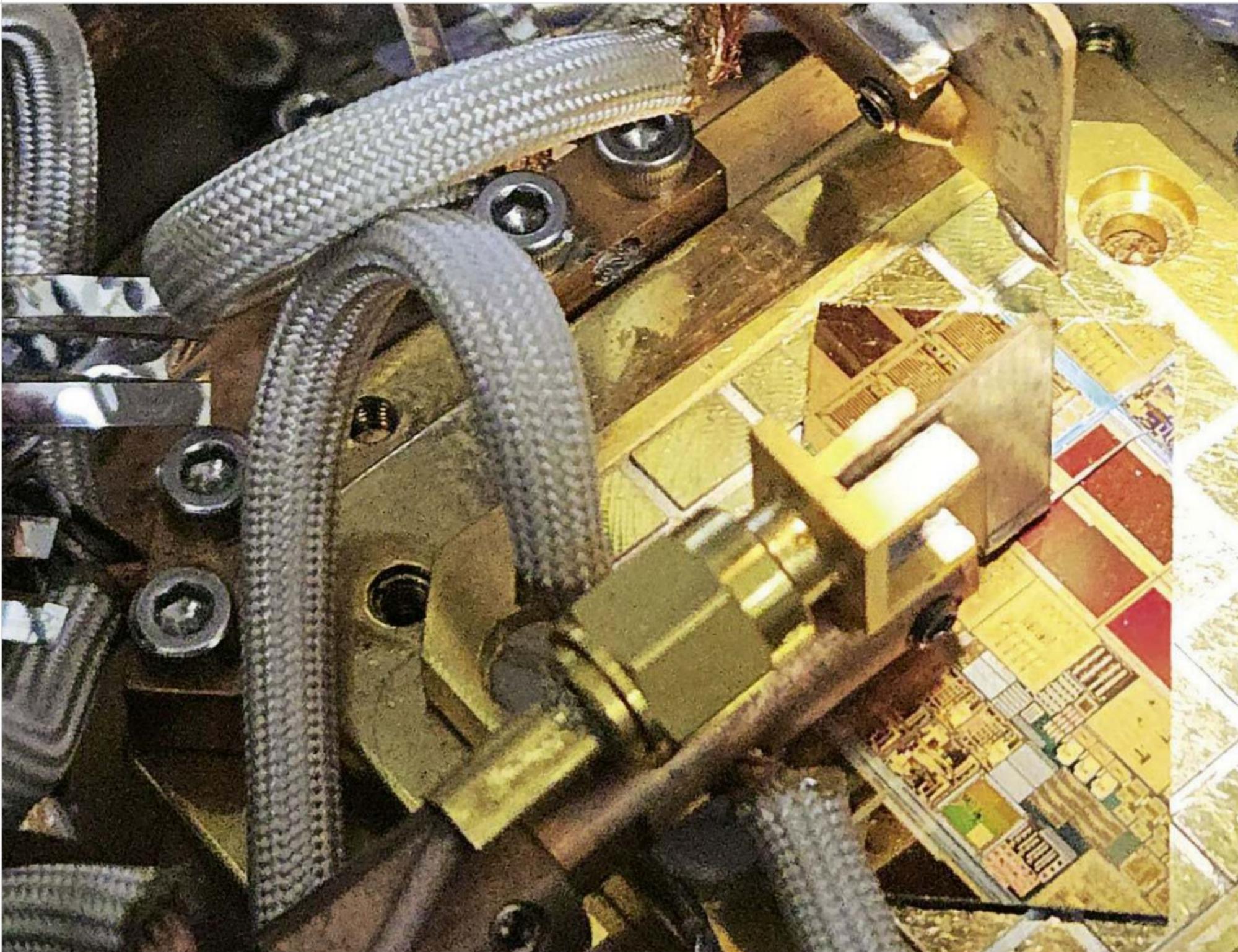
Petit rappel de connaissance : en informatique classique, un bit est une unité élémentaire d'information, qui peut avoir pour valeur 0 ou 1. Son équivalent quantique est le qubit. S'il peut valoir 0 ou 1, il peut également être dans un état superposé qui mélange ces deux valeurs. De plus, les qubits peuvent s'intriquer entre eux. Dans cet état lié, ils dépendent l'un de l'autre et ne peuvent plus être considérés indépendamment. C'est en couplant superposition et intrication et en faisant communiquer les qubits suivant une

série d'opérations (ou portes) prédéfinies qu'un calcul quantique est mené.

Pour plonger plus profondément dans l'ordinateur quantique, prenons l'exemple de celui qui fonctionne avec la technologie de qubits la plus utilisée, les qubits supraconducteurs, et sa variante la plus avancée, le transmon, utilisée par des géants comme Google et IBM. Ces circuits électriques d'environ  $1 \text{ mm}^2$  comprennent des îlots d'aluminium séparés par une jonction isolante à température ambiante, que les électrons associés en paire peuvent traverser à basse température. Un courant électrique oscillant traverse la jonction, et les fréquences de résonance sont séparées par des niveaux d'énergie différents. Le 0 et le 1 du qubit reposent sur les deux premiers niveaux d'énergie contrôlables de cet oscillateur.

Tout commence avec un supercalculateur : *"une partie du calcul est faite en amont sur un ordinateur classique"*, assure Olivier Ezratty, consultant sur les technologies quantiques. C'est également depuis un ordinateur

Les qubits supraconducteurs sont refroidis à très basse température, grâce à un réfrigérateur appelé cryostat.



**Les qubits à base de silicium peuvent être obtenus à partir de méthodes de fabrication similaires à celles pratiquées pour les ordinateurs classiques.**

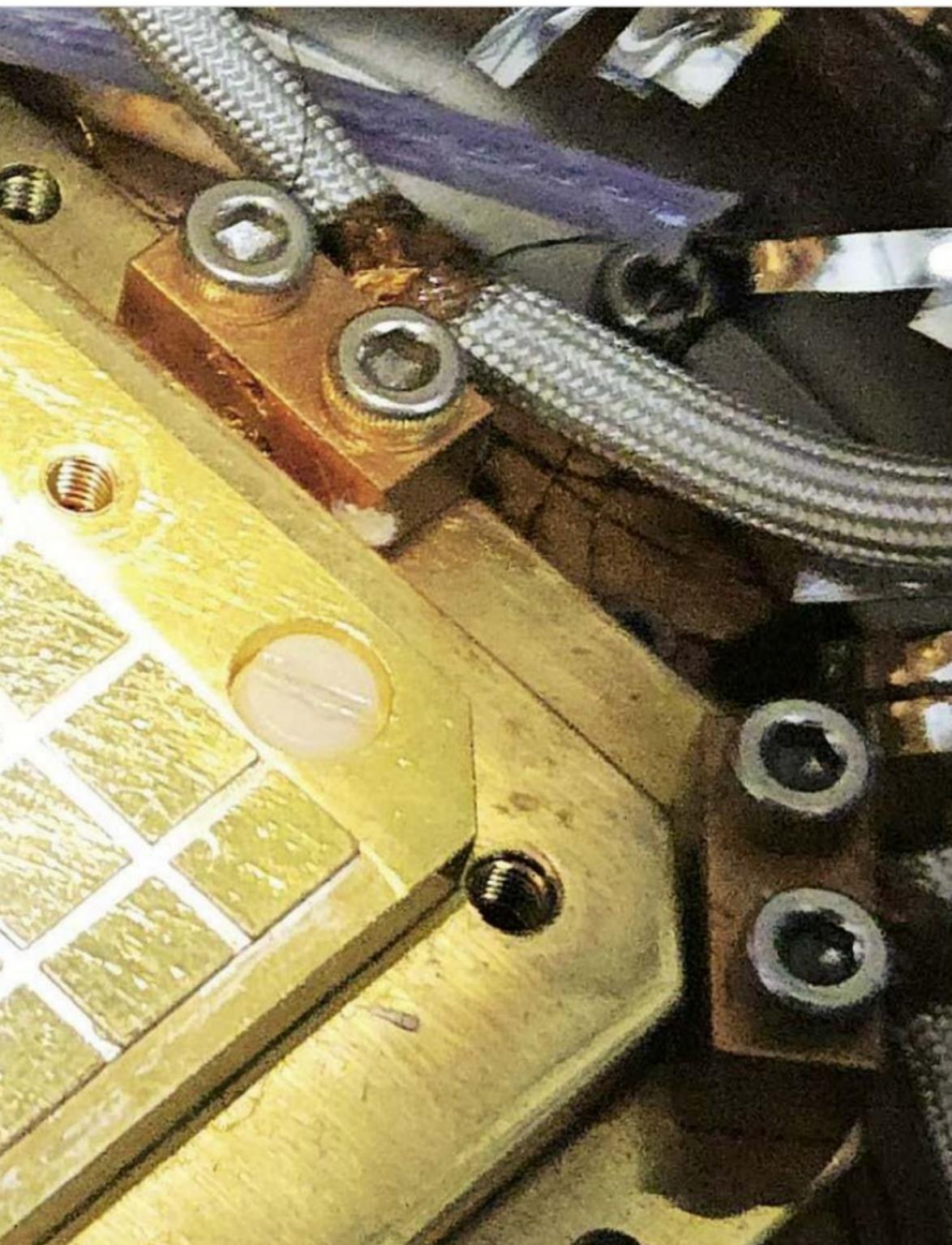
classique qu'est lancée une première instruction qui initialise les qubits, généralement à l'état 0. À la suite de cela, la salve d'instructions qui constituent l'algorithme quantique est lancée. Ces instructions sont d'abord traduites en micro-ondes, qui sont ensuite envoyées à travers des câbles qui pénètrent dans une grosse enceinte métallique. À l'intérieur de celle-ci, un cryostat à dilution (autrement dit : un réfrigérateur) d'environ 2 m de haut.

L'enceinte au sein de laquelle est fait le vide permet de protéger l'installation de l'extérieur. En effet, les états quantiques sont fragiles et la moindre perturbation les détruit. Le cryostat, lui, permet d'obtenir les températures extrêmement basses auxquelles opèrent les transmons. Pour ce faire, la température

descend par paliers : de haut en bas du réfrigérateur, les températures des étages sont successivement de 50 kelvins (K), 4 K, 1 K, 100 mK et 10 mK [pour passer de kelvins en degrés Celsius :  $^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,15$ , NDLR]. Pour ce faire, un mélange d'hélium 3 et d'hélium 4 circule dans le cryostat à l'état liquide (en bas) et gazeux (en haut).

### **LES QUBITS SE SUPERPOSENT**

Les câbles descendent jusqu'en bas du réfrigérateur et transmettent les signaux micro-ondes qui sont atténués au fur et à mesure. À la base du cryostat, une canette cylindrique – qui joue le rôle de bouclier supplémentaire – accueille le porte-échantillon qui intègre la puce contenant les qubits. En recevant les signaux, le calcul se déroule : les qubits se superposent, s'intriquent et interfèrent entre eux, de façon à faire ou non coïncider leurs amplitudes. À la fin du calcul, un



nouveau signal est envoyé depuis l'extérieur pour mesurer les qubits. Le résultat remonte alors le long des câbles où il est cette fois amplifié, puis il sort de l'enceinte et rejoint les instruments extérieurs où il est traité. Il peut alors être lu : une suite de 0 et 1. *“Le calcul est réalisé plusieurs fois, car le résultat*

*“ Le calcul est réalisé plusieurs fois, car le résultat obtenu est aléatoire. Le résultat définitif est une moyenne pondérée de tous les résultats obtenus ”*

*obtenu est aléatoire, précise Olivier Ezratty. Le résultat définitif est une moyenne pondérée de tous les résultats obtenus.”*

Autre variante de qubits supraconducteurs qui utilise les mêmes installations : les qubits de chat, choix de la start-up Alice & Bob. *“Ces qubits sont capables de supprimer presque entièrement une source d'erreur, le retournement de bit”*, décrit Jérémie Guillaud, physicien chez Alice & Bob. En effet, les qubits sont soumis à deux types d'erreurs : le retournement de bit, quand un 1 devient 0 ou inversement, et le retournement de phase. *“On ne corrige alors que cette dernière erreur, ce qui limite le nombre de qubits utilisés”*, poursuit-il. Ce qui annonce donc, in fine, la promesse de créer un ordinateur quantique à base de supraconducteurs moins cher qu'IBM et Google.

Autre option : les qubits à base de silicium, qui exploitent la superposition du spin d'un électron piégé, sont également refroidis, mais seulement autour de 100 mK. Leur avantage : ils peuvent être fabriqués à partir de plaques de silicium similaires à celles employées pour nos ordinateurs. C'est pourquoi la start-up Quobly, basée à Grenoble, a choisi cette voie : *“ils peuvent s'appuyer sur des processus de fabrication qui existent déjà dans la région”*, explique Olivier Ezratty. Ces qubits sont également plus petits, on peut donc en mettre davantage sur une puce.

### À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Les qubits photoniques, qui utilisent les particules de lumière, n'utilisent pas du tout la même architecture. Ici, pas de cryostat de 2 m suspendu dans une enceinte sous vide. Une partie du dispositif est refroidie – celle qui génère et détecte les photons, à environ 2 K –, mais le reste fonctionne à température ambiante. *“Les photons sont ensuite encodés en chemin et sont manipulés dans des circuits nanophotoniques et des fibres optiques”*, décrit Valérian Giesz, cofondateur de Quandela, qui développe un ordinateur quantique à qubits photoniques.

Fonctionnant également à température ambiante, les qubits à ions piégés correspondent au niveau d'énergie d'ions, souvent de l'ytterbium et du baryum. Ces ions sont



piégés dans une enceinte sous vide et sont maintenus grâce à des champs électriques. Tous les qubits d'un piège peuvent être intriqués les uns aux autres grâce à des lasers ou des micro-ondes. Aujourd'hui, pas plus d'une cinquantaine de qubits sont contrôlés dans un piège. Pour espérer utiliser la technologie pour des calculs quantiques, une disposition bidimensionnelle des qubits est attendue.

### UNE SEULE COUCHE D'ATOMES

La start-up C12 a pour sa part fait le pari de piéger des électrons dans des nanotubes de carbone – et c'est la seule au monde dans ce cas. "Ces tubes sont plus fins qu'un cheveu, ils ne font pas plus de 3 nm de diamètre", rapporte Matthieu Desjardins, cofondateur de C12.

**La start-up française Quandela, basée à Massy, développe un ordinateur quantique à qubits photoniques, lesquels opèrent grâce aux particules de lumière.**

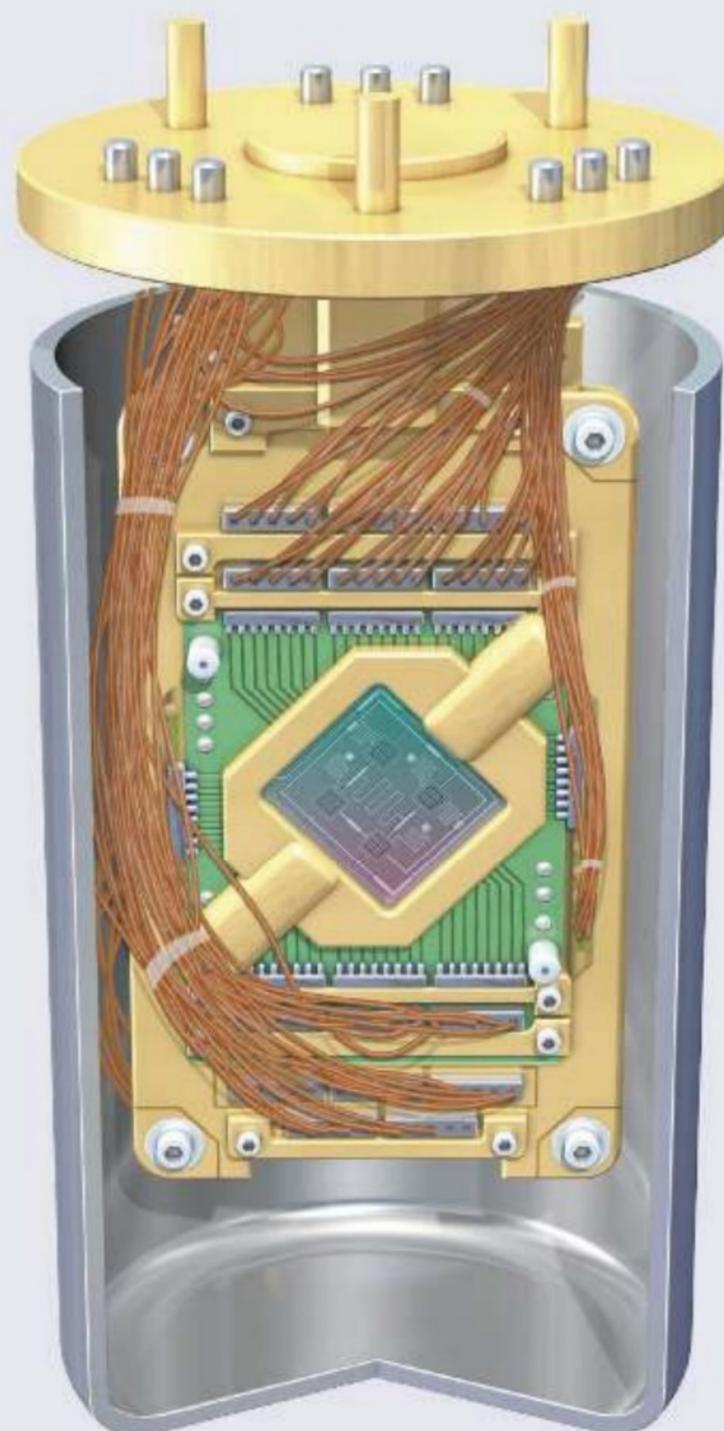
La paroi du tube est en fait constituée d'une seule couche d'atomes de carbone, et sa structure est extrêmement pure : les tubes sont construits atome par atome, et uniquement avec des isotopes de carbone 12, constitués de 6 protons et 6 neutrons. Pour disposer ces tubes sur les puces, les équipes de C12 ont construit une machinerie faite de robots capables de déplacements nanométriques. "Une fois qu'on a ce tube connecté à la puce, on peut piéger un électron en son sein", poursuit Matthieu Desjardins. Le qubit est ensuite encodé dans l'orientation de ce spin. Ainsi protégé par le nanotube, le qubit a un

*“ En étant jusqu'à 1 000 fois plus grand que l'atome normal, un atome de Rydberg englobe un atome voisin, ce qui permet d'intriquer ces deux qubits entre eux ”*

temps de stabilité plus long. En contrepartie, son contrôle par des impulsions micro-ondes est plus compliqué. Aujourd'hui, la start-up a été capable de réaliser des opérations entre deux qubits proches. *“L'objectif est de réaliser cette opération entre deux qubits qui ne soient pas forcément voisins, c'est la clef pour passer à l'échelle supérieure.”*

Une autre technologie prometteuse est celle des atomes froids. Pour la comprendre, il faut décrire un atome. Ce dernier est constitué d'un noyau et, autour, d'un nuage d'électrons, dont le nombre dépend de l'élément chimique. Ainsi, l'hydrogène a un électron, l'hélium deux, etc. Ces électrons ne sont pas à n'importe quelle distance du noyau. Ils occupent des couches ( $n$ ) bien définies. Les premiers électrons occupent la couche  $n=1$ , les suivants la couche  $n=2$ , et ainsi de suite. Un atome est dit de Rydberg lorsqu'un électron de la dernière couche est repoussé sur une couche très éloignée, *“généralement aux alentours de  $n=50$ ”*, rapporte Olivier Ezratty. L'électron ne se retrouve pas naturellement sur cette couche, mais il y est placé grâce à des lasers. *“En étant jusqu'à 1 000 fois plus grand que l'atome normal, un atome de Rydberg englobe un atome voisin, ce qui permet d'intriquer ces deux qubits entre eux.”* C'est le choix de qubit de la start-up Pasqal qui, en 2024, est ainsi parvenu à piéger plus de 1 000 atomes – une prouesse !

Crystal Quantum Computing (CQC), enfin, a opté pour les ions piégés de Rydberg. L'idée ici n'est plus de placer des atomes dans un état de Rydberg, mais des ions – c'est-à-dire des atomes auxquels un électron a été enlevé. Comme pour les atomes de Rydberg, les ions sont d'abord rendus quasi immobiles (ici, grâce à des infrarouges). Puis des faisceaux ultraviolets permettent de repousser l'électron sur une couche  $n$  élevée. *“Un ion de Rydberg a une taille d'environ 200 nm, alors que la taille typique d'un atome est de 0,1 nm”*, compare Quentin Bodart, fondateur de CQC. L'avantage des ions piégés de Rydberg : leur temps de vie. *“L'intrication entre deux qubits dure jusqu'à 700 ns, contre 100  $\mu$ s pour de simples ions piégés.”* Mais pour le moment, cela a un coût : *“Le taux d'erreur est plus grand, avoue Quentin Bodart. On a 20 % d'erreurs. On vise 0,2 % d'ici à 2028.”* ■



## UN DOUBLE BOUCLIER

Ce cylindre métallique de quelques centimètres de haut est appelé une canette. Située à la base des cryostats, on y insère un porte-échantillon contenant le processeur et ses qubits. Au bas du cryostat, la température peut descendre aussi bas que 10 mK : c'est à cette température seulement que peuvent opérer les qubits supraconducteurs. Pour les qubits de silicium, le refroidissement est moindre, mais descend tout de même jusqu'à 100 mK. La canette, elle, joue le rôle de bouclier magnétique,

puisque'elle absorbe le champ magnétique terrestre produit par certains des composants du cryostat. Cette double protection thermique et magnétique permet aux qubits de maintenir leur état quantique pendant un temps suffisant pour pouvoir effectuer les opérations souhaitées. Pour cela, les qubits d'une même puce interfèrent de façon à faire coïncider leurs amplitudes – ce qui les renforce – ou, au contraire, à les opposer – ce qui les annihile. Ce sont les algorithmes quantiques qui jouent avec ces interférences.



Le projet Cryonext du CEA et du CNRS développe des réfrigérateurs à dilution avancés (photo) qui permettent d'isoler la puce de l'ordinateur quantique de son environnement afin de maîtriser les propriétés quantiques de la matière.

# LES FRANÇAIS DANS LA COURSE

L'État et les start-up investissent dans l'ordinateur quantique universel pour ne pas se laisser distancer par leurs concurrents. PAR ÉVRARD-OUICEM ELJAOUHARI

**E**n janvier 2021, Emmanuel Macron annonçait le lancement du Plan quantique, une initiative à 1,8 milliard d'euros étalés sur cinq ans, qui vise à développer les technologies quantiques. *“L'essentiel des financements couvre la recherche fondamentale et appliquée au calcul quantique”*, décrypte Olivier Ezratty, consultant sur les technologies quantiques. L'une des initiatives les plus significatives est le PEPR Quantique [Programme et équipements prioritaires de recherche, NDLR], lancé en 2022. Doté de 150 millions d'euros et copiloté par le CNRS, le CEA et l'Inria, il couvre une dizaine de projets de recherche sur les technologies, les logiciels et les communications quantiques. En parallèle, l'initiative HOI (72 millions d'euros), pilotée par le Grand Équipement national de calcul intensif (Genci) et le CEA, met en place une infrastructure de calcul hybride associant supercalculateurs classiques et calculateurs quantiques. *“Tous les algorithmes quantiques sont en fait hybrides”*, précise l'expert.

*“Les financements du plan couvrent aussi la cryptographie, les capteurs quantiques et les technologies habilitantes comme les lasers, l'électronique de contrôle et la cryogénie”*, liste Olivier Ezratty. À l'instar du projet Cryonext (35 millions d'euros) qui vise à accroître l'indépendance de la France sur le plan de la cryogénie. Un volet formation existe également avec

QuantEdu (65 millions d'euros), qui regroupe 21 universités françaises. Mais qu'advient-il à partir de 2025?

### UN EFFORT QUI VA SE PROLONGER

*“Le lancement du projet ProqCima montre une envie de poursuivre l'effort”*, souligne Olivier Ezratty. Sous la houlette du ministère des Armées, ce projet pousse au développement d'un ordinateur quantique à 128 qubits logiques d'ici à 2032, et à 2048 qubits en 2035. Pour l'heure, cinq start-up françaises ont été sélectionnées, deux seront retenues à la fin. Pour financer ProqCima, 500 millions d'euros sont mis sur la table, dont 50 millions d'euros issus du Plan quantique. *“Le reste sera distribué sur douze ans, et implique donc les gouvernements futurs afin de poursuivre l'action dans le temps”*, commente l'ingénieur. Côté start-up, les créations françaises pleuvent depuis 2017, en misant sur des technologies différentes. Quandela et ses qubits photoniques a déjà fourni un ordinateur à 2 qubits à OVHcloud et propose de se faire la main sur un ordinateur quantique accessible en ligne (Perceval). En 2024, la jeune pousse a même remporté l'appel d'offres européen EuroHPC pour fournir en 2025 un ordinateur quantique au CEA de Bruyères-le-Châtel. Pasqal, fondée en 2019, travaille pour sa part sur les qubits à atomes neutres. Elle a fourni un de ses ordinateurs au Genci. En 2020, deux autres challengers entrent dans la course. Alice & Bob, qui développe un ordinateur à qubits de chats [qubit dont on a corrigé les erreurs, NDLR] et met à disposition sur le cloud son processeur doté d'une puce Boson 4. Et C12, qui a ouvert au cœur de Paris son Quantum Fab, où elle développe des qubits à ions dans des nanotubes de carbone. En 2021, est née Crystal Quantum Computing, qui capitalise sur des ions piégés de Rydberg. Enfin, Quobly, la start-up grenobloise issue du CEA et du CNRS, développe des qubits à base de spins d'électrons sur silicium. Un foisonnement de technologies ! ■

## ET AILLEURS?

D'un point de vue européen, les financements alloués par le Plan quantique placent la France entre deux eaux. *“L'Allemagne, les Pays-Bas et l'Angleterre ont mis plus d'argent en regard de leur PIB, mais la France en a mis plus que les nations nordiques et du Sud”*, rapporte Olivier Ezratty. Dans les autres pays, comme aux États-Unis, de grandes entreprises sont dans la course, au nombre desquelles les mastodontes de la Tech que sont Google et IBM. Amazon n'est pas en reste et table sur les qubits de chat, comme la start-up française Alice & Bob. Les entreprises chinoises sont également de la partie: Alibaba, l'Amazon chinois, développe un ordinateur quantique au fluxonium, un type de qubit supraconducteur.

# Médecine

# La deuxième vague

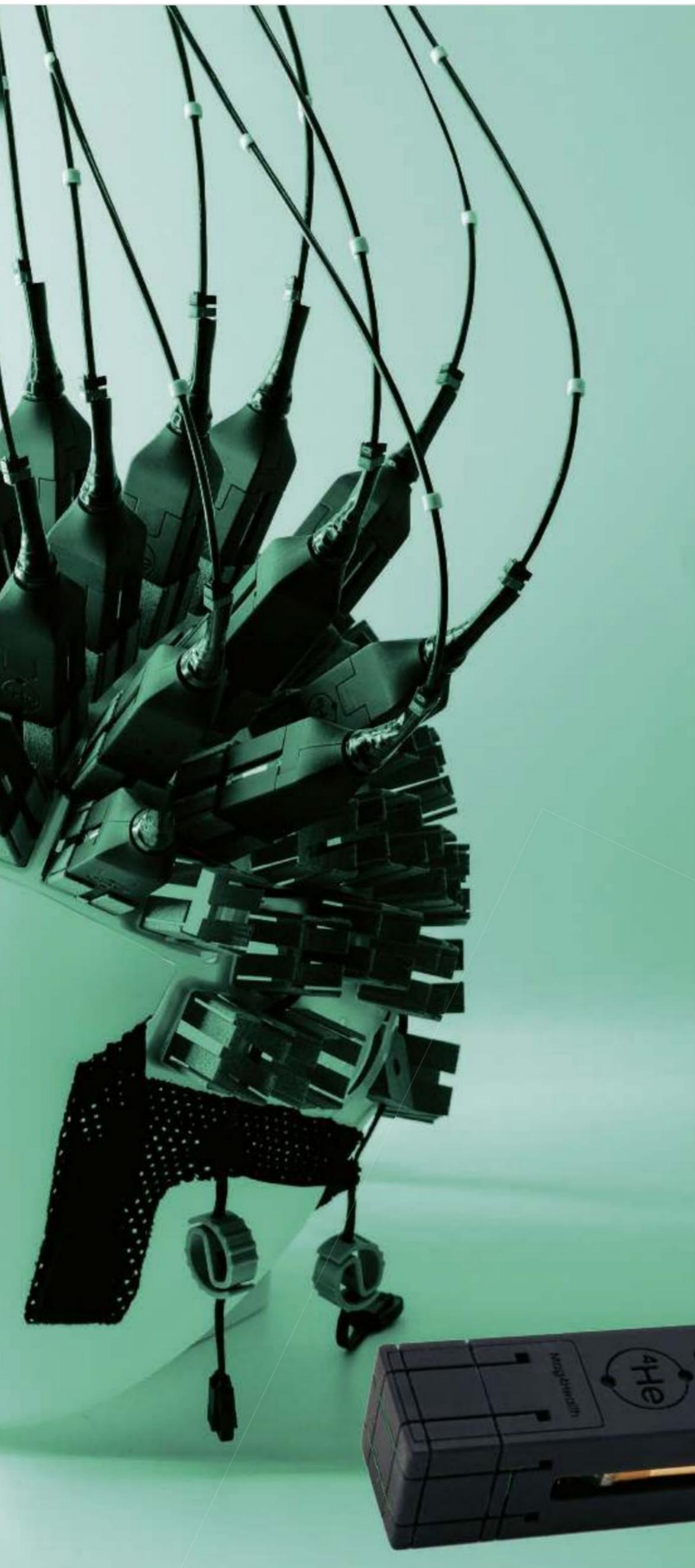
Magnétoencéphalographie, microscopie, simulation de nouveaux médicaments... Une nouvelle génération d'instruments quantiques multiplie les promesses en clinique. PAR FRANÇOIS MALLORDY

**S**canners, lasers, IRM... Au cours des dernières décennies, la première révolution quantique a apporté à la santé tout un lot de technologies. Or, depuis une vingtaine d'années, une "deuxième révolution quantique" est en cours, selon le terme inventé en 2003 par les physiciens Jonathan Dowling et Gerard Milburn. *"Pendant la première révolution, expliquent-ils, on utilisait la mécanique quantique pour comprendre le monde tel qu'il existait. [...] Dans la seconde révolution, on utilise la mécanique pour altérer la face quantique de notre monde [...] suivant nos objectifs."*

Il s'agit cette fois de plonger des systèmes uniques (un atome, un électron, un photon), pouvant adopter simultanément deux états, dans un état artificiellement prolongé de cohérence ou d'intrication quantique. Un tel système peut être utilisé de deux manières : soit comme l'unité de base informationnelle d'un ordinateur quantique, ou qubit, soit comme un capteur de grandeurs physiques de son microenvironnement – étant donné sa grande sensibilité aux

## VISION 3D

Mis au point par la start-up MAG4Health, ce dispositif OPM MEG est un magnétoencéphalographe : il peut enregistrer l'activité électrique du cerveau d'un patient en temps réel et en 3D, grâce à des capteurs quantiques, ici des magnétomètres à pompage optique (à droite).



perturbations extérieures. En témoigne la magnétoencéphalographie (ou MEG). Cette technique consiste à enregistrer en temps réel l'activité électrique du cerveau grâce à un casque bardé de magnétomètres quantiques appelés Squid (pour Superconducting Quantum Interference Device). Les Squid sont des capteurs capables de mesurer les plus faibles champs magnétiques ( $10^{-14}$  teslas, soit cent fois moins que le champ magnétique d'un neurone). Ils reposent sur la quantification du courant qui apparaît par effet tunnel entre deux matériaux supraconducteurs séparés par une fine couche isolante – un système appelé “jonction Josephson”.

### UN MATÉRIEL TRÈS COÛTEUX

*“Aujourd’hui, on comprend peu les maladies neuronales. Pour les étudier, l’imagerie par résonance magnétique (IRM) fonctionnelle cérébrale fournit des images sans raffinement temporel, tandis que l’électroencéphalographie enregistre l’activité neuronale électrique sans la localiser. Avec la MEG, on a accès à un film en 3D de l’activité neuronale”,* résume Matthieu Le Prado, directeur de MAG4Health, start-up développant une nouvelle génération de MEG.

Apparaissant dès les années 1970, la MEG à Squid permet donc d'affiner la compréhension et le diagnostic des maladies neurologiques. Toutefois, deux bémols entravent l'avenir des Squid : ces capteurs quantiques de première génération nécessitent d'être maintenus à une température cryogénique de  $-269,15^{\circ}\text{C}$ , et leur extrême sensibilité demande au patient de rester immobile, dans une chambre blindée isolée des champs magnétiques extérieurs. Résultat ? *“Pour une première installation, le budget d’un MEG à Squid est de 3 millions d’euros”,* indique Matthieu Le Prado. Des difficultés matérielles auxquelles pourrait répondre une

## “ La simulation chimique est un peu le graal susceptible de révolutionner la médecine ”

nouvelle génération de capteurs quantiques : les magnétomètres à pompage optique (ou OPM), et les centres azote-lacune (ou centres NV). “Ces technologies correspondent à différentes façons de réaliser des qubits”, résume Mathieu Munsch, PDG de Qnami, une start-up développant de nouvelles technologies quantiques à base de centres NV. “Dans les Squid, le système quantique est une jonction Josephson ; dans les centres NV, c’est une molécule d’azote dans une matrice de diamant. Dans les OPM, c’est un atome ou un ensemble d’atomes. Centres NV et OPM ne nécessitent pas d’environnement cryogénique”, souligne-t-il – un atout majeur pour faire émerger de nouvelles applications cliniques aux capteurs quantiques, ou encore pour simplifier l’usage de la MEG.

### DES PROMESSES BIEN RÉELLES

Ainsi, MAG4Health travaille à faire certifier une MEG à capteurs OPM à usage clinique : “Nous sommes impliqués dans des essais avec des hôpitaux académiques, affirme Matthieu Le Prado. Notre MEG se fait encore dans un environnement blindé, mais l’utilisation de capteurs OPM permet de s’affranchir de la cryogénie, de réduire le poids des chambres blindées de 10 tonnes à 2 tonnes, et d’appliquer les capteurs sur des patients à petite tête où en mouvement.” Les centres NV, plus robustes que les OPM, pourraient même faire sortir la MEG des chambres blindées. La biologie médicale attend beaucoup d’eux : “Des microscopes les utilisant comme capteurs sont utilisés en recherche préclinique pour faire du diagnostic de haute précision et détecter des biomarqueurs”, révèle Mathieu Munsch. À terme, les capteurs quantiques pourraient même servir à suivre notre état de santé hors

des structures hospitalières, en direct : “Des capteurs quantiques intégrés dans les voitures pourraient suivre nos constantes vitales”, avance Mathieu Munsch. Une application toutefois encore loin des consommateurs, vu le coût élevé des systèmes quantiques.

Enfin, la deuxième révolution quantique devrait bientôt impacter la médecine via un outil particulièrement prometteur : l’ordinateur quantique. Il devrait permettre d’exploiter des algorithmes quantiques, qui appartiennent à trois catégories en santé : les algorithmes de simulation chimique (représenter par un modèle mathématique la structure qu’une molécule doit avoir pour interagir avec un récepteur donné, par exemple, modéliser de meilleurs candidats médicaments dans l’industrie pharmaceutique), les algorithmes d’apprentissage machine (mieux prédire le risque de contracter une maladie), et les algorithmes d’optimisation (par exemple, optimiser le recrutement de patients lors d’essais cliniques). “La simulation chimique est un peu le graal qui pourrait révolutionner la médecine, mais c’est un objectif à long terme qui ne sera probablement pas accessible avant la prochaine décennie”, indique Frederik Flöther, responsable quantique en chef à QuantumBasel, une entreprise suisse spécialisée dans le développement d’algorithmes quantiques et la mise à disposition de systèmes quantiques. En attendant, des utilisations de l’ordinateur quantique plus proches du marché, car plus faciles à implémenter, sont à l’étude, comme la classification d’images médicales ou l’optimisation de certains traitements. “Nous ne sommes pas encore à l’ère de l’ordinateur quantique grand public. Mais nous arrivons à un point où, pour certaines applications en santé, l’approche quantique est compétitive avec l’approche classique”, s’enthousiasme Frederik Flöther. ■

“ Des capteurs quantiques intégrés dans les voitures pourraient suivre nos constantes vitales ”

## Le smartphone qui vous simplifie la vie et qui allie confort et simplicité !

Ce nouveau smartphone Ordissimo a été créé pour vous permettre de **rester en contact le plus facilement possible avec vos proches**. Téléphoner, envoyer un message, lire vos courriers électroniques ou encore accéder à internet... **tout est écrit clairement et distinctement avec de gros caractères pour être parfaitement lisible** depuis l'écran tactile. Son interface simple vous permet d'accéder en un minimum de clics à toutes les fonctionnalités. Avec ses 2 caméras intégrées, **réalisez de superbes photos et vidéos**, et profitez de son GPS intégré pour vos itinéraires. La marque Ordissimo propose des produits informatiques et de téléphonie spécialement étudiés pour les personnes qui ne sont pas à l'aise avec les technologies compliquées. **Ce smartphone fait rimer qualité et facilité d'utilisation !**



LE SMARTPHONE  
**ordissimo**  
**189€** seulement

Envoi en  
**COLISSIMO**

### CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES :

- Écran 5,45" soit 13,84 cm (diagonale)
- IPS HD+ 720 x 1440 px
- Processeur Quadcore MT8766B
- Mémoire interne 32 Go (extensible SD128)
- Mémoire vive 3 Go
- Interface Ordissimo simple et efficace
- Android 13
- 4G, 3G et 2G GSM, Wi-Fi 802.11 ac
- Bluetooth 5.0
- Compatible tout opérateur 2 x Nano SIM
- 1 port USB-C, 1 x 3,5 mm
- Appareil photo: 5Mpx avant, 8 Mpx dos
- DAS Corps: 1.367 W/kg Tête: 1.887 W/kg
- Batterie 2500 mAh 5V 1A
- 149,7 x 10,6 x 71,5 mm
- Poids 154 grammes
- Garantie 2 ans



Scannez-moi

Photos non contractuelles

En vente sur [www.kiosquemag.com/boutique](http://www.kiosquemag.com/boutique) ou par téléphone au **01 46 48 48 03** (prix d'un appel local) du lundi au samedi - paiement en CB uniquement ou en renvoyant le coupon ci-dessous.

**BON DE COMMANDE** à retourner sous enveloppe affranchie à Boutique Science&Vie - 59898 Lille Cedex 9

JE COMMANDE	Réf.	Qté	Prix	Total
SMARTPHONE ORDISSIMO	431288		189€	
FRAIS DE PORT EN COLISSIMO Livraison 10 jours après enregistrement de ma commande.				+10€
MONTANT TOTAL DE MA COMMANDE				

Je règle par chèque ci-joint à l'ordre de Science&Vie

Vous souhaitez régler par carte bancaire ?  
Rendez-vous sur [www.kiosquemag.com](http://www.kiosquemag.com)  
c'est rapide, simple et 100% sécurisé !



Offre valable France Métropolitaine valable jusqu'au 30/06/2025 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 REWORLD 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, de rectification, d'effacement de vos données ainsi que d'un droit d'opposition en écrivant à RMM-DPD, c/o service juridique, 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux, ou par mail à [dpd@reworldmedia.com](mailto:dpd@reworldmedia.com). Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - [www.cnil.fr](http://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](http://www.kiosquemag.com)

MES COORDONNÉES (\* A remplir obligatoirement)

# M091 # V 1659150

Nom\*

Prénom\*

Adresse\*

Code Postal\*

Ville\*

E-mail (Votre adresse e-mail ne sera pas communiquée à des partenaires extérieurs à des fins commerciales)

Téléphone portable de préf.

< INDISPENSABLE  
POUR LA LIVRAISON

Date anniversaire

(Pour fêter votre anniversaire)

Je ne souhaite pas recevoir les offres Privilège 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 !



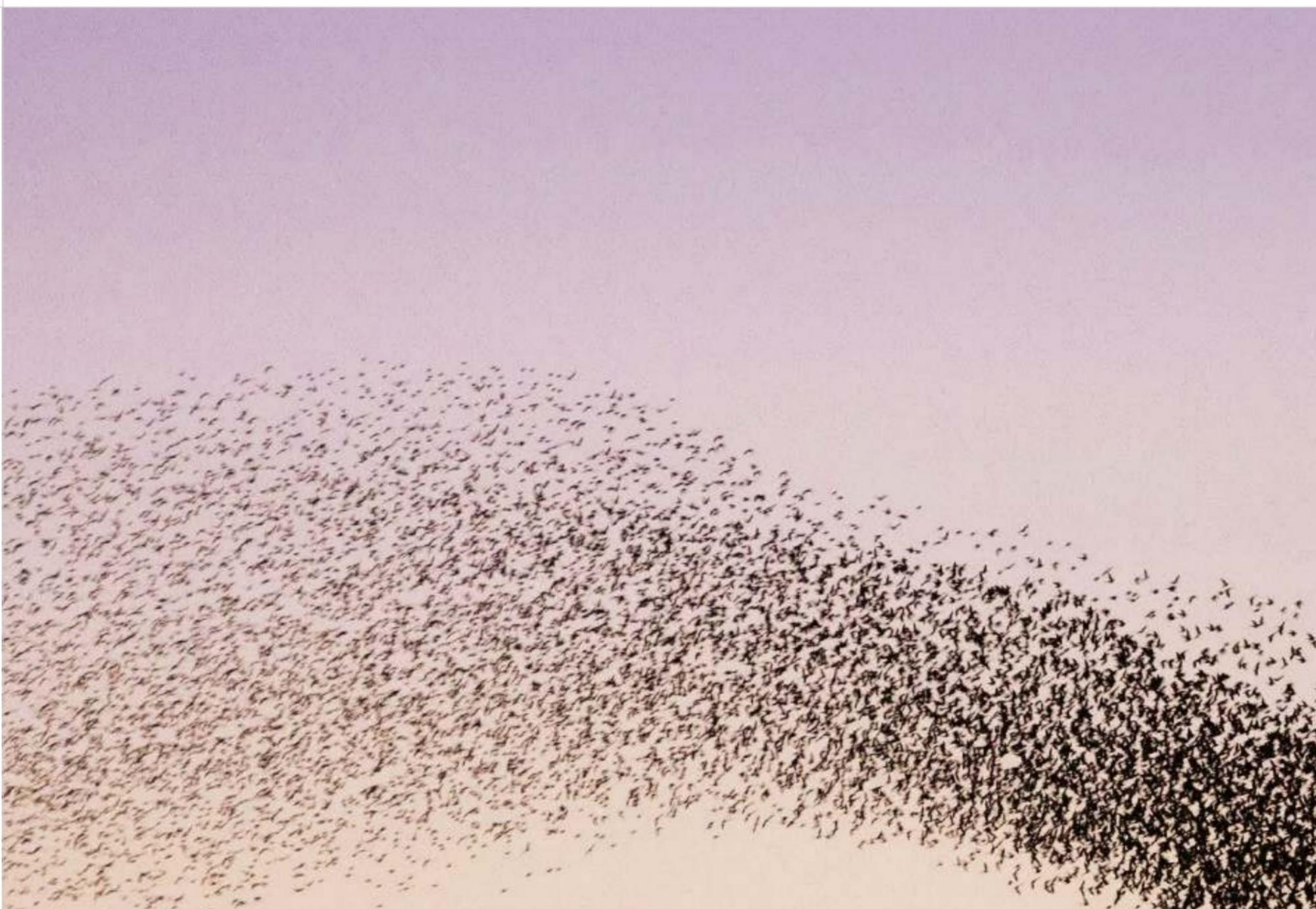
Cet emblème garantit notre adhésion à la fédération du e-commerce et de la vente à distance et à ses codes de déontologie fondés sur le respect du client.



# S'INTERROGER

Selon certains scientifiques, la magnétoréception des oiseaux migrateurs (ici, un pélican frisé) aurait une origine quantique impliquant une protéine de la rétine appelée cryptochrome.





# La biologie quantique existe-t-elle ?

De la photosynthèse au compas magnétique des oiseaux migrateurs, cette discipline controversée veut expliquer certains phénomènes du vivant par la mécanique quantique. Mais de la théorie à la validation expérimentale, il y a un fossé !

PAR FRANÇOIS MALLORDY



**C**omment expliquer l'efficacité de la photosynthèse à capter l'énergie lumineuse ? De quelle manière les oiseaux migrateurs perçoivent-ils le champ magnétique terrestre en vol ? D'où viennent les mutations de l'ADN ? Autant de questions traitées par la biologie quantique, jeune champ de recherche interdisciplinaire regroupant pêle-mêle physiciens, biologistes, chimistes et mathématiciens. Le terme de "biologie quantique" a de quoi surprendre : serait-ce

une hérésie ? Les scientifiques s'accordent tous à reconnaître le comportement quantique de la matière à l'échelle atomique, mais les phénomènes biologiques à une échelle plus grande – dite macroscopique – relèvent a priori de la mécanique classique. C'est cet a priori que questionne la biologie quantique : *"Il s'agit de déterminer si des mécanismes biologiques exploitent des effets quantiques non triviaux"*, résume Michael Thorwart, professeur à l'Institut de physique théorique de l'université de Hambourg (Allemagne). Par

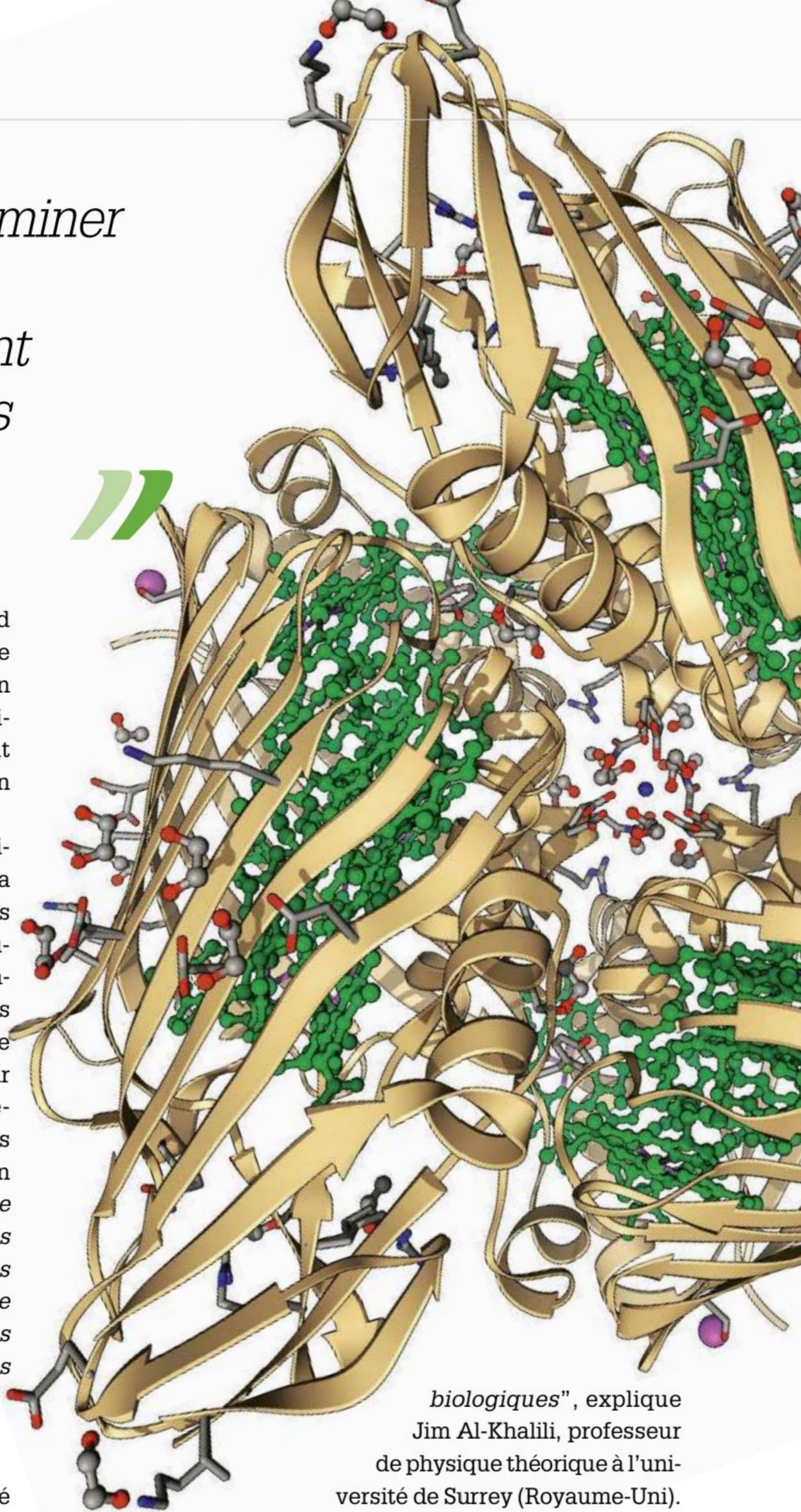
# Il s'agit de déterminer si des mécanismes biologiques exploitent des effets quantiques non triviaux

effets quantiques non triviaux, on entend le maintien à l'échelle macroscopique de phénomènes quantiques – superposition ou cohérence quantique, effet tunnel, intrication quantique – pendant suffisamment longtemps pour qu'ils aient une fonction biologique.

Et c'est là où le bât blesse. Dans les conditions physiologiques, c'est-à-dire dans la soupe aqueuse de 37°C pleine de molécules en mouvement qui nous sert de milieu cellulaire, on s'attend à ce que la cohérence quantique disparaisse en quelques femtosecondes ( $10^{-15}$  seconde, c'est-à-dire 1 milliardième de seconde !), avant de pouvoir jouer un rôle biologique. Révéler des phénomènes quantiques plus robustes et utiles au vivant constituerait donc une révolution scientifique selon Michael Thorwart : *“Ce serait sensationnel de découvrir des effets quantiques non triviaux dans des cellules ordinaires, alors que maintenir la cohérence quantique de systèmes macroscopiques comme les qubits requiert des conditions très complexes à réunir.”*

## SPECTROSCOPIE FEMTOSECONDE

Pour l'instant, la majorité de la communauté scientifique ne reconnaît aucun effet quantique non trivial en biologie – ce qui ne décourage pas les théoriciens, et ce depuis plusieurs décennies. Le premier article traitant de biologie quantique paraît ainsi dès 1932. *“Les physiciens de cette époque ont rencontré beaucoup de succès avec la mécanique quantique, et plusieurs ont pensé qu'elle avait son rôle à jouer dans des phénomènes*



*biologiques”*, explique Jim Al-Khalili, professeur de physique théorique à l'université de Surrey (Royaume-Uni).

Las, la biologie quantique reste longtemps cantonnée à la théorie, la technologie du XX<sup>e</sup> siècle empêchant de tester ses hypothèses. C'est seulement à partir des années 2000 que la spectroscopie laser ultra rapide, dont la spectroscopie femtoseconde, rend possible l'analyse de phénomènes relevant potentiellement de la biologie quantique. Ces nouveaux outils ne tardent pas

## Le complexe FMO

Pendant quelques années, on a cru que cet ensemble de pigments photosynthétiques était le siège de phénomènes quantiques qui durent suffisamment longtemps pour jouer un rôle dans la terrible efficacité de la photosynthèse, alors même qu'elle a lieu à des températures beaucoup plus élevées que celles auxquelles on observe les effets quantiques habituellement. Une expérience menée à température ambiante a finalement contredit cette possibilité. La raison/cause de l'efficacité de la photosynthèse reste débattue, mais la quantique ne semble y jouer aucun rôle majeur.

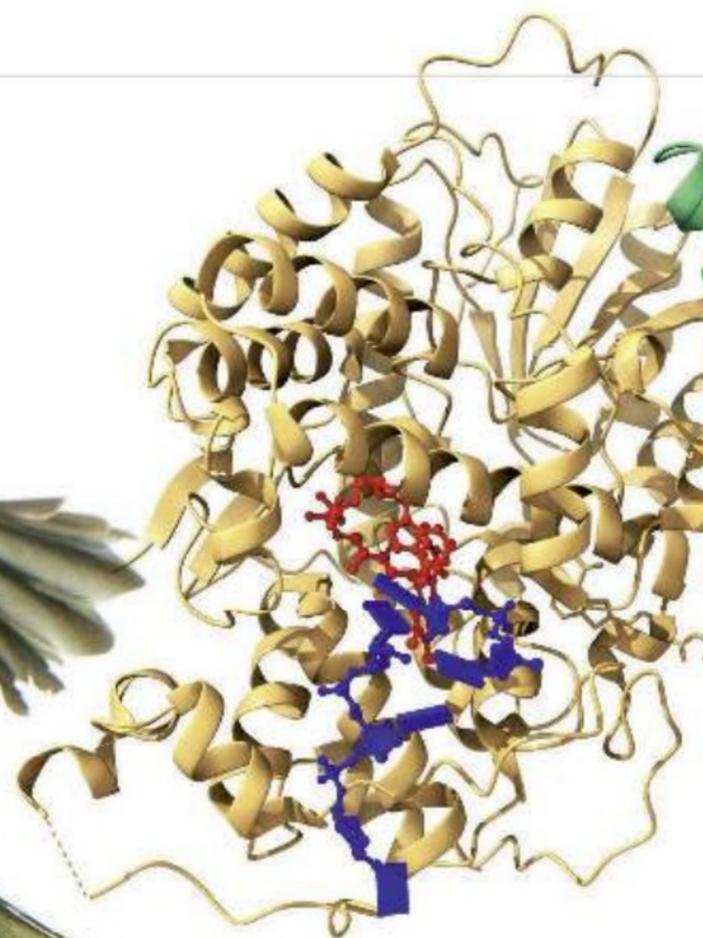
à fournir de précieuses données expérimentales. Dès 2007, une expérience fondatrice publiée dans la revue *Nature* signe la naissance de la biologie quantique moderne, en suggérant qu'une superposition quantique est à l'œuvre dans... la photosynthèse, rien que ça !

Pour mieux comprendre ce résultat, il faut d'abord se pencher sur ce qu'est la

photosynthèse. Ce processus biochimique fondamental synthétise de la matière organique à partir de CO<sub>2</sub>, d'eau et d'énergie lumineuse. Sa première étape : l'absorption par un pigment photosynthétique (molécule capable d'assimiler et de transmettre l'énergie lumineuse) d'un photon (particule de lumière), puis son transfert entre pigments photosynthétiques jusqu'au centre réactionnel, le lieu de sa conversion en énergie chimique exploitable par la cellule. Cette première étape, cruciale, présente un rendement exceptionnel : 99 % des photons absorbés sont convertis en énergie chimique. Pour certains physiciens comme Jim Al-Khalili, un tel rendement n'est pas explicable par la physique newtonienne. D'où l'attrait de la biologie quantique, qui propose une explication alternative : *"Si le photon se comportait de manière classique, c'est-à-dire en se déplaçant d'une molécule à l'autre dans une seule direction jusqu'au centre réactionnel, il n'arriverait probablement pas de manière fiable à destination, détaille Jim Al-Khalili. Mais s'il se comporte de manière quantique, il suit simultanément tous les chemins menant au centre réactionnel par superposition quantique, ce qui limite les pertes énergétiques."* Cette hypothèse nécessite qu'une cohérence quantique englobe tous les pigments photosynthétiques, au moins pendant les quelques milliers de femtosecondes que dure le transfert du photon au centre réactionnel.

C'est ici qu'intervient le fameux article de 2007. Dans cette publication, des chercheurs américains révèlent avoir observé par spectroscopie femtoseconde une cohérence quantique de plus de 660 femtosecondes dans un ensemble de pigments photosynthétiques, le complexe bactérien Fenna-Matthews-Olson (ou complexe FMO), qu'ils ont observé isolé à -196,15°C. Bien qu'obtenu dans des conditions très éloignées de celles d'une cellule vivante, ce résultat est interprété par ses auteurs comme la preuve que la cohérence quantique explique l'efficacité de la première étape de la photosynthèse. *"C'était spectaculaire"*, reconnaît Michael Thorwart. Il s'associe alors avec des collègues pour répliquer l'expérience à température ambiante (23°C). Le résultat, paru en 2017 dans la revue *PNAS*, est une

*“ L'opinion standard, c'est que la cohérence quantique ne joue aucun rôle dans la photosynthèse ”*



douche froide pour la photosynthèse quantique : *“Nous avons montré que la cohérence quantique du complexe FMO se dissipe en 60 femtosecondes à température ambiante, bien plus vite que le temps de transfert du photon au centre réactionnel. Cela signifie que la cohérence quantique ne joue aucun rôle dans la photosynthèse, assène Michael Thorwart. Aujourd’hui, c’est l’opinion standard dans la communauté scientifique [voir aussi notre article dans le SVHS #312, mars 2024, p. 62, NDLR].”*

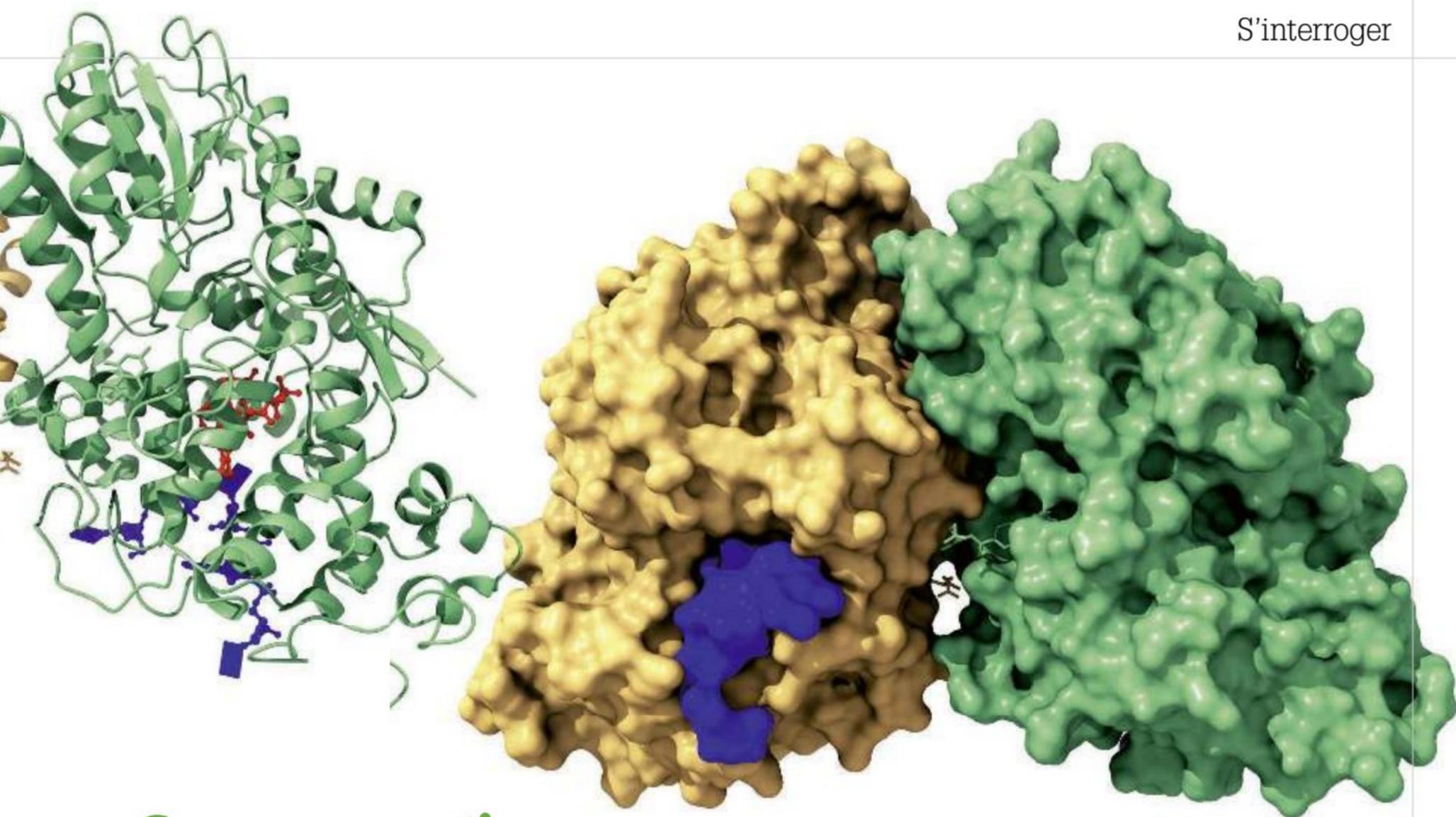
Mais la biologie quantique n’a pas dit son dernier mot. Elle a d’autres cordes à son arc, peut-être plus prometteuses. Notamment la magnétoréception des oiseaux migrateurs, c’est-à-dire leur capacité à s’orienter grâce au

champ magnétique terrestre. La magnétoréception a été prouvée dès 1966 chez le rouge-gorge, et chez de nombreuses espèces depuis, mais il reste à comprendre son fonctionnement. Rapidement, une hypothèse audacieuse émerge, qui mobilise la cohérence quantique. *“Elle suppose que lorsqu’une protéine de la rétine des oiseaux appelée cryptochrome reçoit un photon, elle réagit en créant une paire de radicaux [des molécules très réactives possédant chacune un électron non apparié, NDLR] qui sont en cohérence quantique, analyse Jim Al-Khalili. Cette paire de radicaux agit comme une boussole pour l’oiseau, car elle est sensible au champ magnétique terrestre.”* En théorie, cette paire de radicaux persiste une microseconde en conditions physiologiques – assez pour jouer un rôle biologique.

#### EXPÉRIENCE BLUFFANTE

Proposée dès 2000, cette hypothèse de “compas quantique” fait son chemin, d’abord en théorie, puis en pratique. En 2021, l’équipe de Peter Hore, professeur au département de chimie de l’université d’Oxford (Royaume-Uni), a établi en laboratoire que le cryptochrome des rouges-gorges perçoit le magnétisme. Des chercheurs de l’université

“ Nous devons imaginer des expériences complètement nouvelles pour convaincre la communauté scientifique ”



## Compas quantique

Les rouges-gorges familiers, comme d'autres oiseaux migrateurs, s'orientent grâce à leur perception du champ magnétique terrestre. Cette capacité serait une conséquence de la cohérence quantique de certaines espèces chimiques, appelées radicaux: lorsqu'une protéine de la rétine des oiseaux reçoit une particule de lumière, elle crée une paire de radicaux en cohérence quantique qui, comme des boussoles, sont sensibles au champ magnétique terrestre. Ce mécanisme de compas quantique doit encore être testé en conditions réelles.

d'Oldenbourg (Allemagne) publie en 2022 une expérience bluffante : *“On a d'abord calculé la fréquence maximale des radiofréquences (RF) susceptibles de perturber la magnétoréception des oiseaux dans l'hypothèse d'un compas magnétique basé sur le cryptochrome, explique Peter Hore, coauteur de l'article. Ensuite, nous avons soumis des oiseaux migrateurs à des RF. Ceux qui ont été soumis à des RF inférieures à la fréquence maximale ont été désorientés, mais pas ceux soumis à des RF supérieures.”*

Pour autant, le mécanisme du compas quantique n'a pas encore été étudié en conditions physiologiques, et Peter Hore est loin de crier victoire : *“Nous avons réuni beaucoup de preuves circonstancielles à l'appui de notre hypothèse, mais nombre de questions restent en suspens. Nous devons imaginer*

*des expériences complètement nouvelles pour convaincre la communauté scientifique.”* Un bilan en demi-teinte donc, alors que les autres champs d'étude de la biologie quantique sont bien moins avancés. Parmi ces nouvelles pistes, encore purement théoriques, l'une s'intéresse aux causes des mutations de l'ADN : *“Dans mon équipe, nous travaillons sur l'hypothèse que les protons sautent d'un brin d'ADN à l'autre en utilisant l'effet tunnel, causant des mutations”,* révèle Jim Al-Khalili. Ce dernier étudie aussi l'éventualité que la cohérence quantique régie la manière dont les ions (des atomes chargés électriquement) traversent les canaux ioniques, ces protéines qui permettent le passage rapide d'ions à travers la membrane des cellules, notamment dans les neurones. De quoi évoquer une origine quantique de la conscience ? *“Pour l'instant, on n'est même pas sûr que la biologie quantique existe !, tempère Jim Al-Khalili. Dans les systèmes étudiés en biologie quantique, nous n'arrivons pas à prouver expérimentalement que les effets quantiques jouent un rôle fonctionnel. Il y a encore beaucoup de sceptiques, et nous devons trouver de nouveaux exemples plus facilement testables où intervient la biologie quantique pour les convaincre.”* ■

# QUEL RAPPORT ENTRE UN TARDIGRADE ET UN QUBIT?

Les chercheurs en physique quantique ont un problème : ils ne parviennent pas à discerner la limite au-delà de laquelle leur théorie ne fonctionne plus. Peut-on intriquer un être vivant ? Non... jusqu'à preuve du contraire. PAR ÉVRARD-OUCHEM ELJAOUHARI

**L**es tardigrades sont réputés invincibles. Ces animaux extrêmophiles de moins de 1 mm de long survivent à toutes les conditions de température et de pression, à la privation de nourriture et même au vide spatial ! En 2022, des chercheurs de l'université technologique Nanyang de Singapour ont voulu utiliser cette résistance hors du commun pour mener une expérience tout aussi exceptionnelle : ils ont cherché à isoler radicalement l'animal du monde extérieur, tout en ralentissant au maximum son métabolisme afin de le plonger dans un état quantique sans qu'il soit perturbé. Résultat : ils assurent avoir réussi à intriquer (voir lexique p. 23) une de ces bestioles avec un qubit ! Mais qu'est-ce que cela veut dire ?

S'ils ont eu cette drôle d'idée, c'est pour tester les limites de la mécanique quantique. "Car cette théorie semble sans limites, et c'est très étrange", pose Shlomi Kotler, physicien à l'université hébraïque de Jérusalem. En effet, les théories physiques ne fonctionnent normalement pas à tous les coups. La mécanique newtonienne, par exemple, fonctionne bien lorsqu'on s'intéresse à des

objets se déplaçant lentement. Mais si on se rapproche de la vitesse de la lumière, elle n'est plus adaptée, et doit être remplacée par la relativité restreinte. Or, "avec la mécanique quantique, on ne connaît pas de paramètres où elle devrait cesser de fonctionner et être remplacée par une autre théorie".



Il a d'abord été admis que les électrons des atomes sont décrits par la mécanique quantique. Puis il a été montré que cela fonctionne également pour ces mêmes atomes. Et les scientifiques ont ensuite réussi à étendre le comportement quantique à des masses bien plus grandes qu'un seul atome.

### LIMITE D'APPLICABILITÉ

En 1999, le groupe d'Anton Zeilinger le démontre pour une molécule constituée de 60 atomes de carbone ! Le record en date est cependant détenu par l'expérience de Matteo Fadel, physicien à l'ETH de Zurich, *"on a placé les 100 millions de milliards d'atomes d'un cristal de saphir en superposition quantique"*, rapporte-t-il.

Il semble pourtant évident que les objets massifs et usuels ne se comportent pas comme des objets quantiques. Par exemple, vous n'êtes pas simultanément en train de lire et de ne pas lire ces lignes ! Oui, mais *"nous n'avons pas de théorie qui nous dise qu'au-delà d'une certaine échelle de masse, la mécanique quantique ne tient plus"*, insiste Shlomi Kotler. Autrement dit, le fait que nous ne soyons pas dans un état de superposition ne nous donne pas d'indication

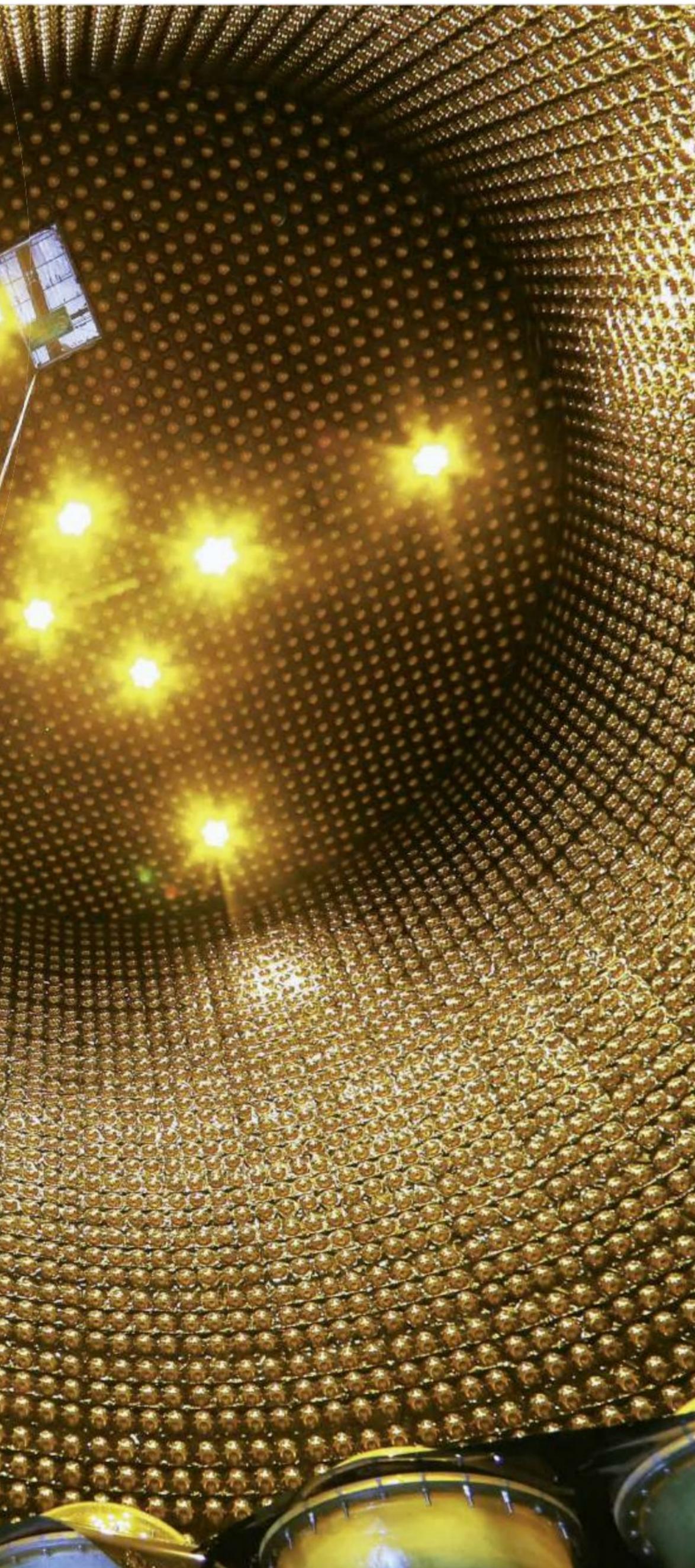
sur l'existence d'une limite fondamentale, impossible à franchir (contrairement, mettons, à la vitesse de la lumière). En théorie, si l'on fournit les efforts suffisants pour isoler des systèmes toujours plus gros et massifs, alors on devrait parvenir à préserver leurs propriétés quantiques. *"Et ce qui rend les choses encore plus énigmatiques, c'est que quand on essaye d'aller dans cette direction, on y arrive"*, affirme Shlomi Kotler. En atteste le cristal de saphir de Matteo Fadel.

D'où l'expérience menée sur un tardigrade par l'équipe de Singapour. Mais au fait, a-t-il été vraiment "intriqué" ? Pas si sûr : de nouvelles études ont contredit les premiers résultats. *"On ne peut pas dire que l'intrication ait été vraiment effectuée"*, objecte Matteo Fadel. Il n'empêche que cette tentative est bien le signe que les scientifiques cherchent activement à savoir s'il existe ou non une limite d'applicabilité des lois quantiques. Pour Shlomi Kotler, il faut continuer dans cette voie, en intriquant des objets de plus en plus grands et de plus en plus lourds. Jusqu'à trouver – si elle existe – la fameuse limite : *"Cela nous éclairera sur la prochaine théorie que nous devons rechercher et qui prendra le relais."* ■



# Neutrino, la chasse au fantôme

L'étude de l'énigmatique neutrino pourrait révolutionner notre compréhension des échelles les plus fines de la matière, le fameux modèle standard de la physique des particules, à la base de la mécanique quantique. PAR HUGO LÉROUX



**R**éprésentez-vous le volume de la cathédrale Notre-Dame de Paris intégralement rempli d'une eau extrêmement pure. Imaginez maintenant que ses parois soient tapissées de 40 000 capteurs dernier cri, conçus pour capter les infimes signaux lumineux émis lorsqu'une particule bien particulière frappe les molécules d'eau. Cette expérience incroyable va bientôt voir le jour : elle s'appelle Hyper-Kamiokande, et doit être lancée au Japon en 2027. Elle en dit long sur la détermination des physiciens à percer définitivement les secrets du neutrino.

C'est que cette minuscule particule, produite en permanence au sein des étoiles, mais aussi par la radioactivité naturelle, occupe une place à part dans le bestiaire des particules élémentaires que l'on appelle "modèle standard". Depuis sa détection en 1956, elle recèle en effet deux grands mystères dont la résolution pourrait chambouler notre compréhension de la matière. *"Le premier, c'est que le neutrino pourrait être sa propre antiparticule, alors que chaque particule de matière est normalement dotée d'une antiparticule distincte"*, expose Antoine Kouchner, directeur adjoint du laboratoire Astroparticule et Cosmologie à Paris. Le second mystère réside dans une propriété remarquable : sa capacité à "osciller" continûment entre trois états quantiques appelés "saveurs", dites électronique, muonique et tauique.

Pour ne rien arranger, le neutrino s'avère extrêmement récalcitrant. De charge électrique nulle et de masse extrêmement faible – au moins 5 millions de fois plus léger qu'un électron ! –, *"il interagit très rarement avec la matière"*, décrit Stéphane Lavignac, chercheur à l'institut de physique théorique de l'université Paris-Saclay. Un million de milliards de neutrinos nous traversent, par exemple, chaque seconde sans que cela ne produise le moindre effet ! Ce qui complique

**Au Japon, le cœur de Super-Kamiokande, actuel plus grand détecteur de neutrinos au monde, vidé de l'eau ultra pure qu'il contenait à des fins de rénovation. Ses parois sont recouvertes de milliers de capteurs destinés à repérer les neutrinos, mystérieuses particules de charge nulle et de masse très faible.**



Le spectromètre Katrin (Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment) dans les rues de Leopoldshafen, peu avant son installation à Karlsruhe (Allemagne). Fruit d'un programme de recherche international, ce gigantesque appareil est destiné à étudier le minuscule neutrino. Ci-dessous, un chercheur inspecte les entrailles de Katrin.



noyau initial. Et l'énergie maximale que peut avoir l'électron dépend de la masse du neutrino", décrit Stéphane Lavignac. Or, il existe une réaction encore plus spécifique et rare : les désintégrations dites "double bêta", durant lesquelles certains noyaux fissionnent pour donner un noyau "fils" et non pas un, mais deux électrons et deux neutrinos. Si les chercheurs observent un jour cette réaction et qu'elle ne produit que deux électrons, cela voudra dire que les deux neutrinos émis se sont annulés l'un l'autre, donc qu'ils sont l'antiparticule l'un de l'autre. Ce qui signifie que le neutrino est sa propre antiparticule. Bien que le phénomène n'ait pas été détecté à ce jour, les physiciens continuent de creuser. En cas de succès, cela obligerait les physiciens à modifier le modèle standard !

### L'ORDRE DES MASSES

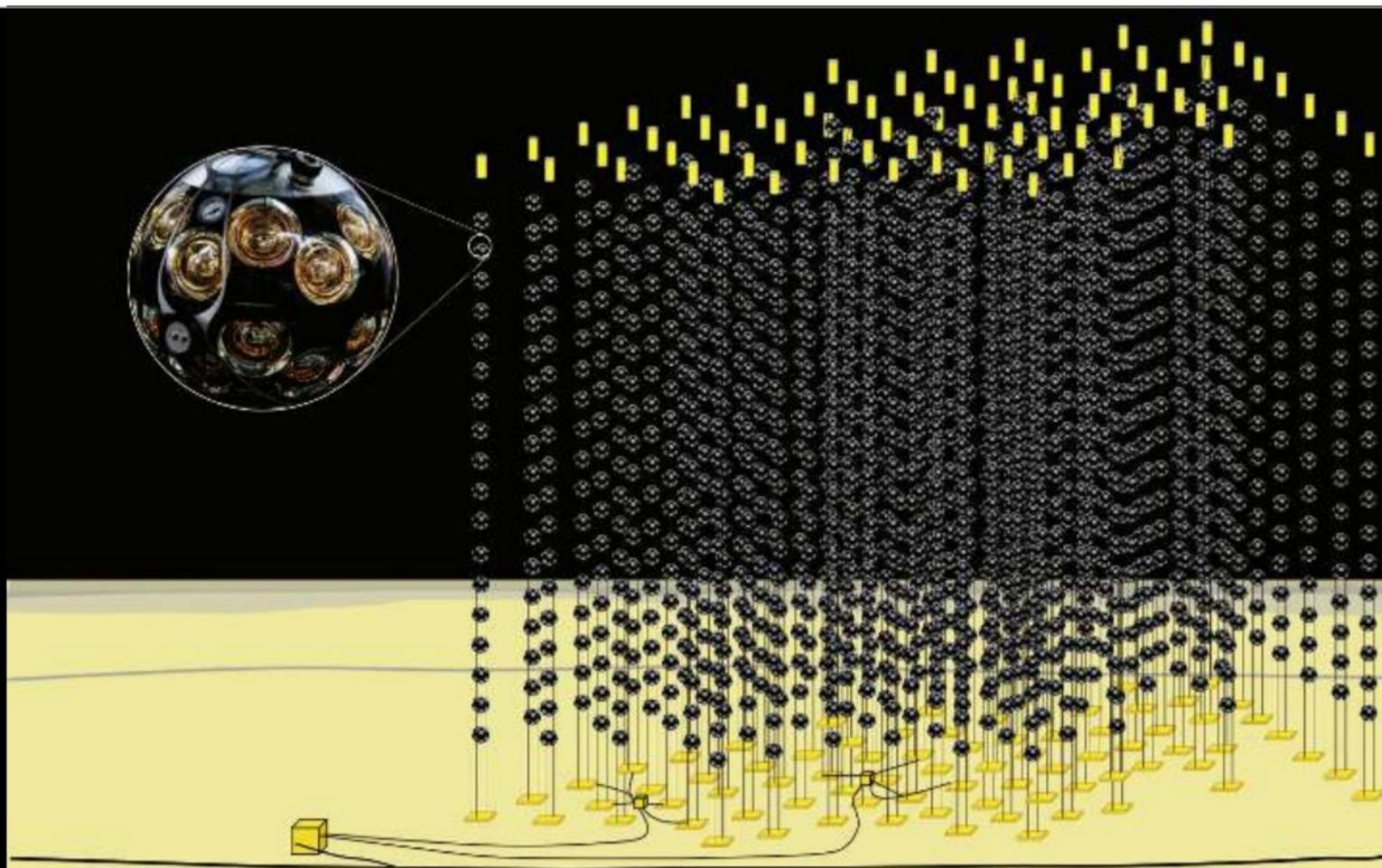
La seconde catégorie de détecteurs s'intéresse à l'oscillation du neutrino. L'expérience KM3NeT, en France, étudie ainsi celle des neutrinos dits atmosphériques, produits par collision des rayonnements cosmiques de haute énergie avec les particules de l'atmosphère terrestre. Ici, l'objectif principal est de déterminer l'ordre des masses des 3 neutrinos (électronique, muonique et tauique), encore inconnu à ce jour. Au Japon, l'expérience Super-Kamiokande produit, quant à elle, des

passablement le travail des expérimentateurs... censés justement détecter d'une manière ou d'une autre la fameuse particule pour en préciser les propriétés.

Parmi ces tentatives, une première catégorie d'expérimentations et de détecteurs vise à quantifier précisément la masse du neutrino et à répondre au mystère de l'antiparticule. À l'instar de Katrin, en Allemagne, un appareil de mesure qui pèse 200 t et mesure 70 m de long pour 10 m de haut, ce sont des "super-balances". Elles étudient la désintégration bêta, soit le phénomène de production du neutrino, qui a lieu en permanence au cœur de nos centrales nucléaires. Il s'agit de la désintégration de certains noyaux atomiques en un noyau "fils", processus qui émet au passage un électron et un neutrino. "On sait que la somme des énergies du noyau fils, du neutrino et de l'électron, est égale à celle du

*Il pourrait avoir joué un rôle dans le déséquilibre des premiers instants après le big bang, lorsque la matière a pris le dessus sur l'antimatière*

L'expérience KM3NeT repose sur un réseau tridimensionnel de capteurs répartis sur de grands volumes d'eau, au fond de la Méditerranée. Ces capteurs détectent l'infime quantité de lumière dégagée par les très rares collisions entre les neutrinos et les molécules d'eau.



neutrinos et des antineutrinos "sur mesure", dotés de caractéristiques bien spécifiques, grâce à un accélérateur de particules. "L'idée est ensuite d'essayer de comprendre s'il y a une différence dans leurs façons d'osciller", schématise Michel Gonin, directeur du laboratoire Ilance, à l'université de Tokyo.

Sur d'autres particules élémentaires comme les quarks, les physiciens n'ont relevé que d'infimes différences d'oscillation entre l'antiparticule et la particule. Mais les physiciens pensent tenir une anomalie avec le neutrino : les mesures accumulées depuis des années dans les détecteurs suggèrent qu'il existe bel et bien une forte violation de ce principe de symétrie. "Si c'est bien le cas, le neutrino pourrait avoir joué un rôle dans le déséquilibre des premiers instants après le big bang, lorsque la matière a pris le dessus sur l'antimatière, révèle Michel Gonin. Malheureusement, les données disponibles sont aujourd'hui trop peu nombreuses pour pouvoir conclure avec certitude."

### COURSE AU GIGANTISME

Pour accumuler plus de preuves, il faut bâtir de plus grands détecteurs, de façon à augmenter les chances d'observer les très rares collisions des neutrinos avec la matière. D'où la course au gigantisme des futures expériences comme Hyper-Kamiokande, qui sera dix fois plus volumineuse que l'actuelle Super-Kamiokande.

“ Alors que chaque particule de matière est normalement dotée d'une antiparticule distincte, le neutrino pourrait être sa propre antiparticule ”

“ Concrètement, cela veut dire qu'à durée de mesure égale, nous détecterons dix fois plus d'événements”, résume Michel Gonin, membre de l'expérience japonaise. “ Grâce à l'accumulation des données, nous espérons avoir tranché cette question d'ici à la fin de la décennie”, souffle Antoine Kouchner, membre de KM3NeT.

D'ici là, ces détecteurs de neutrinos pourraient aussi nous en apprendre plus sur des événements cosmiques très énergétiques et difficilement accessibles aux télescopes classiques, comme les supernovae. “ Comme les neutrinos n'interagissent pratiquement jamais, ils nous arrivent en quasi ligne droite depuis le cœur des étoiles en train d'exploser”, révèle Michel Gonin. Le neutrino mérite bien son surnom de messenger de l'intimement petit... et de l'infiniment grand. ■

# ARNAQUE À LA QUANTIQUE

Ça a le nom et la couleur de la quantique, mais ce n'est pas de la science ! Spa, médecine, accélérateur d'intelligence... Quand les pseudo-thérapies s'approprient le lexique quantique, ça pique !

PAR ARMELLE CAMELIN

**C**omment expliquer les rémissions de cancers, de maladies cardiaques ou chroniques ? Peut-on accéder à un pouvoir de guérison supérieur ? Dans son livre best-seller *Le Corps quantique, les fabuleux pouvoirs de guérison de votre esprit* (1989), Deepak Chopra, endocrinologue indo-américain, promet des guérisons miraculeuses grâce aux “interactions corps-esprit” et à la “médecine quantique”. Pour justifier cet usage lexical, il s'appuie sur le concept de “biophotons” développé par le biophysicien allemand Fritz-Albert Popp, qui soutient que des photons sont émis par le corps humain. Pour Deepak Chopra, c'est assez pour avancer que le corps et l'esprit dégagent un “champ vibratoire” dont le rééquilibrage permet de rester en bonne santé.

“Pour le grand public, la mécanique quantique a quelque chose de mystérieux et complexe”, analyse Aymeric Delteil, chercheur CNRS au sein du groupe d'étude de la matière condensée à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines. “C'est pourquoi certaines personnes, qui ne sont pas scientifiques, s'approprient le lexique quantique pour se donner une crédibilité.” D'après lui, la stratégie est souvent la même : “Avoir un point de départ un peu crédible, basé sur des éléments scientifiques, puis partir assez rapidement vers des choses délirantes et

dangereuses.” “Thérapies énergétiques”, “magnétisme”, “vibrations”, “élévation de son niveau d'énergie”, “lumière” : les lexiques New Age, ésotériques et quantiques se mélangent. Sur les réseaux sociaux, les thérapeutes, praticiens et coachs en thérapie quantique prônent l'usage de “techniques de développement personnel quantiques”. “Cela impressionne les patients ou clients qui ne sont alors plus en mesure d'en détecter les failles”, poursuit le chercheur.

## SPAS QUANTIQUES

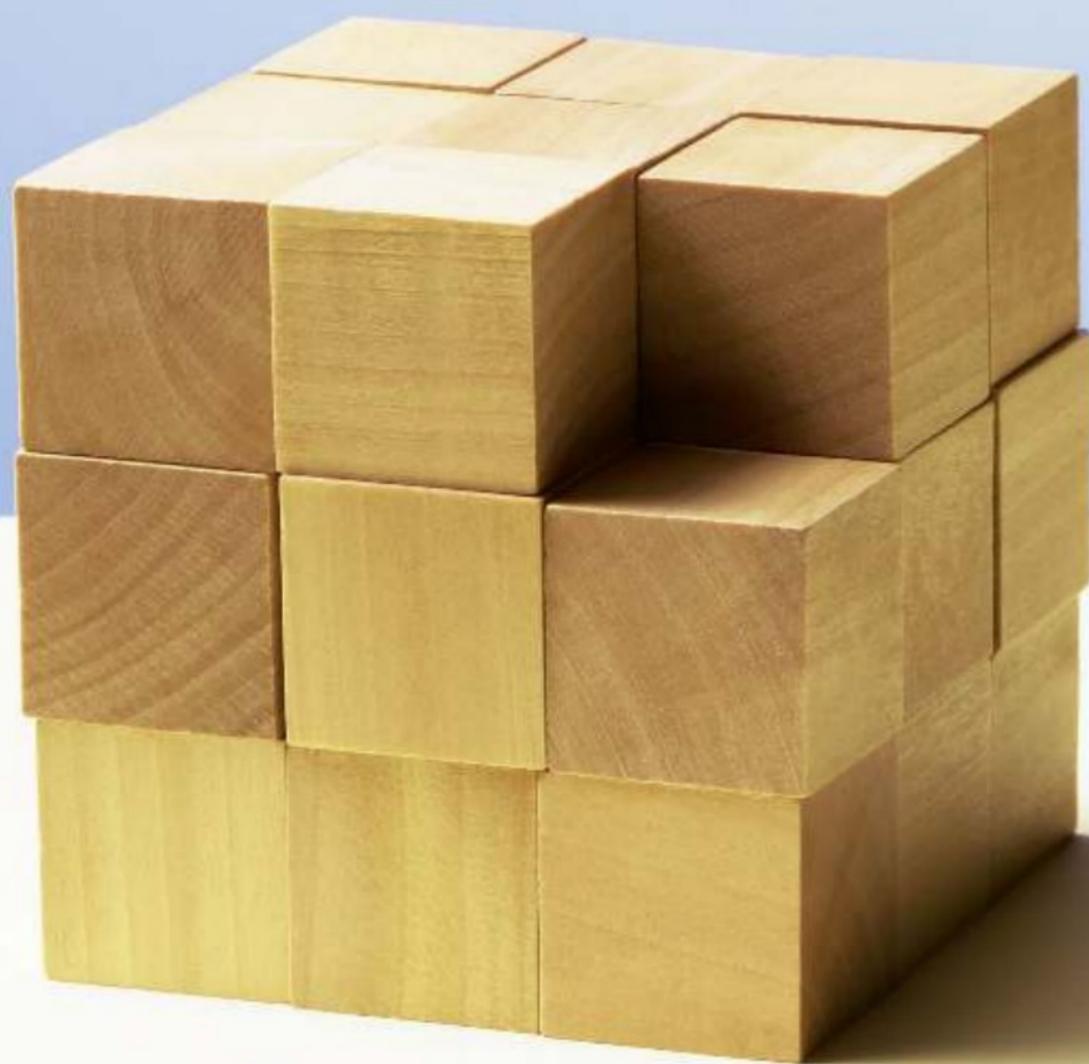
Même son de cloche du côté des cosmétiques quantiques. Par exemple, le laboratoire suisse Phyto 5 est “le seul certifié quantique depuis 2017”. Mais que signifie cette certification ? D'après leur site web, la Gamme des 5 éléments qu'il développe propose “des produits quantiques [qui] contiennent de l'information capable d'influencer les émotions. Cette information est relâchée lorsque le produit entre en contact avec la peau”. Pour obtenir un tel effet, “pendant le procédé de fabrication, une série d'ondes naturelles est utilisée afin d'augmenter le taux de vibration des produits, pour atteindre un taux vibratoire trois fois plus élevé que celui des produits cosmétiques conventionnels”... Des produits “vibrants” donc : des crèmes, des masques, des lotions semblables à des “instruments de musique” qui auraient chacun une empreinte



spécifique. Ces baumes – au prix lui aussi atomique (par exemple : 60 € le petit tube de crème solaire) – sont proposés dans les 23 “spas quantiques” adossés au laboratoire et installés dans 15 pays différents.

Mais le grand prix de l’arnaque revient au Healy, un “boîtier quantique” qui promet de guérir n’importe lequel de vos maux grâce à une “*thérapie fréquentielle qui permet la régulation des microfréquences du corps en temps réel*”. Vendu entre 500 € et 4 000 €, “il s’est écoulé à près de 200 000 exemplaires”, décrit Aymeric Delteil, *selon un système de vente pyramidale*. Des analyses en rétro-ingénierie ont montré qu’il s’agit d’un faux dispositif : aucun capteur, quantique ou non, n’a été retrouvé à l’intérieur du boîtier. Même conclusion pour le PRK-1U, une machine russe vendue 10 000 € censée développer l’intelligence grâce à des “ondes synergiques”. “Il n’y a aucun composant dans ces outils, seulement des diodes qui s’allument de temps en temps pour faire croire qu’il se passe quelque chose. Ce sont des arnaques”, conclut le chercheur. Nous voilà prévenus. ■

“ La mécanique quantique a quelque chose de mystérieux. Certaines personnes, qui ne sont pas scientifiques, s’approprient le lexique quantique pour se donner une crédibilité ”



“On cherche  
à marier  
mécanique  
quantique  
et relativité  
générale”



**SVHS: Avant l'élaboration de la mécanique quantique et de la relativité générale, quelles lois physiques prévalaient ?**



**Etera Livine :** Tout était décrit par la mécanique classique, développée par Newton, Galilée, Lagrange, Hamilton et d'autres. On s'en servait pour décrire aussi bien le mouvement des planètes que celui des particules.

**Barak Shoshany :** Dans ce cadre, l'espace et le temps sont les mêmes pour tout le monde. Mais beaucoup de problèmes étaient non résolus avec la mécanique classique.

**SVHS: Lesquels ?**

**B.S. :** L'effet photoélectrique, qui décrit l'émission d'électrons par un matériau sous l'action de la lumière. La mécanique classique prédit que plus la lumière est brillante, plus les électrons sont éjectés rapidement ; que plus la fréquence lumineuse est élevée, plus d'électrons sont éjectés ; et que n'importe quelle fréquence émet des électrons. Mais les expériences ne montrent pas du tout ça.

**E.L. :** On peut aussi citer l'expérience de Michelson et Morley, menée dans les années 1880, qui montrait que la vitesse de la lumière est la même pour tous. Or la

mécanique classique dit que la vitesse dépend de l'observateur : si je suis dans un train qui avance à 100 km/h et que je lance un ballon à 10 km/h, je vais le voir avancer à 10 km/h. Mais depuis le quai, on va le voir aller à 110 km/h.

**SVHS: Est-ce en tentant de résoudre ces problèmes que les théories quantique et relativiste sont nées ?**

**E.L. :** Oui. Le problème de la vitesse de la lumière a été résolu en 1905, quand Einstein a présenté la relativité restreinte. Dans cette théorie, l'espace et le temps ne sont plus universels. Le temps se dilate et les longueurs se contractent en fonction de notre vitesse. En mécanique relativiste, on n'additionne plus les vitesses comme dans l'exemple du ballon et du train, pour que la vitesse de la lumière soit universelle pour tous les observateurs, quelle que soit leur vitesse.

**B.S. :** Pour l'effet photoélectrique, la solution est la mécanique quantique : la lumière n'est plus une onde continue, mais elle est faite de particules individuelles, les photons. En en tenant compte, les expériences s'expliquent parfaitement.

**SVHS: Et la gravitation dans tout ça ?**

**B.S. :** La mécanique classique n'explique pas tout. L'exemple le plus frappant est celui de l'anomalie de l'avance du périhélie [point de l'orbite d'un corps céleste

Pour expliquer les lois qui régissent notre Univers, les physiciens s'appuient sur l'une ou l'autre de ces deux théories. Pourquoi ne parvient-on pas à les fusionner ? Réponses d'Etera Livine\* et Barak Shoshany\*\*, spécialistes de la gravité quantique.

PAR ÉVRARD-OUICEM ELJAOUHARI

où la distance de ce corps au Soleil est minimale, NDLR] de Mercure. La planète a une orbite qui elle-même "tourne" autour du Soleil... sauf que la mécanique classique prédit une valeur pour l'avance du périhélie qui n'est pas la même que celle observée.

**E.L. :** En 1915, Einstein présente la relativité générale. Elle inclut les effets gravitationnels qui n'étaient pas pris en compte dans la relativité restreinte. Ici, la gravité se manifeste à travers la courbure de l'espace-temps imposée par les objets massifs. Les planètes se déplacent en ligne droite, mais puisque l'espace-temps est courbe autour des étoiles, cette ligne droite suit en fait une ellipse. Et la relativité générale prédit exactement l'avance du périhélie de Mercure.

**SVHS :** *Ce sont ces trois théories qui sont maintenant utilisées pour décrire le monde qui nous entoure ?*

**E.L. :** Plus précisément, la mécanique quantique et la relativité restreinte ont été "fusionnées" en une seule et unique théorie : la théorie quantique des champs, qui décrit l'évolution des particules.

**B.S. :** La théorie quantique des champs et la relativité

*“ La théorie quantique des champs et la relativité générale sont les théories les mieux vérifiées de toutes les sciences, ce sont les meilleures théories dont l'humanité dispose ”*

générale sont les théories les mieux vérifiées de toutes les sciences, pas seulement de la physique. Ce sont les meilleures théories dont dispose l'humanité, dans n'importe quelle discipline.

**SVHS :** *Pourquoi cherche-t-on à fusionner ces deux théories ?*

**B.S. :** L'exemple le plus célèbre est : "Que se passe-t-il au centre d'un trou noir ?" La relativité générale prédit qu'il existe une singularité, qui a une courbure et une densité infinies. Mais on ne pense pas qu'il y ait des infinis dans la nature. On pense donc que la relativité générale échoue à expliquer ce qu'il se

passé à l'intérieur d'un trou noir. On pourrait se dire "si la singularité est un point, alors utilisons la théorie quantique des champs". Mais celle-ci n'inclut pas du tout la gravité. C'est pour ça qu'est venue l'idée de marier mécanique quantique et relativité générale. On pense que si on arrive à avoir une description quantique de la gravitation, on pourrait savoir ce qu'il y a à l'intérieur d'un trou noir, et on verrait que ce n'est pas une singularité.



**E.L. :** Un autre exemple... La relativité générale a une prédiction incroyable, c'est que non seulement l'espace-temps est courbe, mais il est aussi dynamique. Il vibre et génère ce que l'on appelle des ondes gravitationnelles. Mais, pour rappel, la théorie quantique des champs nous dit que s'il y a une onde, alors il y a une particule derrière. Par exemple, au champ électromagnétique correspond le photon. On s'attend donc à avoir la même chose pour la gravité. Or, quand on applique cette logique aux ondes gravitationnelles, on ne comprend pas suffisamment bien les propriétés quantiques de la particule supposée correspondante – le graviton.

**SVHS: Ya-t-il eu des tentatives pour compléter la théorie de la gravitation et la quantifier ?**

**E.L. :** La plus célèbre est la théorie des cordes, qui imagine qu'il existe des choses

*“ On pense que si on arrive à avoir une description quantique de la gravitation, on pourrait savoir ce qu'il y a à l'intérieur d'un trou noir ”*

plus fondamentales que les particules élémentaires : des cordes, droites ou fermées, qui, selon la manière dont elles vibrent, donnent des propriétés aux particules comme la masse ou la charge. Une autre théorie est la gravitation quantique à boucles. Ici, on imagine qu'à l'échelle de Planck, qui équivaut à  $10^{-35}$  m, l'espace-temps n'est plus continu, mais qu'il a une certaine granularité. L'espace est vu comme un réseau quantique où les briques sont comme des petits atomes d'espace-temps, qui se collent ensemble pour former notre Univers, comme un Lego géant.

**B.S. :** Le problème c'est qu'aucune de ces théories ne fonctionne. La théorie des cordes prédit  $10^{500}$  possibilités d'obtenir un ensemble de particules, mais aucune de ces solutions ne donne les particules que l'on connaît ! De plus, la théorie ne fonctionne que si l'on considère 26 dimensions... Le problème de la gravitation quantique à boucles est qu'on ne peut pas prouver que c'est la bonne théorie de gravité quantique. En effet, si on regarde des photons individuels, on est au niveau quantique, et si on dézoome, on reproduit l'électromagnétisme classique, et on voit que c'est cohérent. Mais cette limite classique, qui permet de passer d'une description quantique à une description classique, n'existe pas dans le cas de la gravitation : on ne peut pas dézoomer d'un espace-temps granulaire pour aboutir à un espace-temps continu... ■

\* Etera Livine est directeur de recherche CNRS, professeur en physique théorique à l'ENS Lyon.

\*\* Barak Shoshany est professeur de physique à l'université de Brock (Canada).

Selon la relativité générale, la gravité se manifeste à travers la courbure de l'espace-temps ("plan" quadrillé) imposée par la masse des objets célestes (de gauche à droite : Lune, Terre, Soleil).

# La conscience peut-elle être quantique ?

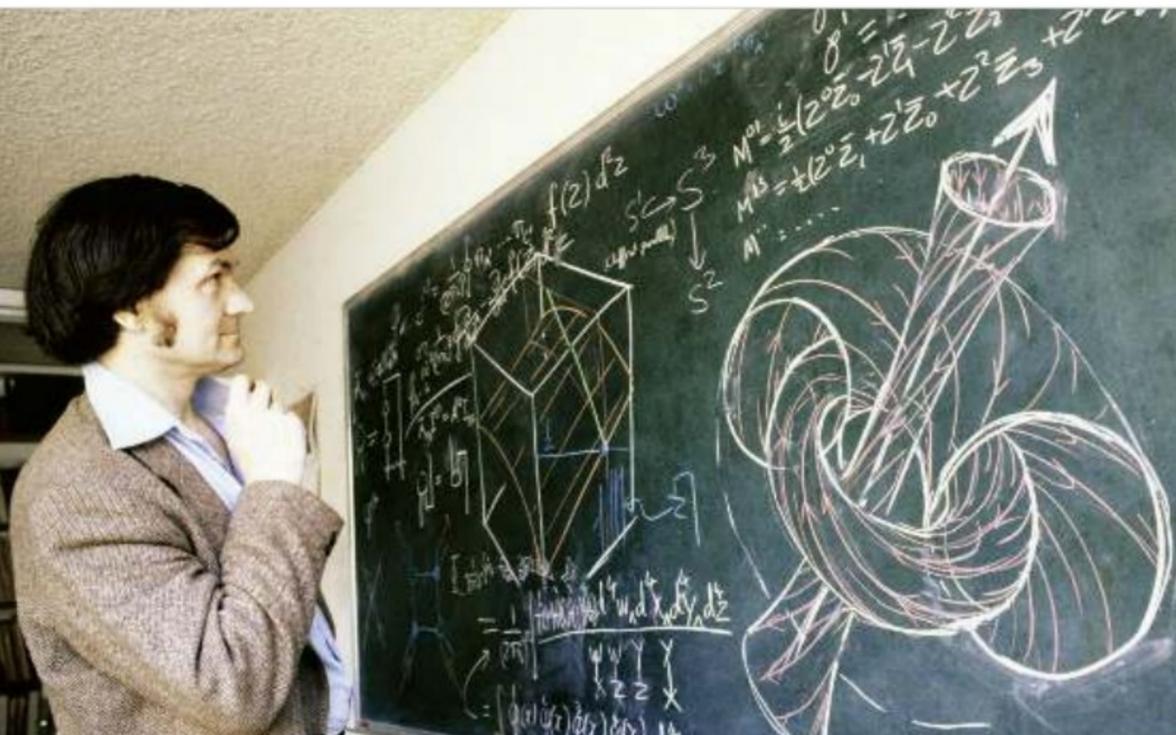
Cette idée controversée a été lancée voilà une trentaine d'années par le physicien Roger Penrose. Elle connaît aujourd'hui de surprenants développements. PAR ÉVRARD-OUICEM ELJAOUHARI

Les microtubules, des structures microscopiques présentes dans les neurones, pourraient être liés à la conscience.

Comment la science peut-elle expliquer l'origine de la conscience, soit la *"connaissance, intuitive ou réflexive immédiate, que chacun a de son existence et de celle du monde extérieur"*, selon la définition du Larousse ? Parmi les théories les plus audacieuses figure l'*"orchestrated objective reduction"* (Orch OR), ou "réduction objective orchestrée" en français, proposée dans les années 1990 par le physicien (et lauréat du prix Nobel en 2020) Roger Penrose et l'anesthésiste Stuart Hameroff. Cette hypothèse lie la conscience à des phénomènes

quantiques se déroulant dans des structures microscopiques des neurones : les microtubules.

L'idée maîtresse d'Orch OR repose sur la superposition quantique, un phénomène où une particule peut exister simultanément dans plusieurs états. *"Selon Penrose et Hameroff, cette superposition peut s'effondrer spontanément en un état unique dans les microtubules en*



raison d'instabilités gravitationnelles", décrit Cătălina Curceanu, chercheuse à l'Institut national italien de physique nucléaire. Ce processus de réduction objective orchestrée, coordonné par des facteurs biologiques, générerait une expérience consciente.

Faute de preuves expérimentales solides, l'hypothèse Orch OR, même portée par l'un des plus illustres physiciens modernes, reste marginalisée dans la recherche sur la conscience. "Beaucoup de scientifiques rejettent l'idée que des états quantiques puissent persister dans le cerveau, un environnement qu'ils jugent trop chaud, humide et chaotique", signale Cătălina Curceanu. Le physicien Max Tegmark, par exemple, argue que toute cohérence quantique s'effondrerait bien trop rapidement pour influencer le fonctionnement cérébral. Des

**Selon Roger Penrose, prix Nobel de physique, la conscience serait liée à des phénomènes quantiques.**

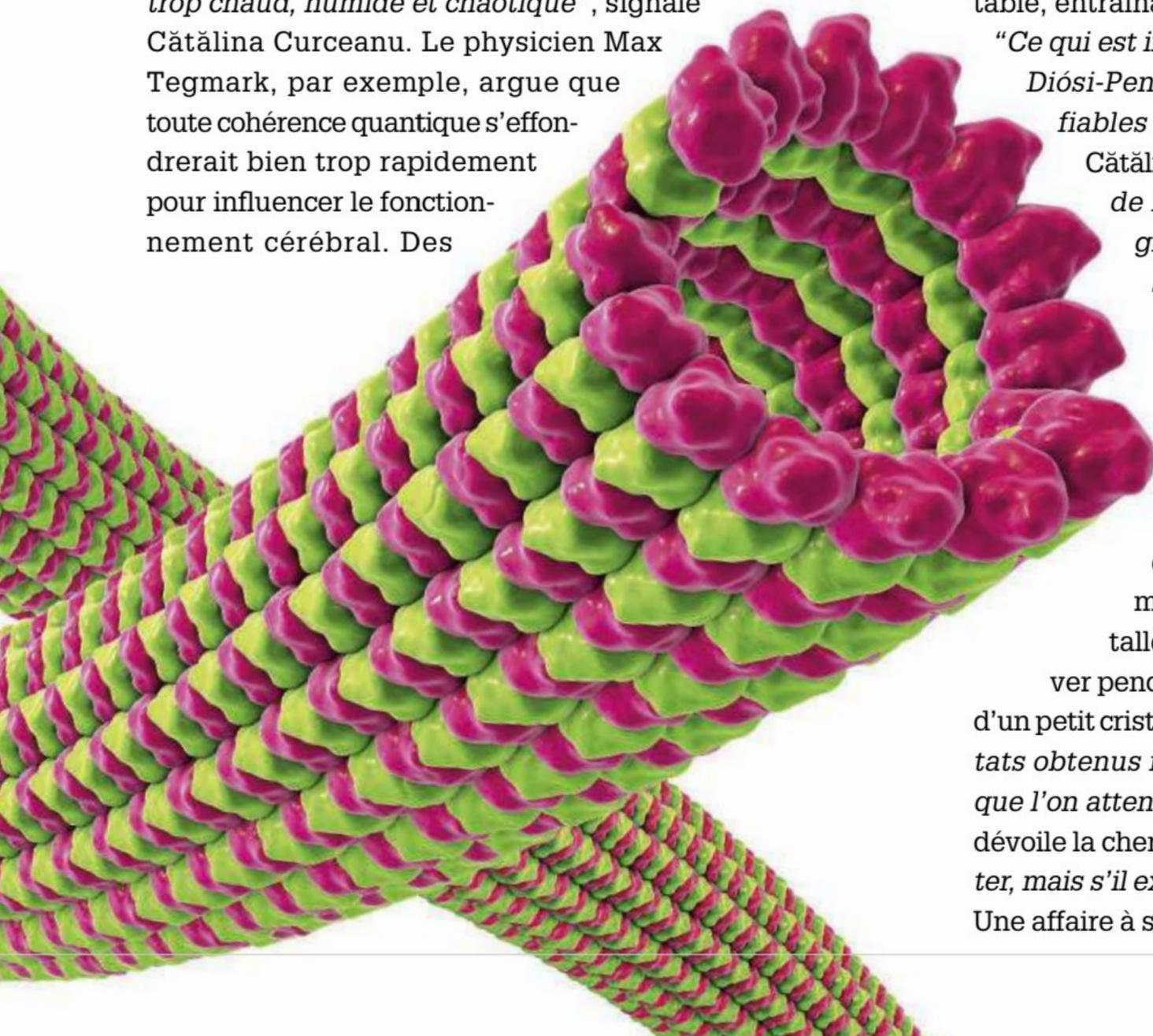
expériences récentes ont pourtant relancé le débat. Celle menée par Jack Tuszynski, de l'université d'Alberta au Canada, a montré que les médicaments anesthésiants permettent aux microtubules de réémettre la lumière piégée dans un délai beaucoup plus court que ce que l'on pensait à l'origine, suggérant qu'ils perturbent les processus quantiques dans le cerveau. Or, comme les anesthésiques activent et désactivent la conscience, les résultats pourraient impliquer les microtubules comme un nœud de notre expérience consciente. Mais de l'avis même des scientifiques à l'origine de ces découvertes, tirer un lien entre leurs observations et Orch OR est bancal : d'autres raisons pourraient en être à l'origine, et ils s'évertuent d'ailleurs à les rechercher.

### DES RÉSULTATS INCOHÉRENTS

S'il est difficile d'étudier expérimentalement Orch OR, l'une de ses variantes, le modèle de Diósi-Penrose, a pu être testée. Dans ce modèle, chaque état d'une superposition déforme de façon différente l'espace-temps. Ainsi, ces différentes géométries seraient incompatibles et ne pourraient coexister indéfiniment ; leur superposition, trop instable, entraînant la réduction à un seul état.

*"Ce qui est intéressant, c'est que le modèle Diósi-Penrose fait des prédictions vérifiables expérimentalement, rapporte Cătălina Curceanu. En effet, à cause de l'instabilité prédite, le champ gravitationnel est fluctuant. Or, si des particules chargées sont soumises à cette fluctuation, elles émettent un rayonnement, principalement X."*

Pour le vérifier, Cătălina Curceanu et son équipe, dans leur laboratoire du Gran Sasso, enfoui à plus de 1 km sous le massif du même nom, ont installé un détecteur chargé d'observer pendant deux mois le rayonnement d'un petit cristal de germanium. Or, "les résultats obtenus ne sont pas cohérents avec ce que l'on attend du modèle de Diósi-Penrose, dévoile la chercheuse. On ne peut pas le rejeter, mais s'il existe, il n'est pas aussi simple." Une affaire à suivre, donc. ■



**SCIENCE & VIE**

SÉJOURS

A partir de

**1899€** par personne

**TOUT COMPRIS**

Au départ de France\*

# Cet hiver, découvrez notre séjour au cœur de **LA LAPONIE SUÉDOISE**

Des départs jusqu'en mars 2025

Safari en chiens de traîneau



Motoneige



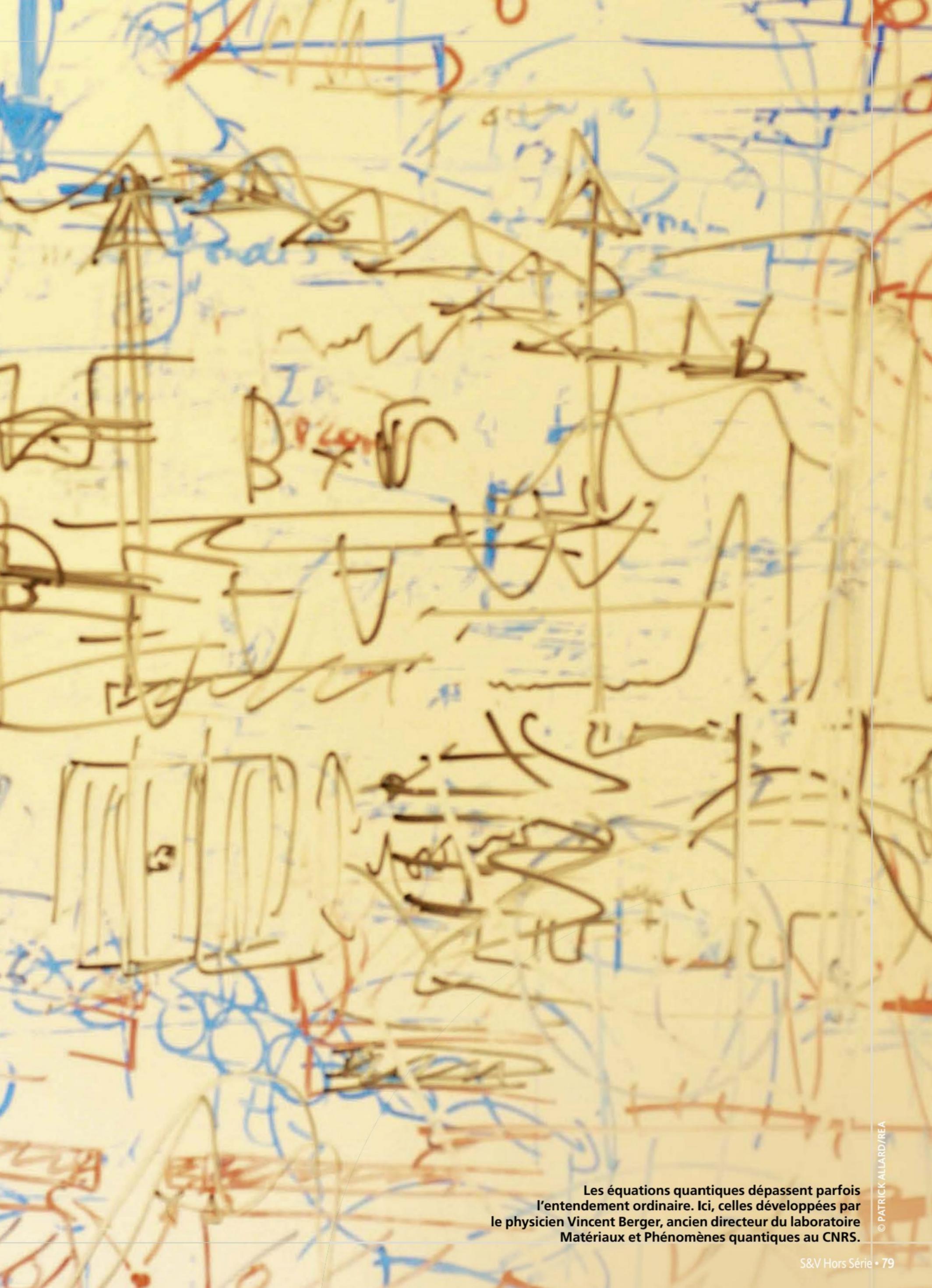
Rencontre avec le Père-Noël



Profitez d'activités uniques au cœur de la Laponie suédoise !



# IMAGINER



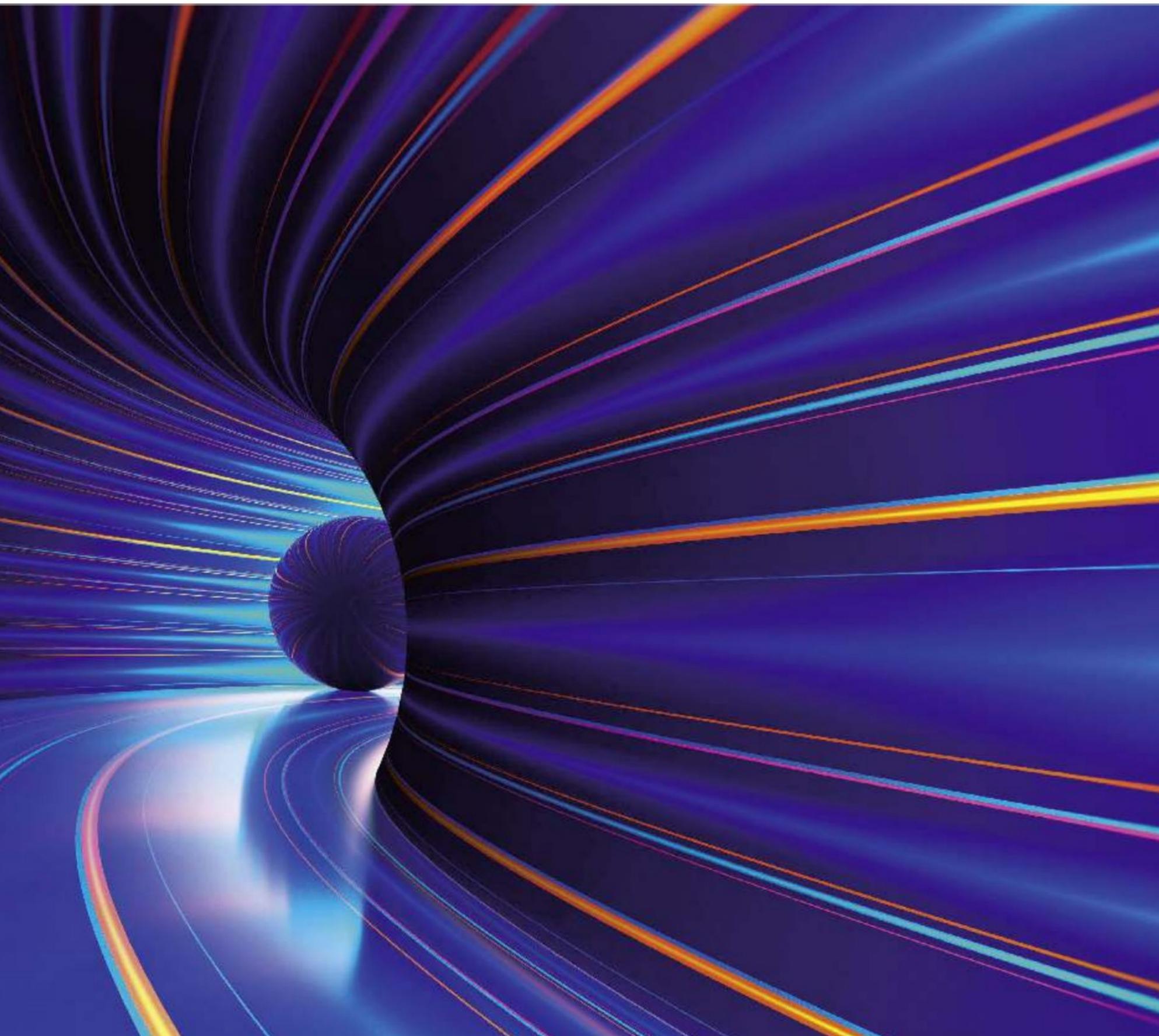
Les équations quantiques dépassent parfois l'entendement ordinaire. Ici, celles développées par le physicien Vincent Berger, ancien directeur du laboratoire Matériaux et Phénomènes quantiques au CNRS.



# Pourra-t-on passer par un trou de ver ?

L'hypothèse est fascinante : ces raccourcis spatio-temporels relierait certains trous noirs en formant des sortes de tunnels. Pour les experts de la physique quantique, les trous de vers seraient équivalents à l'intrication entre deux particules... PAR HUGO LEROUX

C'est une scène mythique du film *Interstellar* : une équipe d'astronautes emprunte un trou de ver pour voyager de Saturne vers une autre galaxie. Or, ces raccourcis dans l'espace-temps n'obnubilent pas que les réalisateurs. De nombreuses publications récentes, écrites par de très sérieux physiciens, explorent la vraisemblance de ces objets aussi fascinants qu'hypothétiques. Au point qu'en 2021, Juan Maldacena, professeur au prestigieux Institut des études avancées à Princeton – où Einstein a travaillé jusqu'à la fin de sa vie –, a carrément intitulé l'un de ses articles "Trous de ver traversables par des humains" (*Humanly*



*Traversable Wormholes*). Attention : ces spécialistes n'ont pas perdu les pédales et ne s'appêtent pas réellement à ouvrir des brèches dans la toile de l'Univers. Mais alors, quelle est la portée de ces travaux ?

### TROUS BLANCS

Remontons en 1915, lorsque Albert Einstein pose les bases de sa théorie de la relativité générale, qui conçoit l'Univers non pas comme une structure géométrique immuable, mais comme une sorte de toile d'espace-temps déformée par la présence de matière. En triturant les équations de la relativité générale, le physicien Karl Schwarzschild calcule alors la possibilité d'objets très particuliers, les

trous noirs. Ceux-ci sont si compacts qu'ils aspirent toute la matière dans leur voisinage immédiat, laquelle ne peut plus ressortir au-delà de leur "horizon". Tirant toujours le fil de ces équations, le même Einstein et un autre physicien, Nathan Rosen, imaginent vingt ans plus tard un autre scénario, tout aussi envisageable sur le plan mathématique : que deux trous noirs puissent être reliés entre eux par une sorte de "tunnel", formant un raccourci dans la trame de l'espace-temps. Plus précisément, que le premier trou noir aspire la matière pour la "recracher" de l'autre côté, via une sorte de trou noir inverse, nommé "fontaine blanche" ou "trou blanc". On parle alors de "ponts d'Einstein-Rosen". Oui, mais



en 1965, le physicien John Wheeler pointe un problème fondamental. Selon ses calculs, ce tunnel unidirectionnel ne peut exister que très momentanément, car il existe en son "centre" un nœud où la force de gravité est si puissante qu'elle provoque son effondrement rapide. Au passage, tout objet le traversant, même aussi petit qu'une particule de lumière, serait irrémédiablement détruit. Tant pis pour les trous de ver traversables...

Mais en 1980, l'astrophysicien Kip Thorne – qui deviendra par ailleurs conseiller scientifique du film *Interstellar* – produit une démonstration mathématique qui permet de sauver le concept, à condition de postuler l'existence d'une matière exotique de masse négative. "Celle-ci contrebalancerait la gravité, qui est liée à la masse, et permettrait donc de maintenir le nœud ouvert. Le problème, c'est que nous n'avons aujourd'hui aucun début de preuve expérimentale de

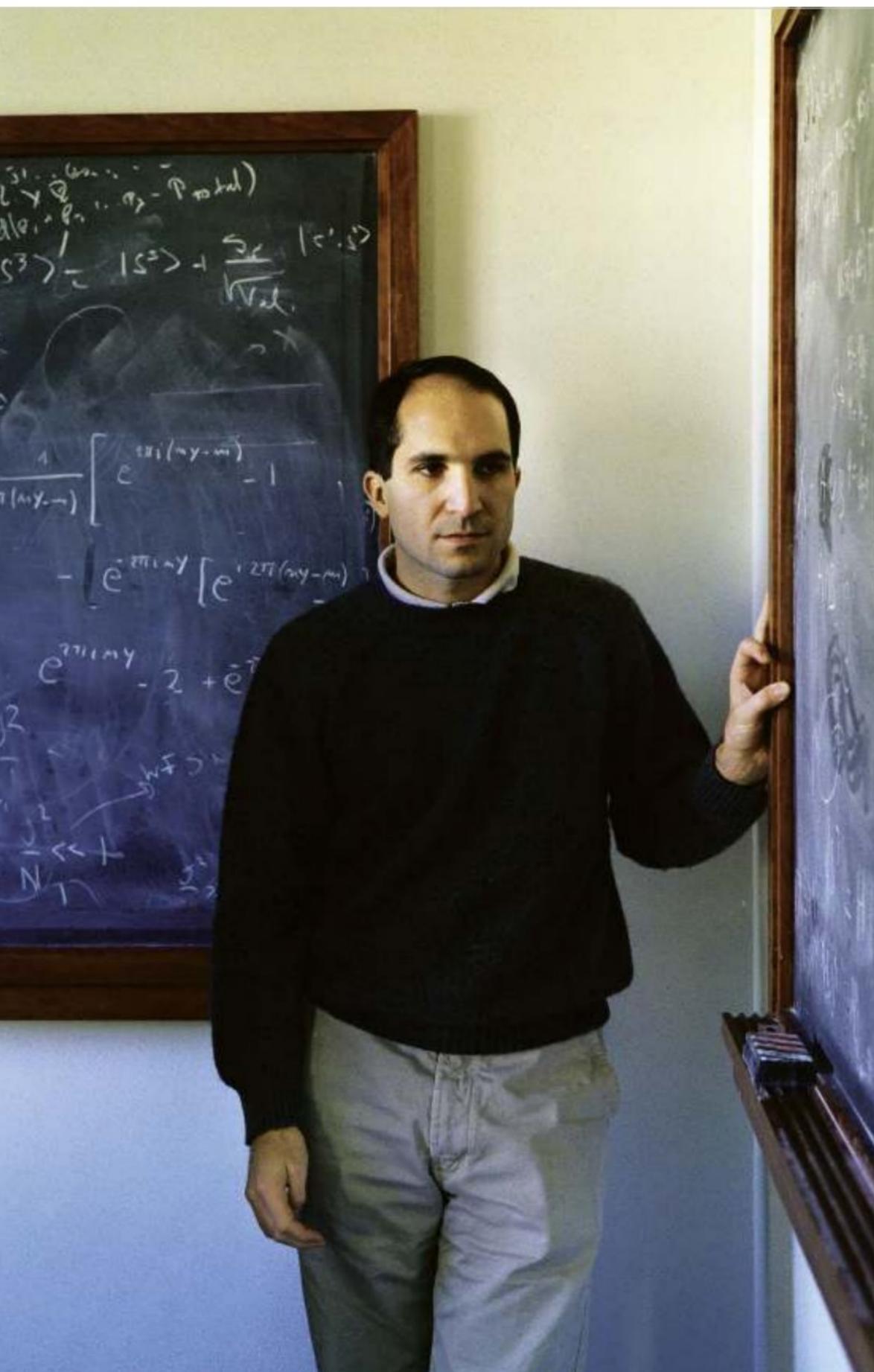
**Kip Thorne, prix Nobel de physique en 2017 pour avoir détecté des ondes gravitationnelles, est aussi l'auteur d'une démonstration mathématique accréditant l'existence des trous de ver.**

*l'existence de cette matière*", pointe Iosif Bena, chercheur à l'Institut de physique fondamentale (IPhT) de Paris-Saclay. C'est l'impasse : les trous de ver, tout comme les trous noirs d'ailleurs, semblent condamnés à rester des curiosités théoriques.

### **COURONNES DE PLASMA**

Sauf que les chercheurs ne vont pas en rester là. Tout bascule à nouveau au début du XXI<sup>e</sup> siècle. Les observations astronomiques suggèrent en effet que les trous noirs existent bel et bien ! "Plus précisément, on a une accumulation de preuves indirectes de l'existence d'objets très compacts et massifs, qui collent très bien à ce que la relativité générale prédit des trous noirs", résume Frédéric Vincent, astrophysicien à l'observatoire de Meudon.

*“ Nous n'avons pas la preuve que les structures supermassives que nous détectons sont toutes des trous noirs... Cela pourrait être des trous de ver ”*



Parmi ces indices, il y a les couronnes de plasma – sorte de soupe de matière extrêmement chaude – amassées à l’horizon de ces objets, ainsi que les mouvements d’étoiles anormaux à leur voisinage, dénotant une activité gravitationnelle puissante et caractéristique. Surtout, en 2015, on détecte des ondes gravitationnelles. Or, ces oscillations de la courbure de l’espace-temps pourraient être produites, entre autres explications, par des fusions de trous noirs !

Cette série de découvertes ravive les spéculations à propos des trous de ver. Dès 2013, Juan Maldacena et un autre physicien, Leonard Susskind, proposent un concept de

**Juan Maldacena est l’un des premiers physiciens à avoir émis l’hypothèse qu’un trou de ver reliant deux trous noirs serait de même nature que l’intrication quantique associant deux particules.**

trou non seulement traversable, mais qui ne recourt pas à une quelconque matière exotique. Selon eux, les trous de ver seraient en fait équivalents à l’intrication quantique entre deux particules. Vous avez bien lu : il s’agit de cette faculté mystérieuse – mais bel et bien prouvée – de deux particules à former un seul système en dépit de la distance qui les sépare.

### CINQ DIMENSIONS AU LIEU DE QUATRE

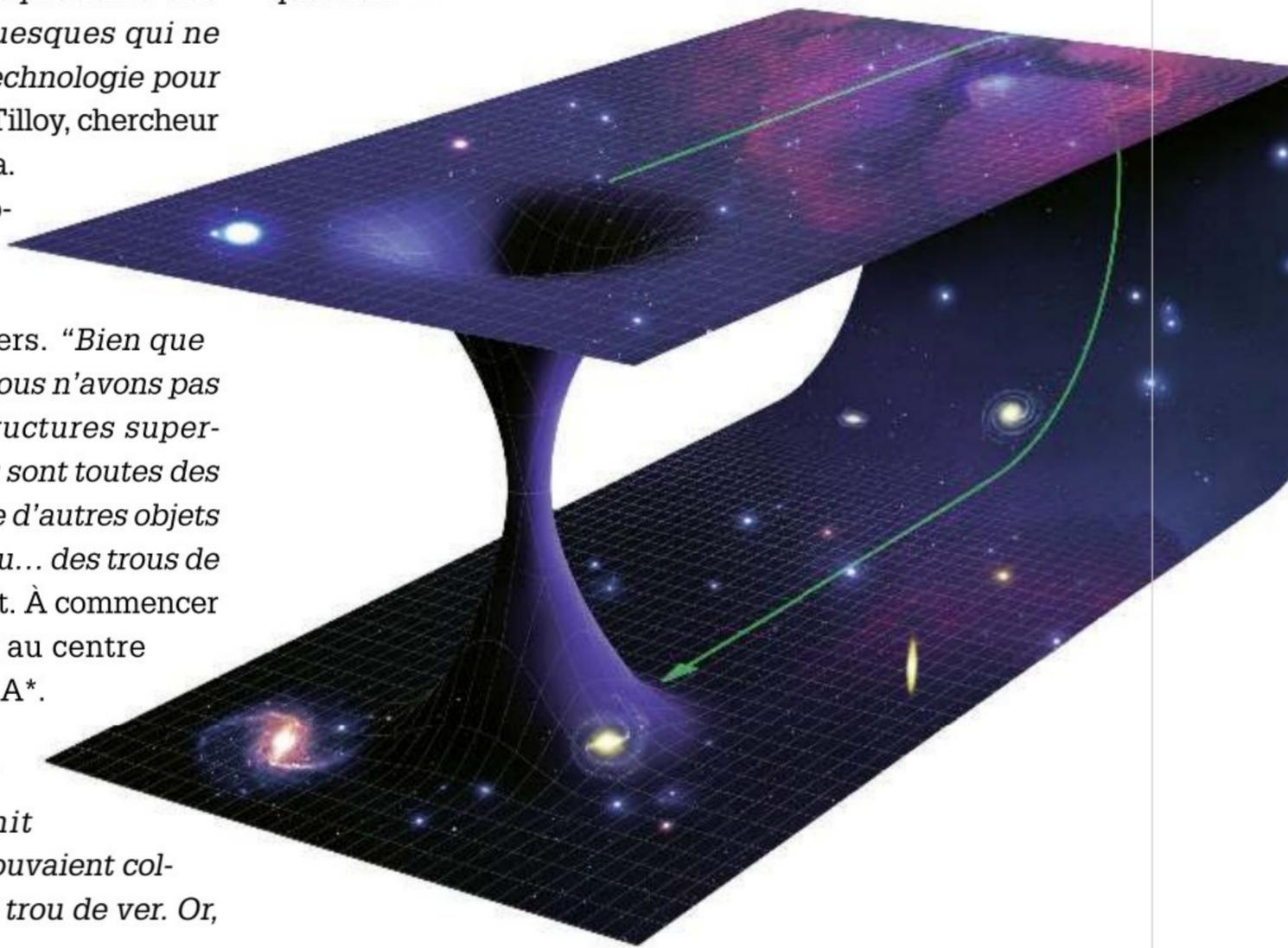
Cette conjecture ne sort pas de nulle part. Elle répond à un paradoxe soulevé en 1973 par Stephen Hawking. En appliquant les lois de la mécanique quantique aux trous noirs, le célèbre physicien avait remarqué que ceux-ci devaient dégager un infime rayonnement qui, à la longue, devait aboutir à leur dissipation totale. Or, cette dissipation impliquait que l’information contenue dans les particules “avalées” par le trou noir devait disparaître, *“ce qui viole radicalement les lois de la mécanique quantique, basées sur la conservation de l’information”*, souligne Iosif Bena. L’idée de Maldacena et Susskind résout ce paradoxe : des particules situées de part et d’autre de l’horizon du trou noir pourraient, grâce à l’intrication, réaliser cet échange d’information. Que les fans de SF ne s’emballent pas : *“ils appellent cela trous de ver traversables, mais on est loin des ponts d’Einstein-Rosen, car ils nécessitent des phénomènes de gravité quantiques, réservés à des objets de l’infiniment petit”*, tempère Pierre Vanhove, chercheur à l’IPhT.

Dans sa publication de 2021, Maldacena persiste et calcule que son concept de trou de ver pourrait, dans certaines conditions, être maintenu ouvert, et avoir des dimensions suffisantes pour y passer des objets macroscopiques – et pourquoi pas des humains. Il y a pourtant une subtilité de taille : ses calculs se placent dans un cadre théorique qui va au-delà de la relativité d’Einstein. Appelé théorie de Randall-Sundrum, ce cadre postule l’existence de 5 dimensions au lieu des 4 que nous connaissons. *“On troque donc ici la matière*

exotique contre un cadre théorique exotique, en quelque sorte”, résume Pierre Vanhove. Ce n’est pas pour autant de l’affabulation. “Les théoriciens passent aujourd’hui beaucoup de temps à imaginer des cadres visant à unifier la mécanique quantique et la relativité générale, c’est l’un des défis majeurs de la physique”, rappelle le spécialiste. Le hic, c’est que tous ces cadres, dont certains autorisent la possibilité de trous de ver traversables, restent au stade d’hypothèses. “Ils sont impossibles à vérifier de façon expérimentale, car ils prédisent des phénomènes qui se produisent à des échelles spatiales extrêmement petites. Pour les révéler, il faudrait produire des niveaux d’énergie gargantuesques qui ne sont pas à portée de notre technologie pour l’instant”, pointe Antoine de Tilloy, chercheur dans l’équipe Quantic à l’Inria.

En attendant, certains astronomes n’ont pas abandonné l’espoir d’observer un jour des trous de ver dans l’Univers. “Bien que les indices soient très forts, nous n’avons pas de preuve finale que les structures supermassives que nous détectons sont toutes des trous noirs. Ce pourraient être d’autres objets comme des étoiles à bosons ou... des trous de ver”, précise Frédéric Vincent. À commencer par le trou noir supermassif au centre de notre galaxie, Sagittarius A\*.  
 “Il y a quelques années, nous avons essayé de voir si des images qu’en fournit l’Event Horizon Telescope pouvaient coller avec certains modèles de trou de ver. Or,

la précision de nos données ne permet pas aujourd’hui d’affirmer ou d’infirmier cette hypothèse avec certitude”, poursuit l’astronome. Une manière de trancher consisterait à détecter les spirales de photons attirées par Sagittarius A\*.  
 “Cette couronne de lumière est prévue par la théorie dans le cas des trous noirs comme des trous de ver traversables, mais aurait une forme caractéristique s’il s’agissait du second, car la lumière pourrait entrer et ressortir du trou de ver”, illustre Frédéric Vincent. De futurs instruments dotés d’une meilleure sensibilité, comme le projet BHEX de la Nasa, pourraient trancher cette question. ■



## Un trou de ver créé sur un ordinateur quantique?

C’est l’exploit revendiqué par l’équipe de Daniel Jafferis, chercheur à Harvard, dans une publication de fin 2022 créant un buzz instantané. Sauf que... c’est faux. “Cette communication plus qu’exagérée a été largement critiquée par la communauté scientifique”, pointe Antoine

Tilloy, à l’Inria. En réalité, les chercheurs n’ont réalisé qu’un “analogue” de trou de ver. “Il s’agit d’un système simplifié du modèle réel”, précise le spécialiste. L’idée de Jafferis était d’utiliser les qubits d’un ordinateur quantique pour simuler le trou de ver qui peut résulter de l’intrication quantique

entre deux particules. “Or, le problème est double: d’abord l’analogie proposée est tellement simplifiée qu’il n’a plus rien à voir avec le phénomène original. Ensuite, l’ordinateur quantique n’a ici pas d’intérêt puisque ce modèle a déjà été simulé sur des ordinateurs classiques avec davantage

de précision”, résume Antoine Tilloy. En réalité, cette publication n’est qu’une tentative moyennement probante de résoudre un problème scientifique à l’aide d’un ordinateur quantique, à l’heure où les promoteurs de ces machines essaient de démontrer leur utilité concrète.” Dont acte.

# UNE PLONGÉE DANS L'HISTOIRE DES ILLUSTRATIONS MARINES!

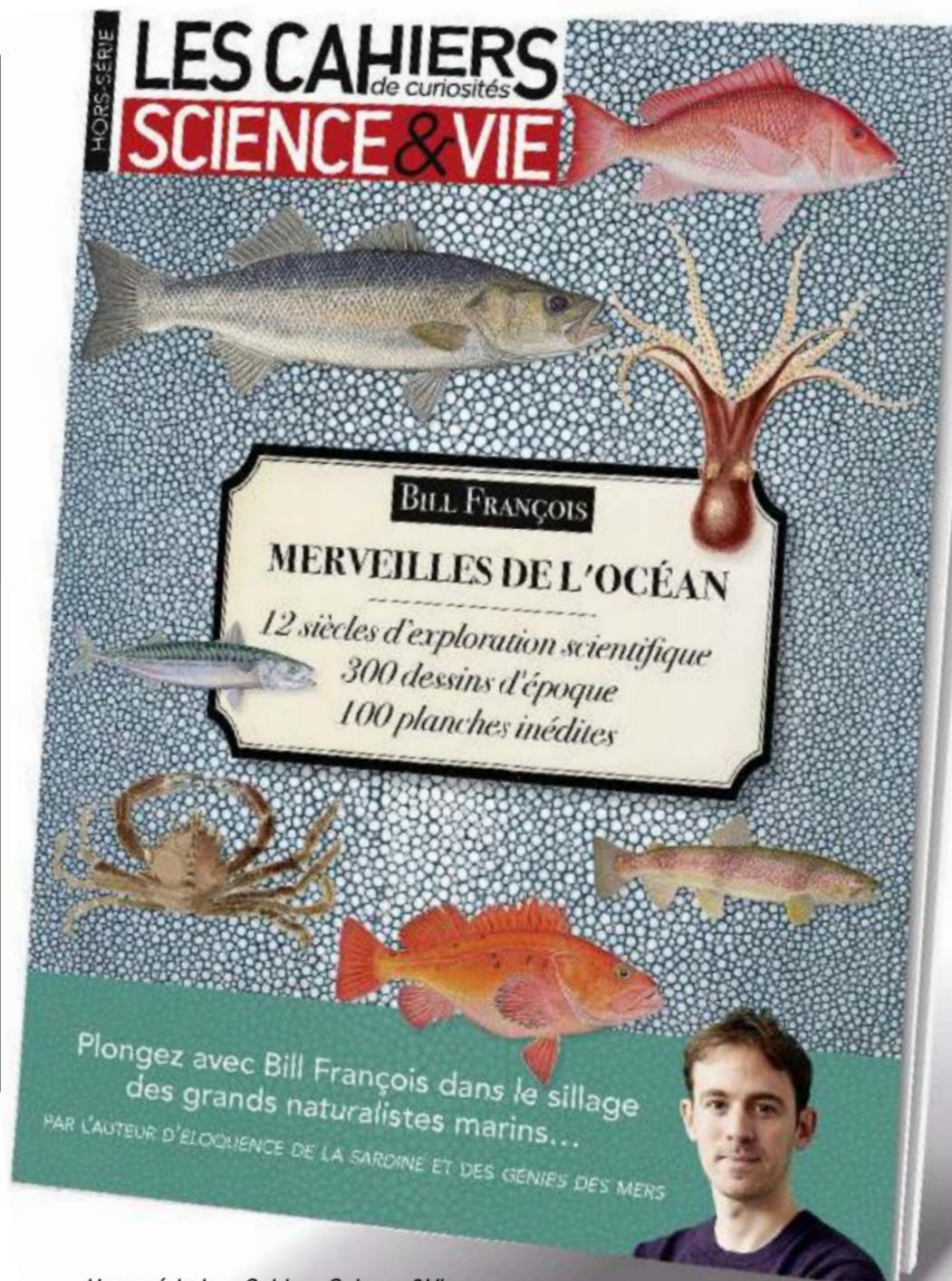
Les Cahiers de curiosités Science & Vie sortent un numéro exceptionnel sur les Merveilles de l'océan en collaboration avec l'auteur Bill François. Cet ouvrage nous invite à découvrir une véritable odysée à travers les dessins naturalistes marins, du Moyen-Âge jusqu'à nos jours. Mêlant l'esthétisme de ces œuvres d'art à des analyses scientifiques minutieuses, l'auteur nous révèle l'importance de ces œuvres dans la compréhension et la conservation des écosystèmes marins.

## LES POINTS FORTS DE CE LIVRE :

- Une sélection d'illustrations inédites et rares issues de collections prestigieuses et de bibliothèques.
- L'humour et les anecdotes au service de la science: Bill François redonne vie aux récits de ces hommes qui ont œuvré pour la recherche des sciences du vivant.
- Un hommage aux naturalistes et un regard vers l'avenir qui nous invite à réfléchir aux enjeux contemporains de la préservation de la biodiversité.



**19,90**  
seulement



Hors-série Les Cahiers Science&Vie.  
148 pages, Dimensions : 19,5 x 27 cm.

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

## BON DE COMMANDE

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

Oui je commande	Réf	Qté	Prix	Total
Hors-série "Merveilles de l'océan"	430 934		19,90 €	
Envoi en COLIECO. Livraison : 2 semaines après enregistrement de ma commande.				+ 4,00 €
<b>MONTANT TOTAL DE MA COMMANDE</b>				€

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](http://www.kiosquemag.com)

Offre valable France Métropolitaine valable jusqu'au 30/06/2025 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 REWORLD 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, de rectification, d'effacement de vos données ainsi que d'un droit d'opposition en écrivant à RMM-DPD, c/o service juridique, 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux, ou par mail à [dpd@reworldmedia.com](mailto:dpd@reworldmedia.com). Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - [www.cnil.fr](http://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](http://www.kiosquemag.com).

## MES COORDONNÉES (\* A remplir obligatoirement)

# M091 # V 1659143

Nom\*

Prénom\*

Adresse\*



Code Postal\* Ville\*

E-mail (Votre adresse e-mail ne sera pas communiquée à des partenaires extérieurs à des fins commerciales)

Téléphone portable de préf.

Date anniversaire

(Pour envoi de sms si problème de livraison)

(Pour fêter votre anniversaire)

- Je ne souhaite pas recevoir les offres Privilège 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!



# LE WEB RÊVE DE TÉLÉPORTATION

La téléportation quantique d'information est (sans doute) l'avenir d'internet. **Avantage :** sécuriser les réseaux. **Inconvénient :** l'intrication ne tient pas sur les longues distances. PAR SANDRINE MARY

**E**n 2024, plusieurs équipes dans le monde ont réussi à réaliser la téléportation d'information sur des distances supérieures à 10 km dans des zones urbaines : en Chine, au centre de recherche de Hefei ; en Europe, à l'université de Delft ; et aux États-Unis, à l'université de Harvard. *“C'est une prouesse qui ouvre la voie à un futur internet quantique, car ils ont pu utiliser ce que l'on appelle des mémoires quantiques pour augmenter les distances. Il sera possible de connecter des ordinateurs quantiques, mais aussi de communiquer via des réseaux ultra sécurisés, explique Sophie Hermans, chercheuse au Caltech (California Institute of Technology). Mais avant cela, il faudra surmonter de nombreux obstacles”*, ajoute-t-elle.

En téléportation quantique, un état quantique inconnu est transmis d'un endroit, appelé l'émetteur – nommons-le Alice –, vers un autre, appelé le récepteur – Bob (voir ci-contre). Pour y parvenir, il est nécessaire d'établir deux canaux entre Alice et Bob : un canal quantique et un canal classique. Le canal quantique consiste en une paire de photons intriqués qu'Alice et Bob partagent. Une autre entité, appelée Charlie, fournit l'information quantique à téléporter à Bob. Alice va intriquer son qubit avec celui de Charlie, puis elle réalise une mesure, ce qui a pour effet de détruire l'information quantique de Charlie (selon les lois de la mécanique quantique), pour la téléporter chez Bob. Cependant, pour que Bob puisse interpréter l'information

reçue, Alice lui envoie les résultats de sa mesure via un canal classique.

*“L'information ne voyage pas à travers les fibres optiques et les résultats d'Alice ne lui donnent aucune connaissance de*

**Réseau de téléportation d'information réalisée à l'université d'Hefei en Chine, en 2024. Trois qubits composés chacun d'un atome de Rubidium refroidi peuvent être intriqués deux à deux grâce au serveur central qui envoie les paires de photons intriqués.**



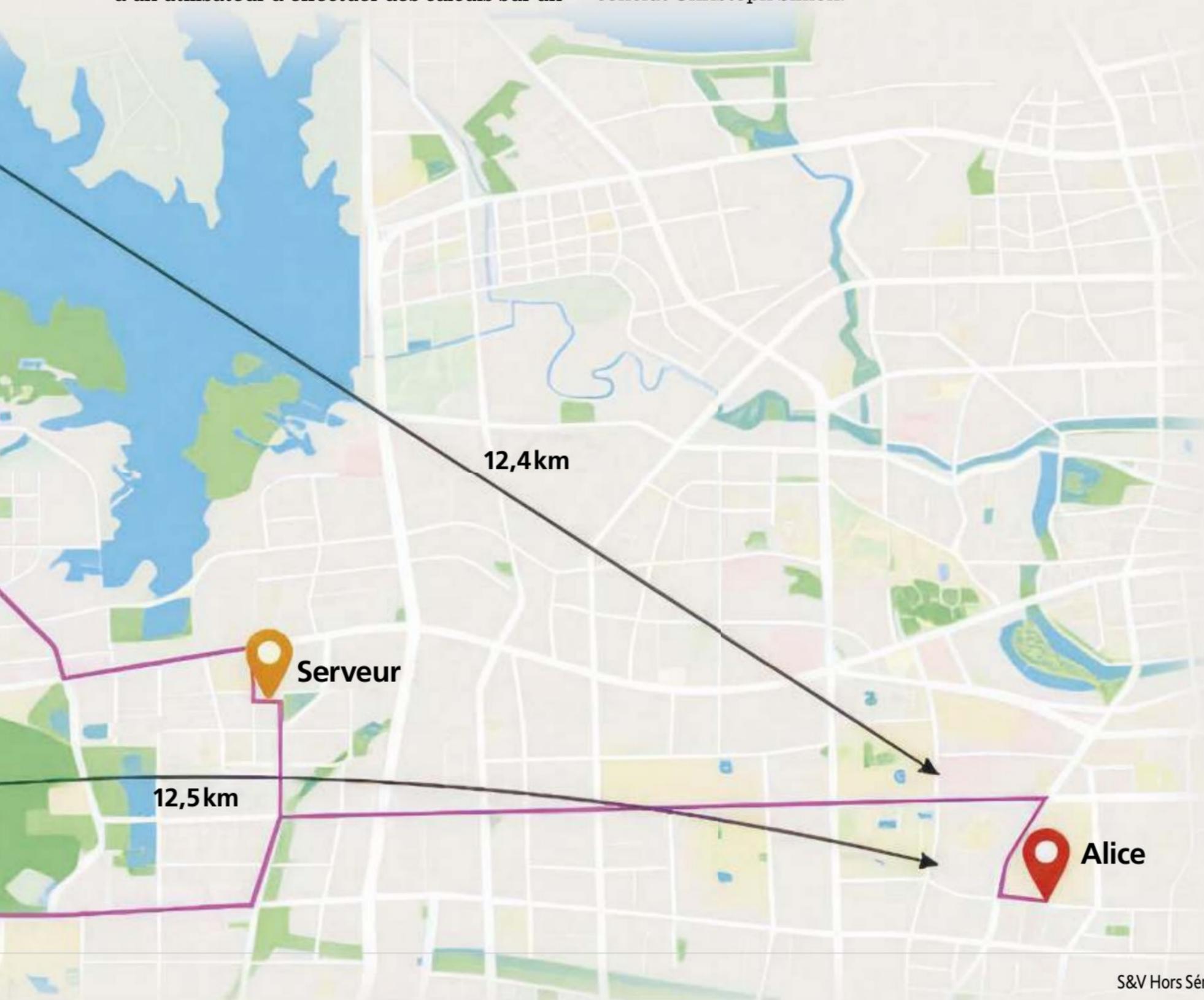
*l'information à téléporter, mais seulement des corrections que Bob doit appliquer pour l'interpréter. C'est pourquoi cette communication est ultra sécurisée. Cependant, il faut bien comprendre que le canal classique limite la vitesse de téléportation, qui n'ira jamais plus vite que la vitesse de la lumière. La téléportation ne permet donc pas de gagner du temps, mais elle sécurise les données",* explique Sophie Hermans.

### SURMONTER LA DISTANCE

De tels réseaux pourraient permettre de distribuer des clés de cryptage, appelées QKD (quantum key distribution), entre deux parties afin de rendre la communication totalement inviolable. C'est l'une des applications les plus connues de la téléportation quantique. *"Cela permettrait surtout des calculs quantiques à l'aveugle, donnant la possibilité à un utilisateur d'effectuer des calculs sur un*

*ordinateur quantique n'importe où dans le monde sans que ce dernier connaisse le calcul effectué",* ajoute Christoph Simon, chercheur à l'université de Calgary.

Un des obstacles à surmonter est la distance de communication. Au-delà d'une centaine de kilomètres, les photons perdent leur intrication en interagissant avec leur environnement. Il n'est pas possible de les amplifier, car les copier leur ferait perdre leur état quantique. *"Nous développons des mémoires quantiques et des répéteurs quantiques qui permettent de conserver l'intrication sur de plus longues distances, mais il faut envisager un réseau quantique hybride, utilisant des fibres optiques ou des satellites en fonction des distances à parcourir. Selon moi, la question n'est plus de savoir si nous aurons un réseau quantique global, mais seulement quand et comment nous y parviendrons",* conclut Christoph Simon. ■



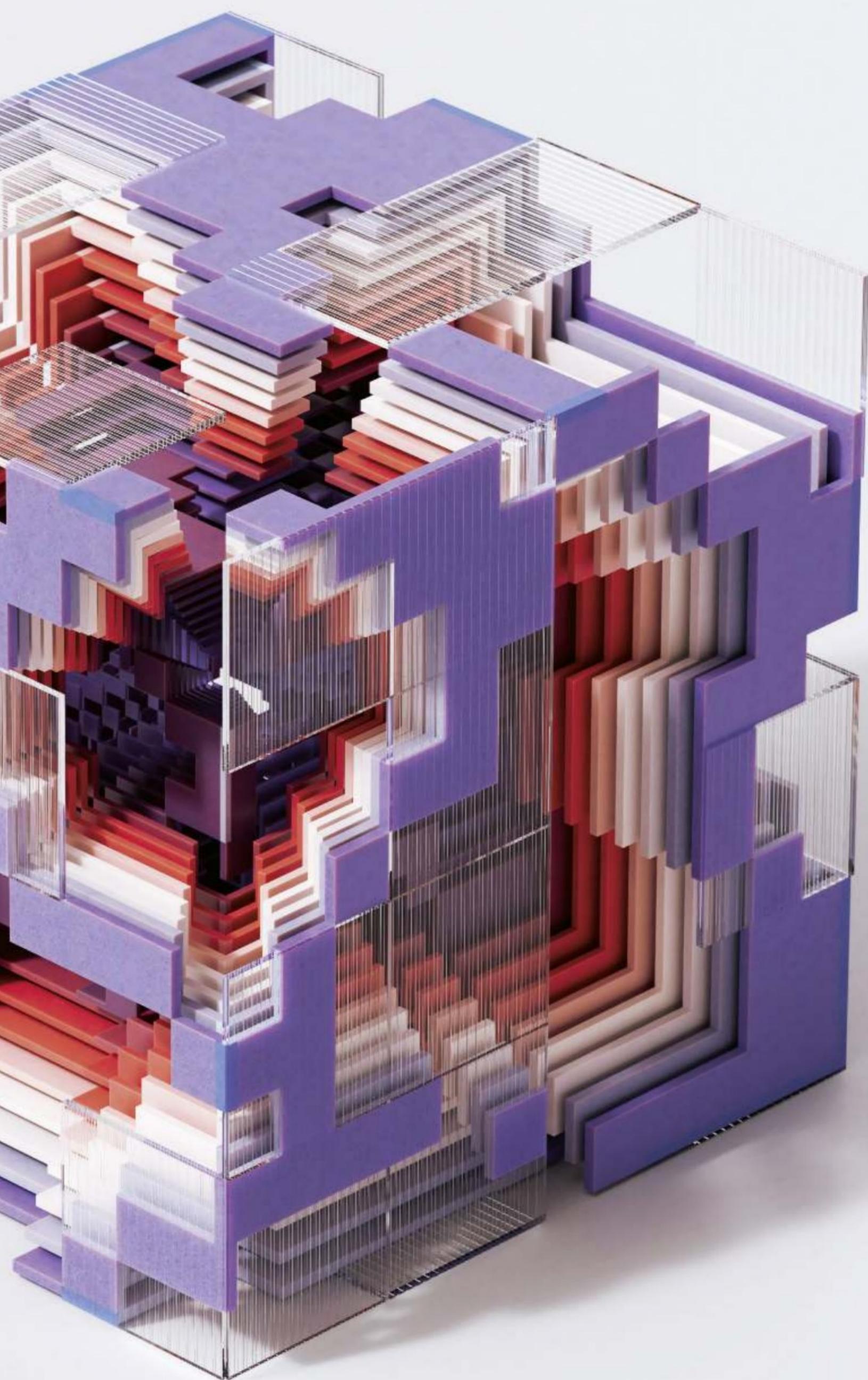
# Vers la cryptographie ultime ?

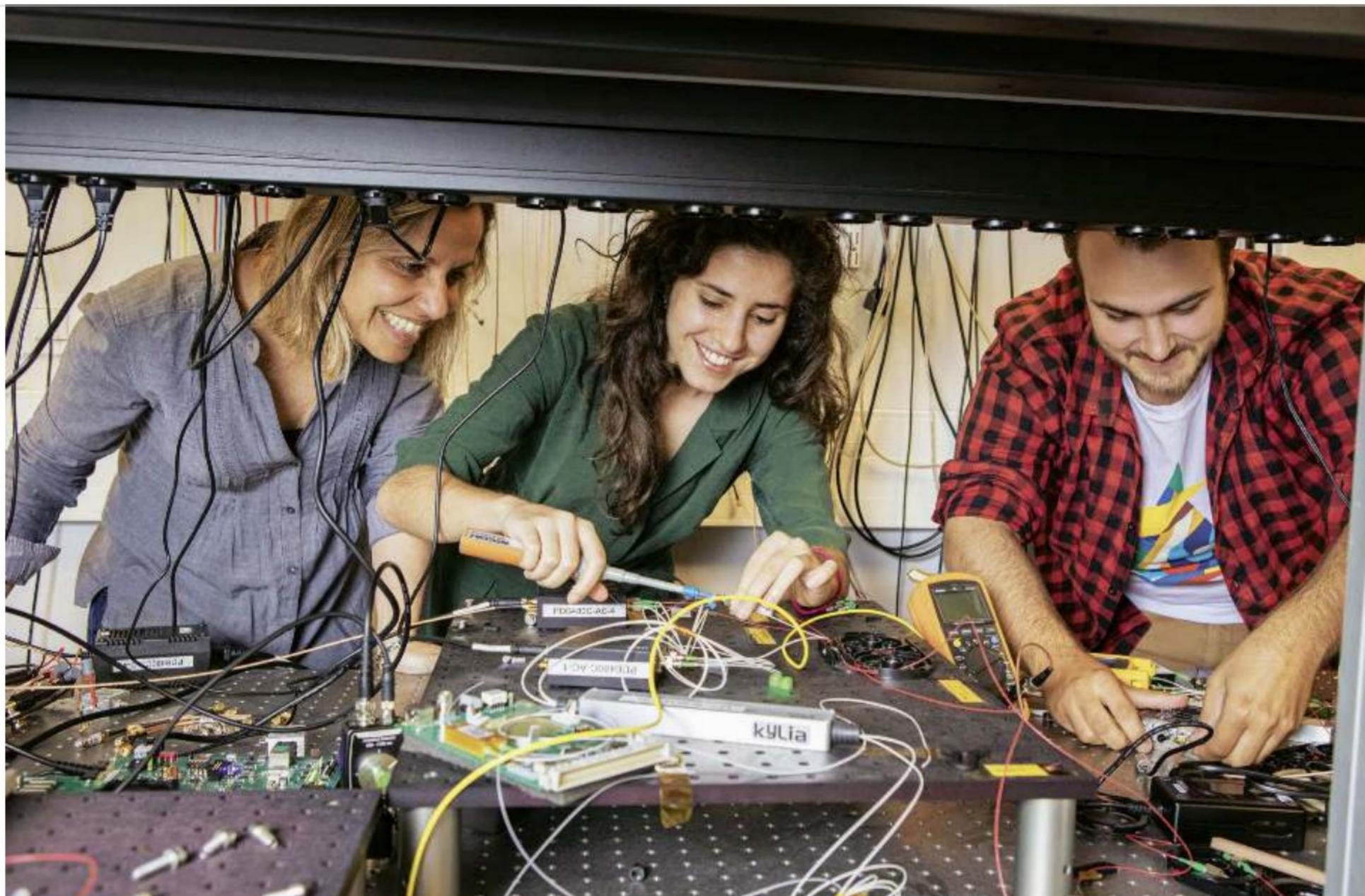
Pour les militaires, l'avenir de la cryptographie et de la détection est quantique. Une course mondiale est lancée pour la maîtriser. PAR ADRIEN DENÈLE

**E**nvoyer un message secret ? Depuis toujours, c'est une gageure ! Les messagers : capturés. Les pigeons voyageurs : abattus. Les téléphones : sur écoute. Les messageries sur internet : espionnées ! Eh bien, cette ère sera peut-être bientôt révolue grâce à la cryptographie quantique. "Inviolable", "communication ultime"... Les superlatifs s'empilent pour louer cette technologie tirant parti des lois étranges de la physique quantique.

Le principe en est simple. "*En cryptographie quantique, la physique quantique permet de distribuer secrètement une clé de chiffrement, utilisée ensuite pour crypter les messages*", résume Hugo Defienne, physicien CNRS à l'institut des nanosciences de Paris. Si l'on compare un message à une lettre, alors la clé serait l'enveloppe. Or, cette enveloppe







## LA FRANCE A TAQUET

La cryptographie quantique repose sur des échanges de clés sécurisées, via des systèmes de communication optiques, comme ici sur cette expérience en banc d'essai, au laboratoire de recherche en informatique de Sorbonne Université (LIP6). Eleni Diamanti (à gauche), directrice du Paris Center for Quantum Technologies, est la lauréate de la médaille 2024 de l'innovation du CNRS.

quantique a une particularité : quiconque l'ouvre l'écorne, et il devient donc possible de savoir si une conversation est espionnée. Une révolution par rapport à la cryptographie classique, comme l'explique Nicolas Sangouard, théoricien et directeur de recherche au CEA. *“Avec les systèmes RSA [du nom de ses créateurs, Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adelman, NDLR] utilisés aujourd'hui, on garantit la sécurité à l'aide d'un problème jugé trop complexe à résoudre, comme trouver les nombres premiers à l'origine d'un nombre plus complexe.”* À l'heure actuelle, aucun algorithme n'est capable de résoudre ces problèmes rapidement.

Mais ce système n'est plus inviolable depuis mai 2024, puisque des chercheurs

de l'université de Shanghai sont parvenus à en déchiffrer des données cryptées grâce à des prototypes d'ordinateurs quantiques ! La sécurité assurée par le RSA sera donc bientôt caduque...

À moins d'utiliser *“un autre ordinateur quantique pour la cryptographie !”*, assure Nicolas Sangouard, qui en explique les fondements. *“Si on partage une paire de particules intriquées et qu'on les interroge, on va obtenir des résultats intrinsèquement non prédictibles, mais vous et moi aurons le même résultat.”* D'où l'idée proposée dès 1984 par Gilles Brassard et Charles Bennet : leur protocole BB84 permet d'obtenir une clé de sécurité, composée de qubits “parfaitement corrélés”. Avec un seul objectif : repérer toute tentative d'espionnage.

### USAGE LIMITÉ AUX LABORATOIRES

*“Si une seule étape de la création de la clé ne fonctionne pas, alors on jette le système”*, résume Nicolas Sangouard. En effet, qui dit mesure physique des photons par une entité extérieure dit décorrélation, donc erreur. Autrement dit, soit la clé est créée

et personne n'observe l'échange de messages, soit elle est détruite avant même l'envoi. *"Pour l'instant, les usages sont limités à des laboratoires, souligne cependant le spécialiste. L'enjeu actuel est de concevoir des systèmes capables de fonctionner, même avec des appareils en lesquels nous n'aurions pas confiance !"*

Tout un chacun pourra-t-il un jour les utiliser ? La réponse est négative : *"La cryptographie quantique restera un secteur de niche, avertit Nicolas Sangouard, réservé à certains domaines comme la santé ou le militaire, où un simple oui ou non est décisif."* *"Au sein du ministère des Armées, la direction générale de l'armement (DGA) identifie deux utilisations possibles : l'établissement d'un canal de communication longue distance ultra sécurisé, et une interconnexion des capacités de calcul ou de détection",* nous confie Cyril Caudron, responsable du pôle presse au sein de la DGA française. De plus, système inviolable n'est pas synonyme d'indestructible. *"Les réseaux resteront des canaux de fibres optiques dédiés. Ils peuvent donc être détruits",* rappelle Nicolas Sangouard.

## RÉSEAUX CRYPTÉS SATELLITAIRES

L'autre grand enjeu est d'augmenter les distances, soit grâce à une multiplication de points d'accès, soit par des communications satellites, plus difficiles à altérer. Sur ce point, la Chine a pris de l'avance. En 2017, le groupe du physicien Anton Zeilinger et son homologue chinois Jian-Wei Pan sont



Des photons intriqués peuvent être générés à l'aide d'une "molécule photonique" (ici vue au microscope à balayage électronique, lors d'une expérience menée par le laboratoire de photonique et de nanostructures), dans laquelle ils adoptent un comportement moléculaire. Leurs propriétés seront ensuite liées.

parvenus à réaliser un échange vidéo entre Pékin et Vienne, via des réseaux cryptés satellitaires, grâce au lancement du satellite chinois Micius. Mais même dans l'air et dans l'espace, *"de mauvaises conditions atmosphériques peuvent dégrader considérablement la qualité du signal encodé",* remarque Cyril Caudron.

Cependant, l'Europe et la France ne sont pas en retard, assure Samuel Saada, chargé de mission au CEA : *"Nous avons un grand plan quantique, afin de créer une communauté de chercheurs, allant de l'algorithme à la salle blanche en passant par les start-up."* L'Europe a également la chance de *"posséder plusieurs laboratoires aux expériences diverses et riches",* précise Nicolas Sangouard. Le Vieux Continent reste dans la course. ■

## UNE IMAGE INVISIBILISÉE

Deux chercheurs français, Hugo Defienne et l'étudiante en troisième année de thèse Chloé Vernière, de Sorbonne Université, viennent de créer un "chat de Schrödinger" d'un nouveau genre. En encodant une image classique, réalisée par une caméra, sur des photons intriqués, elle devient invisible...

*"Alors que l'encodage classique est une modulation de l'intensité ou de la phase de la lumière, nous varions la corrélation entre les photons."* Un processus complexe, puisqu'il faut

d'abord intriquer des photons. *"Nous avons ajouté une étape, explique Hugo Defienne, qui consiste à placer l'information de l'image en fonction du positionnement spatio-temporel des photons."* L'idée : transmettre une image *"même à travers des milieux occultants",* ajoute Chloé Vernière. Alors qu'un "brouillard" peut atténuer l'intensité lumineuse et donc le signal d'une image, leur méthode n'a pas ce problème, car l'information nécessite peu de photons. *"Notre signal est plus*

*résistant au bruit, même s'il n'est pas crypté."* Le projet pourrait néanmoins se rapprocher de la cryptographie. Par exemple en étant combiné aux cryptages quantiques par clés. *"C'est une idée intéressante de mélanger les deux",* admet Hugo Defienne. Mais pour l'heure, les applications recherchées restent dans le domaine de l'imagerie. *"Cette méthode pourrait améliorer l'imagerie cellulaire par microscope, obtenue souvent dans des tissus diffusants",* précise le chercheur.

# UN CASSE-TÊTE ÉNERGÉTIQUE

Comment éviter une explosion de la demande énergétique due à l'essor de la technologie quantique ? Les chercheurs se tournent vers une nouvelle classe d'experts : les thermodynamiciens.

PAR ADRIEN DENÈLE

L'impact des futures technologies quantiques sur la demande énergétique pourrait être colossal, à la manière des IA qui entraînent d'ores et déjà pénuries de composants stratégiques et hausses brutales de la consommation électrique. On estime ainsi que la demande électrique des centres de données aux États-Unis devrait doubler d'ici à 2030. Comment éviter que l'essor des qubits n'induisse un "chaos quantique" ?

Pour Alexia Auffèves, directrice de recherche au Majulab de Singapour et promotrice de la Quantum Energy Initiative, *"il faut intégrer le coût énergétique dans les modèles dès maintenant, et choisir d'optimiser les processeurs quantiques en fonction de leur efficacité énergétique, plutôt qu'en fonction du temps de calcul"*. L'idée peut sembler simple sur le papier, mais elle est complexe à mettre en place. Car l'impact énergétique sera lié à de multiples paramètres : composants, algorithmes de calculs, position géographique des centres de données... C'est pourquoi *"nous développons des standards d'efficacité énergétique au sein d'un groupe de travail dédié à l'Institut d'ingénieurs électriques & électroniques"*, précise-t-elle.



Cependant, certaines applications quantiques pourront être synonymes d'économies. Tout d'abord, en améliorant les capacités actuelles, grâce à des algorithmes plus efficaces. "Au lieu d'avoir un ordinateur plus performant, un ordinateur avec la puissance de calcul moderne pour moins d'énergie est très avantageux", souffle ainsi Hugo Defienne, directeur de recherche au CNRS. Ensuite, en optimisant le coût énergétique des machines quantiques elles-mêmes. "Les deux axes sont complémentaires et s'installent doucement dans le paysage au travers de différents consortiums et initiatives", précise Alexia Auffèves. La course est donc lancée vers les économies d'énergie.

Pour ce faire,  
ingénieurs

*Il faut optimiser les processeurs quantiques en fonction de leur efficacité énergétique, plutôt qu'en fonction du temps de calcul*

et scientifiques disposent d'un outil vieux comme la première révolution industrielle : la thermodynamique. Au XIX<sup>e</sup> siècle, cette science de l'énergie a cherché à évaluer l'efficacité des machines en termes de coût énergétique. Avec l'essor de la quantique, une nouvelle sorte de thermodynamicien émerge, comme l'indique Nicole Yunger Halpern, du National Institute of Standards and Technology de l'université du Maryland (États-Unis) : "Nous, les 'thermodynamistes quantiques', sommes bien positionnés pour évaluer les limites fondamentales des capacités des ordinateurs quantiques, et pour déterminer dans quelles conditions ces derniers peuvent surpasser les ordinateurs classiques en termes de coûts énergétiques."

#### LE VIEUX MONDE RÉSISTE

Car pour des tâches classiques, les processeurs quantiques sont soumis à rude concurrence. Un exemple : celui de Google, "Sycamore" et ses 70 qubits, accomplit une tâche donnée en 600 secondes et en consommant 4,3 kWh d'énergie électrique... Une consommation moindre que celle des ordinateurs classiques, semblait-il, jusqu'à ce qu'un consortium chinois parvienne au même résultat en 14 secondes et pour seulement 2,39 kWh avec un système "classique" – tout de même composé de 2 300 processeurs "A100" ! À l'heure où l'on imagine des réfrigérateurs quantiques composés de quelques atomes, la science à l'ancienne et ses bons vieux frigos ont donc encore de beaux jours devant eux ! ■

# “Et si notre réalité était une simulation informatique ?”

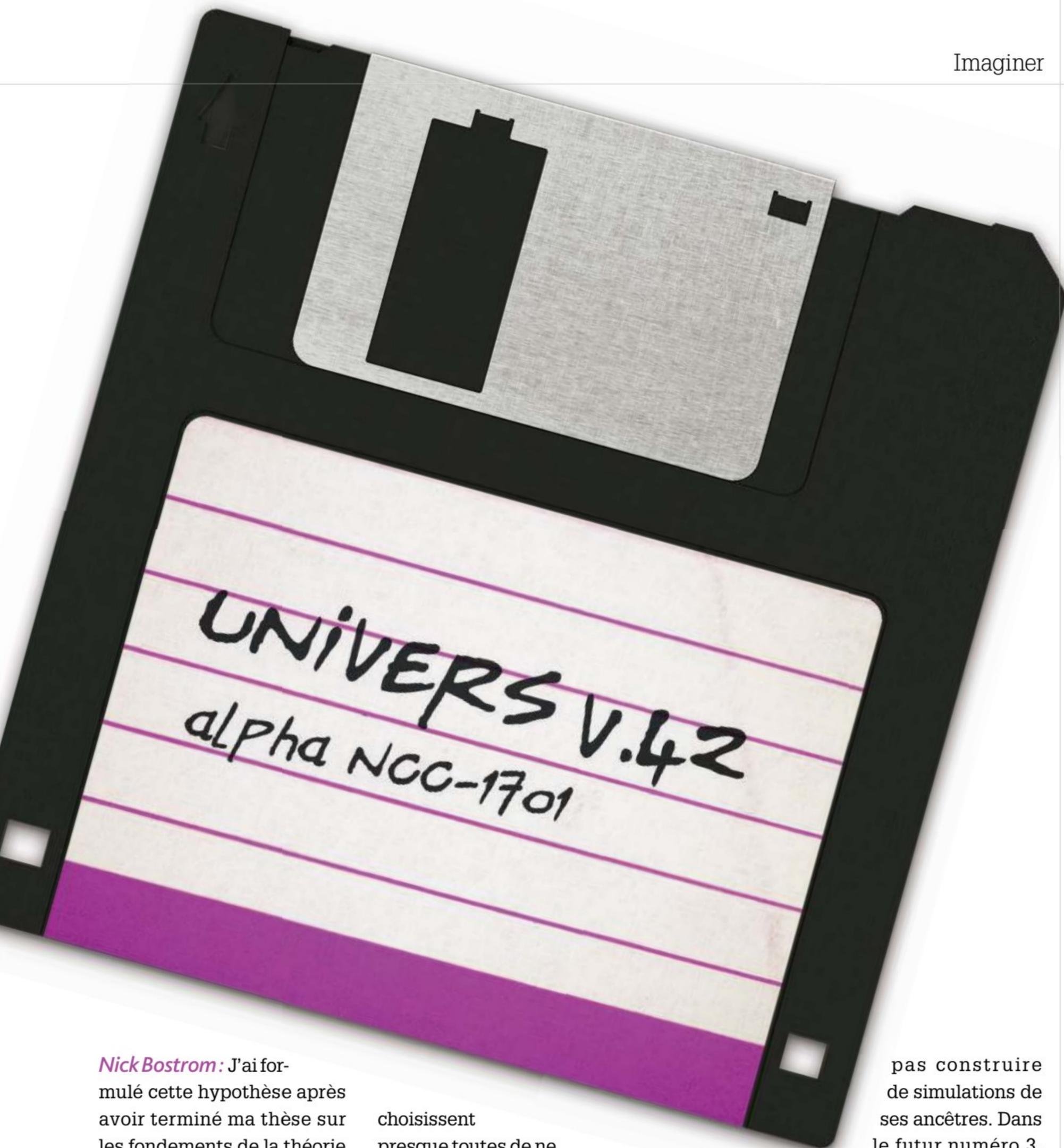
Des scientifiques convoquent la physique quantique pour tenter de prouver que nous vivons dans un univers inventé par une civilisation plus développée que la nôtre. Explications du physicien Melvin M. Vopson\* et du philosophe Nick Bostrom\*\*. PAR ARMELLE CAMELIN



**SVHS: Qu'est-ce que la théorie de l'univers simulé ?**

**Melvin M. Vopson :** La théorie de l'univers simulé propose que notre réalité objective est, en fait, une construction artificielle, composée de bits d'information, semblable à une simulation informatique. L'idée philosophique selon laquelle la réalité est une illusion n'est pas nouvelle ; ses origines remontent à la Grèce antique, où deux grandes idéologies ont vu le jour : le

matérialisme et l'idéalisme. À l'époque moderne, le concept d'univers simulé est apparu comme une extension de l'idéalisme, poussé par les avancées technologiques récentes dans le domaine de l'informatique et des technologies numériques. La croissance exponentielle de la puissance de calcul et le développement d'environnements de réalité virtuelle ont alimenté les spéculations sur la possibilité de simuler des univers entiers. En 2001, Nick Bostrom a formulé l'hypothèse de simulation, postulant qu'une civilisation avancée pourrait créer des simulations si sophistiquées qu'elles seraient indiscernables de la réalité. Puis le physicien Seth Lloyd a avancé l'idée étonnante que l'Univers lui-même pourrait fonctionner comme un ordinateur quantique complexe, calculant sa propre existence...



**Nick Bostrom** : J'ai formulé cette hypothèse après avoir terminé ma thèse sur les fondements de la théorie des probabilités. L'argument de simulation est un raisonnement probabiliste qui suggère qu'au moins l'une des trois propositions suivantes est vraie : 1) les civilisations, à notre stade de développement, s'éteignent presque toutes avant d'atteindre une maturité technologique ; 2) les civilisations technologiquement avancées

choisissent presque toutes de ne pas créer de simulations de leurs ancêtres ; 3) il est très probable que nous vivons dans une simulation informatique. Pour le dire autrement, dans le futur numéro 1, l'humanité disparaît avant d'avoir atteint la maturité technologique. Dans le futur numéro 2, l'humanité atteint la maturité technologique, puis décide de ne

pas construire de simulations de ses ancêtres. Dans le futur numéro 3, l'humanité atteint la maturité technologique, puis décide de construire des simulations de ses ancêtres. Ces trois futurs se partagent l'espace complet des possibilités, ce qui signifie qu'un seul d'entre eux se produira. Donc, si l'humanité atteint la maturité technologique et décide de construire des simulations

# “ L'idée philosophique selon laquelle la réalité est une illusion n'est pas nouvelle ; ses origines remontent à la Grèce antique ”

de ses ancêtres, alors nous vivons presque certainement dans une simulation. Imaginons qu'une société humaine avancée décide de réaliser 999 simulations du XXI<sup>e</sup> siècle, peut-être pour étudier l'histoire, ou pour une autre raison. Ces simulations sont si réalistes qu'elles sont impossibles à distinguer de la réalité – du moins du point de vue des personnes simulées qu'elles contiennent. Nous nous trouvons dans la position de personnes vivant dans ce qui semble être le XXI<sup>e</sup> siècle. Comment savons-nous si nous occupons le vrai XXI<sup>e</sup> siècle ou l'une des 999 simulations ? Il semble qu'il n'y ait qu'une chance sur mille que le monde que nous percevons soit le vrai...

**SVHS :** *Quelles sont les conséquences de la théorie de l'univers simulé sur nos lois physiques actuelles ?*

**M.M.V. :** Au cœur de l'hypothèse de l'univers simulé se trouve l'idée que l'Univers dans lequel nous vivons, avec toutes ses galaxies, étoiles, planètes et formes de vie, est une simulation soigneusement programmée. Dans ce scénario, les lois physiques qui régissent notre réalité

ne sont que des algorithmes informatiques, et les expériences tangibles que nous avons ne sont que le produit des processus computationnels d'un système doté d'une avancée technologique immense. Cependant, que la théorie de la simulation soit vraie ou non, cela ne change rien à nos vies, car nous

n'avons pas de cadre de référence pour distinguer ce qui est réel de ce qui ne l'est pas.

**SVHS :** *Et sur les notions philosophiques traditionnelles de réalité et d'existence ?*

**N.B. :** Cela implique une réévaluation radicale de notre place dans le monde et de nos perspectives d'avenir, et il faut du temps pour intégrer une telle idée. Je résiste à l'idée selon laquelle, si nous sommes dans une simulation, le monde que nous percevons ne serait pas réel. Nos expériences sont réelles, et une grande partie de notre environnement



peut également l'être ; il s'agit simplement d'une réalité simulée. En d'autres termes, son ancrage ultime serait dans des processus se déroulant à l'intérieur d'ordinateurs puissants créés par une civilisation avancée. Pour des raisons pratiques, cela pourrait ne pas changer grand-chose.

**SVHS :** *Quels sont les liens entre physique quantique et univers simulé ?*

**M.M.V. :** La simulation d'un univers entier nécessiterait une puissance de calcul colossale. Bien que les ordinateurs quantiques soient encore à un stade embryonnaire de développement, ils

surpassent déjà les capacités des ordinateurs classiques numériques de plusieurs ordres de grandeur. Si l'Univers était effectivement une simulation, il est fort probable qu'un ordinateur quantique ultime ou des processus encore plus avancés seraient chargés de faire fonctionner cette simulation.

**SVHS :** *Melvin M. Vopson, vous proposez une nouvelle loi de la physique appelée deuxième loi de l'infodynamique dans vos travaux. De quoi s'agit-il et comment soutient-elle l'idée d'un univers simulé ?*

**M.M.V. :** Cette loi stipule que le contenu informationnel

associé à tout événement ou processus dans l'Univers doit être minimisé. En d'autres termes, tout semble évoluer vers un état d'équilibre où le contenu d'information est le plus réduit possible. La minimisation de ce contenu signifie une optimisation ou une compression efficace des données. Pour simuler un Univers aussi complexe que le nôtre, il serait donc nécessaire d'intégrer un mécanisme d'optimisation et de compression des données afin de diminuer la puissance de calcul et les besoins de stockage. La deuxième loi de l'infodynamique se manifeste dans notre environnement, que ce soit dans les données numériques, les systèmes biologiques, les systèmes atomiques, les symétries mathématiques ou l'Univers dans son ensemble, soutenant ainsi la théorie de simulation.

**SVHS :** *Quels défis rencontrez-vous en communiquant sur l'univers simulé ?*

**N.B. :** Une idée reçue fréquente est que créer ce type

“ Nous n'avons pas de cadre de référence pour distinguer ce qui est réel de ce qui ne l'est pas ”





de simulation nécessiterait une puissance de calcul irréaliste. Si l'on imagine un ordinateur capable de simuler tous les atomes et champs quantiques de notre environnement avec une précision parfaite, cela semble en effet peu réaliste. Toutefois, ce n'est pas exact. La simulation n'a pas besoin d'être parfaitement précise ; elle doit simplement être suffisamment réaliste pour que les observateurs simulés ne puissent pas faire la différence. Il est aussi possible d'utiliser des techniques de génération procédurale, comme celles employées dans certains jeux vidéo, où les détails ne sont ajoutés qu'au besoin,

en fonction de la perspective du personnage. Ainsi, les simulateurs n'auraient pas à suivre chaque électron de la chaise sur laquelle vous êtes assis, mais seulement les propriétés macroscopiques que vous pouvez percevoir. De plus, lorsque des physiciens réalisent des expériences sur des phénomènes

microscopiques, les détails peuvent être fournis ad hoc par les simulateurs, présumés superintelligents, pour que tout semble normal.

**SVHS :** *Quelles sont les implications potentielles de votre théorie ?*

**M.M.V. :** Si, à un moment donné dans le futur, nous

*“ La simulation n'a pas besoin d'être parfaite ; juste assez réaliste pour que les observateurs simulés ne puissent pas faire la différence ”*



## “ L’Univers lui-même pourrait fonctionner comme un ordinateur quantique complexe... ”

Les théories scientifiques existantes ne seront pas invalidées, mais simplement enrichies ou complétées par ce nouveau paradigme.

**N.B. :** Cela élargirait le champ des possibilités. Par exemple, dans une vision matérialiste classique, la mort entraîne la désintégration du cerveau, laissant peu de place à l’idée d’une vie après la mort. Si l’hypothèse de simulation est vraie, une multitude de possibilités s’offrent à nous : les simulateurs pourraient relancer la simulation, copier votre esprit dans un autre, ou même vous transférer à leur niveau de réalité. Cela rendrait également envisageable que notre monde puisse disparaître si la simulation était arrêtée, ce qui semble impossible selon certaines lois de conservation physique. En fin de compte, cela nous pousse à être plus humbles quant à notre compréhension de l’ensemble du tableau dans lequel nous vivons. Une de mes citations préférées de *Hamlet* illustre bien cela : “*Il y a plus de choses dans le ciel et sur la Terre, Horatio, que n’en rêve ta philosophie.*” Sauf que je dirais “notre” philosophie.

**SVHS : Quelles sont vos prochaines étapes de recherche ?**

**M.M.V. :** La quête pour répondre à ces questions

fondamentales a donné naissance à un nouveau domaine de recherche appelé la physique de l’information. Les prochaines étapes de ma recherche concernent une expérience pour tester le principe d’équivalence masse-énergie-information ainsi que le concept d’ADN de la matière. Il y a une nécessité de fournir des preuves empiriques supplémentaires.

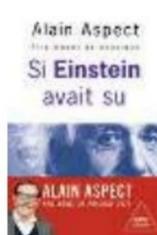
**N.B. :** Je m’intéresse de mon côté au statut moral et aux questions éthiques des esprits numériques que nous pourrions créer grâce aux avancées rapides de l’IA. Plus généralement, je souhaite explorer comment favoriser des relations harmonieuses entre des êtres de différents niveaux – qu’il s’agisse d’animaux non humains, d’êtres humains, d’IA (de divers types et niveaux de capacités jusqu’à la superintelligence forte), ainsi que des simulateurs hypothétiques ou des civilisations extraterrestres intelligentes. ■

\* *Melvin M. Vopson est directeur général de l’Institut de physique de l’information de l’université de Portsmouth (Royaume-Uni).*

\*\* *Nick Bostrom est un philosophe suédois, l’un des premiers chercheurs à avoir formulé cette théorie.*

obtenons des preuves empiriques et théoriques irréfutables que notre réalité est une construction simulée, les implications de cette découverte transformeraient toutes les branches de la science, la société civile, l’économie, les religions et les technologies. La conception intelligente devra être prise en compte dans toutes les sciences, y compris la physique, la cosmologie, la génétique, la théorie de l’évolution, les mathématiques, etc. Nous pourrions potentiellement éclaircir certains des grands mystères, tels que la matière noire et l’énergie noire manquantes dans l’Univers, ainsi que le mystère du big bang.

# Bibliographie



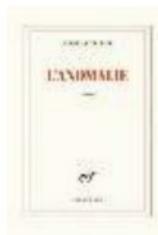
**SI EINSTEIN AVAIT SU**  
D'Alain Aspect,  
éd. Odile Jacob, 2025,  
368 p., 24,90 €.

Le premier est resté prudent face aux spéculations contre-intuitives de la physique quantique. Le second a réalisé en 1983 une expérience qui prouvait définitivement la réalité de l'intrication, en violation des inégalités de Bell (cf p. 27 dans ce numéro), expérience qui lui vaut un prix Nobel de physique en 2022. À près d'un siècle de distance, Albert Einstein et Alain Aspect se croisent donc dans ce livre passionnant qui retrace la déjà longue histoire de la physique quantique. Avec, en point de mire, la controverse quasi philosophique qui opposa, en leur temps, Einstein et Bohr : la quantique doit-elle être réelle ?



**L'UNIVERS À VOTRE PORTÉE : CHAMPS QUANTIQUES**  
De Sean Carroll,  
éd. Quanta, 2024,  
352 p., 20,85 €.

Voici le tome II d'une série conçue par un scientifique américain (professeur à l'université Johns-Hopkins de Baltimore) pour rendre accessibles au public le plus large les concepts souvent très complexes de la physique moderne. L'auteur nous invite à comprendre comment la théorie des champs explique la nature même de notre univers : pourquoi la matière est solide, comment fonctionnent les atomes, comment les particules interagissent entre elles, etc. Vertigineux, comme tout ce qui touche à la quantique.



**L'ANOMALIE**  
D'Hervé Le Tellier,  
éd. Gallimard, prix  
Goncourt 2020,  
336 p., 20 €.

Mathématicien de formation, grand amateur de rébus littéraires, l'auteur nous offre un roman à la frontière du fantastique et de la science. En juin 2021, les 243 passagers d'un vol Paris-New York se posent après un vol transatlantique marqué par de sévères turbulences. Problème : ce même avion, avec les mêmes passagers, a déjà atterri au même endroit deux mois plus tôt. Un défi logique pour les personnages du roman, mais aussi pour la physique... à moins qu'elle ne soit quantique. L'un d'entre eux commente la situation : *"Il est une chose admirable qui surpasse toujours la connaissance, l'intelligence, et même le génie, c'est l'incompréhension."* Sic.



**L'ÉQUATION DE LA CHAUVESOURIS**  
De Mickaël Launay,  
éd. Hugo Doc, 2024,  
320 p., 20,95 €.

Un ton, simple, clair avec un brin d'humour, et quelques schémas explicatifs sont les principaux ingrédients de ce livre qui aborde des principes de mathématique et de physique en faisant appel à des situations du quotidien : comment fonctionne un aspirateur ? Ou'est-ce que le hasard ? Pourquoi le jus d'orange monte dans la paille ? Comment une physicienne maladroite peut expliquer la superposition d'états et la mesure quantique ? Autant d'histoires qui font de cet ouvrage écrit par le mathématicien Mickaël Launay, alias Micmaths sur

YouTube, un remarquable support de vulgarisation scientifique.

## À VOIR

### LE SAUT QUANTIQUE

Série La Magie du cosmos  
coproduite par Arte France  
et National Geographic, diffusée  
en VOD sur le site web d'Arte ;  
52 min ; 2,99 €. [boutique.arte.tv/  
detail/la-magie-du-cosmos](https://boutique.arte.tv/detail/la-magie-du-cosmos)

Ce 3<sup>e</sup> opus d'une passionnante série documentaire consacrée au temps, à la matière et à l'espace est présenté par le scientifique américain Brian Greene, par ailleurs professeur de physique et de mathématiques à l'université Columbia de New York. *Le Saut quantique* vulgarise les principales notions de la physique quantique en usant de paraboles et d'exemples simples, à destination d'un grand public... plutôt éclairé.

## À ÉCOUTER

### LA QUANTIQUE SUR RADIO FRANCE

[radiofrance.fr/sujets/physique-quantique](https://radiofrance.fr/sujets/physique-quantique), rediffusion en accès gratuit, durées de 3 à 58 min et plus.

L'histoire et les développements contemporains de la physique quantique font l'objet d'un suivi attentif à Radio France. Le site propose de très nombreux podcasts, reportages et séries audio sur le sujet. Au programme et en vrac, l'histoire du laser, la structure de l'atome, la quête du zéro absolu avec Alain Aspect, les ordinateurs quantiques de la start-up Qandela avec sa fondatrice Pascale Senellart-Mardon, ou l'analyse du jeu vidéo d'aventure et de vulgarisation

scientifique Exographer, consacré à la physique des particules et sorti en septembre dernier.

## ERRATUM

### UNE HISTOIRE DE COUPLE

Hors série Science & Vie n° 316

"Rouler demain ?"

**Paul et Sylvie Verges :** "J'ai relevé une potentielle anomalie dans votre article sur la transmission (page 18). Vous indiquez que le moteur électrique fonctionne à couple (puissance) constant de 100 %. Cette formulation laisse à penser que couple et puissance sont les mêmes grandeurs physiques. Le couple, mesuré en Nm, et la puissance, mesurée en kW, sont 2 grandeurs différentes, la puissance

étant certes le produit du couple par la vitesse de rotation en rad/s."

**Science & Vie :** C'est tout à fait vrai. Ce que nous voulions dire, c'est que dans un moteur électrique, le couple maximal est délivré pratiquement depuis un régime nul (ce qui explique le dynamisme élevé des voitures électriques) et diminue seulement lorsqu'il parvient au régime maximal.

**Hugo Leroux**

### ABSENCE DE CRÉDITS

Hors série Science & Vie n° 317

"Exoplanètes, l'incroyable traque"

Nous avons omis de créditer certaines des photographies publiées dans notre précédent hors série. Il s'agit d'une erreur, mille excuses aux

auteurs de ces images ! Les voici :

**p 25** © Mark Garlick/SPL

**p 26** © Ames/JPL-Caltech/Nasa - Nasa, Esa, CSA, Alyssa Pagan - L. Calcada/Eso/SPL - Nasa - Nasa/AP/Sipa

**P 28-29** © M. Kornmesser/Nasa-Esa - M. Kornmesser/L. Calcada/Eso - JPL-Caltech/Nasa - Iopscience

**p 30-31** © Detlev Van Ravenswaay/SPL - Mark Garlick/SPL - Martin Vargic - World History Archive / Collection Christophel - Elen / Alamy Stock Photo/Hemis.fr - V. Ch. Quetz/MPIA

**p 52-53** © Esa/Webb, Nasa & CSA, A. Scholz, K. Muzic, A. Langeveld, R. Jayawardhana - Esa/Webb, Nasa, CSA, M. Barlow, N. Cox, R. Wesson - Nasa, Esa, CSA, STSCI, J. Lee (STSCI), T. Williams (Oxford), Phangs Team

## “C'est dit

**“L'électron ne semble exister en tant qu'objet réel que lorsque nous l'observons [...] La réalité quantique est rationnelle, mais elle n'est pas visualisable”**

HEINZ PAGELS (1929 – 1988), PHYSICIEN AMÉRICAIN ET PRÉSIDENT DE LA LIGUE INTERNATIONALE DES DROITS DE L'HOMME

**“Einstein n'accepte pas l'idée qu'une théorie physique fondamentale fasse appel à la notion de probabilité qui, pour lui, n'est qu'un outil permettant de donner une description simplifiée de situations complexes”**

ALAIN ASPECT, NÉ EN 1947, PHYSICIEN FRANÇAIS, PRIX NOBEL DE PHYSIQUE EN 2022, DANS SON LIVRE *SI EINSTEIN AVAIT SU*

**“Si une idée ne semble pas bizarre, il n'y a rien à espérer d'elle”**

NIELS BOHR (1885 – 1962), PHYSICIEN DANOIS, PRIX NOBEL DE PHYSIQUE EN 1922

**“Si vous croyez comprendre la mécanique quantique, c'est que vous ne la comprenez pas”**

RICHARD PHILLIPS FEYNMAN (1918 – 1988), PHYSICIEN AMÉRICAIN, PRIX NOBEL EN 1965 POUR SES TRAVAUX EN ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE

**“La mécanique quantique force le respect. Mais une voix intérieure me dit que ce n'est pas encore la juste vérité. En tout cas, je suis convaincu que Dieu ne joue pas aux dés”**

ALBERT EINSTEIN (1879, 1955), PHYSICIEN SUISSE ET AMÉRICAIN, PRIX NOBEL DE PHYSIQUE EN 1921

**“C'est le statut de fonctionnaire, parfois moqué par les plus libéraux, qui a permis à Alain Aspect de dédier une décennie à démontrer l'intrication [...] C'est la force du temps long”**

JULIEN BOBROFF, NÉ EN 1971, PHYSICIEN FRANÇAIS, DANS SON LIVRE *LA NOUVELLE RÉVOLUTION QUANTIQUE*

”

# PARTEZ À LA DÉCOUVERTE DU CIEL

avec  
**SCIENCE & VIE**

ABONNEZ-VOUS

pour

**-39%**

**65,90€**

au lieu de 108,24€\*

## Inclus dans votre abonnement annuel :

- ✓ 1 numéro par mois
- ✓ Version numérique incluse dans votre abonnement, à consulter sur **KiosqueMag.com**
- ✓ Accès illimité au site
- ✓ **SCIENCE & VIE TV** le replay et le streaming
- ✓ Podcast de nos journalistes
- ✓ Accès à La Science en direct, visioconférence animée par la rédaction



**+ EN CADEAU**  
Votre casque Bluetooth



**SCANNEZ-MOI !**



**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 # D1550367

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

**85,90€**  
au lieu de 150,90€\* **-43%**

**Formule annuelle** : 12 numéros + l'accès illimité au site Science & Vie (dont TV) + **le casque Bluetooth en cadeau** (2)

**65,90€**  
au lieu de 108,24€\* **-39%**

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

**Formule mensuelle** : 1 numéro par mois + 1 hors-série tous les 2 mois + l'accès illimité au site Science & Vie (dont TV) (3)

**4,90€**  
par mois  
au lieu de 9,02€\* **-45%**

**Je résilie quand je le souhaite.** Je remplis le mandat ci-dessous accompagné de mon RIB. Après la première année, je serai prélevé de 5,90€.

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 05 222 489479

Date et signature obligatoires  
Date :  /  /

➔ **Par carte bancaire** :

je me rends sur **KiosqueMag.com** : [bit.ly/svhs-318](http://bit.ly/svhs-318)

La boutique officielle de Science & Vie pour découvrir **nos offres sans engagement ! Plus simple, plus rapide, 100% sécurisé !**

➔ **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 !

\*Le prix de référence à l'année de la formule sans hors-série se compose du prix kiosque (58,80€), des frais de port (8,04€), du site internet (41,40€). Le prix de référence à l'année de la formule avec hors-série se compose du prix kiosque (100,20 €), des frais de port (9,30 €), du site internet (41,40 €). (1)(2) Formule annuelle avec engagement : abonnement automatiquement reconduit à date d'anniversaire. Le règlement s'effectue en une seule fois. Vous serez informé par écrit dans un délai de 3 mois avant le renouvellement de votre abonnement. Vous aurez la possibilité de l'annuler 30 jours avant la date de reconduction auprès du service client. A défaut l'abonnement sera reconduit pour une durée identique à votre abonnement initial. (3) Formule mensuelle sans engagement : je peux résilier à tout moment sur simple appel ou par courrier au service client. Après 1 an, je serai prélevé de 5,90€ par mois. Pour toute autre information, vous pouvez consulter nos CGV sur [kiosquemag.com](http://kiosquemag.com) et contacter le service client par mail sur [serviceabomag.fr](mailto:serviceabomag.fr) ou encore 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 01/04/2025. DOM-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, rectification, d'effacement de vos données ainsi que d'un droit d'opposition en écrivant à RMM-DPD, c/o service juridique, 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux, ou par mail à [dpd@reworldmedia.com](mailto:dpd@reworldmedia.com). Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - [www.cnil.fr](http://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](http://www.kiosquemag.com).





# Biodiversité Où en sont vraiment les populations d'insectes ?

Plusieurs méta-analyses récentes semblent relativiser la chute pourtant attestée des populations d'insectes en Europe et aux États-Unis. Des experts mettent en garde contre une interprétation erronée de ces résultats.

## SANTÉ

### Les vagues de chaleur font vieillir plus vite

Une étude portant sur 3800 Américains montre que les canicules affectent le corps au niveau cellulaire. P. 108

## TECHNOLOGIE

### On a retrouvé Camp Century sous les glaces de l'Arctique

Cette base militaire américaine secrète, au Groenland, aujourd'hui désaffectée, est le berceau de la glaciologie moderne. P. 110.

# “ON SOUS-ESTIME TOUJOURS LA TOXICITÉ DES INSECTICIDES”



Le déclin des insectes, sur lequel les scientifiques sonnent l'alarme depuis des années, est minoré par certaines études, tout comme l'impact des pesticides. Philippe Grandcolas\* et Laurence Gaume\*\*, écologues, font le point. PAR MARIE DORMOY



**SVHS: Que sait-on de l'ampleur du déclin des insectes ?**

**Philippe Grandcolas :**

Les observations de terrain menées dans le monde entier depuis une trentaine d'années documentent de manière indiscutable un effondrement des populations d'insectes dans les paysages mixtes agro-industriels, même si cer-



taines espèces généralistes ou invasives peuvent localement gagner du terrain. En Europe, ce déclin est de l'ordre de 70 % à 80 %. L'estimation de tendances globales est difficile : avec plus de 1 million d'espèces d'insectes répertoriées, il est impossible de suivre l'évolution de chacune.

**Laurence Gaume :** Les insectes suscitent moins d'intérêt que les oiseaux, par exemple, et les données les concernant sont lacunaires, hétérogènes dans le temps, dans l'espace et selon les groupes taxinomiques. C'est en Europe et aux États-Unis que leur déclin est le plus documenté, surtout celui des papillons, des pollinisateurs et des libellules. Cette hétérogénéité ne facilite pas l'étude synthétique de leur dynamique à l'échelle mondiale.

**SVHS: Comment l'évaluer ?**

**P. G. :** Idéalement, il faudrait des études sur cinquante ans, avec un protocole qui permette de mesurer le nombre d'individus, le poids et le nombre d'espèces dans un lieu donné, ainsi que les effets des pressions humaines et d'autres facteurs environnementaux. Mais il n'existe pas d'études standardisées sur d'aussi longues périodes pour les insectes. Pour extraire des tendances générales, les chercheurs s'appuient donc sur l'analyse statistique de nombreuses populations et croisent les résultats d'études variées. Le résultat global dépend de la qualité des données et de la bonne application des méthodes.

**L. G. :** Les méta-analyses peuvent être un outil puissant, mais elles doivent avant tout reposer sur des données propres, représentatives et non biaisées. Avec ma collègue Marion Desquilbet, nous avons réalisé pendant trois ans l'analyse approfondie de la base de données InsectChange\*\*\*, présentée comme une référence mondiale et sur laquelle se base notamment la méta-analyse aux résultats rassurants publiée par Van Klink *et al.* en 2020 dans la revue *Science*. Nous y avons décelé plus de 500 erreurs et problèmes méthodologiques qui remettent en question leurs résultats.

**SVHS: Quels biais avez-vous constatés?**

**L. G.:** La règle d'or d'une méta-analyse est que les données doivent être issues d'études cherchant à tester la même hypothèse. Or, nombre d'entre elles testaient l'effet de facteurs différents et qui souvent favorisaient l'augmentation des insectes (création d'habitats, mesures de restauration...). Beaucoup de jeux de données comprenaient par ailleurs des invertébrés qui ne sont pas des insectes. L'échelle taxinomique (genre, famille, ordre...) n'était pas toujours la même, tout comme les métriques (abondance, biomasse) et les unités de mesure. Les séries temporelles n'étaient pas homogènes : certaines n'avaient que deux enregistrements. Enfin, les coordonnées géographiques et la méthodologie utilisée pour mesurer l'influence de l'agriculture ou de l'urbanisation étaient inadéquates. Ces écueils ont conduit à sous-estimer le déclin des insectes et à écarter l'agriculture comme une cause possible.

**SVHS: Pourquoi est-ce grave et comment y remédier?**

**L. G.:** Nous avons employé une méthodologie reproductible, qui



Pour documenter l'évolution des populations locales d'insectes, l'association roannaise de protection de la nature organise des sorties nocturnes de comptage le long de la rivière Rhins, comme ici en août 2024.

peut être généralisée à l'évaluation des bases de données. La qualité des données est un enjeu important, car les papiers qui sèment le doute sur des bases erronées retardent les décisions qui doivent aujourd'hui être rapides et adaptées. Selon le rapport de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (Ipbes) de 2016, aux échelles nationales, ce sont

souvent plus de 40 % des abeilles sauvages et des papillons qui sont menacés d'extinction. Outre les pollinisateurs, les bousiers, fourmis et libellules sont aussi concernés par un déclin préoccupant.

**P. G.:** On a malheureusement tendance à oublier que les insectes assurent des services colossaux pour les écosystèmes, comme la pollinisation de trois quarts des plantes, la décomposition et le recyclage de la matière organique,

# UNE LENTE PRISE DE CONSCIENCE



**1962**

Le livre *Printemps silencieux*, de la biologiste américaine Rachel Carson, dénonce les effets sur la biodiversité de l'utilisation massive de pesticides, notamment du DDT.



**1990**

Début des enregistrements standardisés d'insectes réalisés au long cours, alors que les effets perturbateurs sur la biodiversité ont déjà commencé.



Selon une étude réalisée en 2019 au Danemark, le nombre de cadavres d'insectes retrouvés écrasés sur la calandre ou le pare-brise des voitures a chuté de 80% en 20 ans (Moller, 2019).

le contrôle des bioagresseurs, le bon fonctionnement des chaînes alimentaires... Leur déclin menace non seulement la diversité dans son ensemble, mais aussi notre sécurité alimentaire. Il est donc urgent d'encourager des actions concrètes.

**SVHS: Les causes du déclin sont-elles suffisamment documentées pour éclairer les décisions ?**

**P. G. :** Les pesticides sont, avec la perte d'habitats dans les paysages agricoles, la principale cause du

déclin des insectes. Les insecticides sont conçus pour tuer les insectes qui posent problème. Mais on sous-estime toujours leur écotoxicité : on pense qu'un toxique va tuer uniquement et directement des insectes ciblés ; en réalité il peut agir sur de nombreuses autres espèces, ainsi que de manière chronique, en altérant leurs comportements et en menaçant leur survie sur le long terme. Les effets cocktails posent également problème, par exemple, l'interaction des néonicotinoïdes – des insecticides neurotoxiques

puissants qui agissent à des doses infimes – et des fongicides augmente encore leur toxicité.

**L. G. :** Ces effets cocktails et sub-létaux, de plus en plus documentés par des études en laboratoire, ne sont pas considérés dans les tests réalisés pour élaborer les réglementations. Sur le terrain, il est difficile de démontrer l'effet de ces intrants sur les insectes, car il est ardu de trouver des parcelles indemnes de pesticides pour servir de référence. Or, des études récentes révèlent que seulement 17 % des sols en Europe ne sont pas contaminés.

**P. G. :** Au-delà des décisions politiques qui s'imposent, chacun peut agir à son niveau, en soutenant par exemple une agriculture agroécologique, respectueuse des sols et des écosystèmes qu'elle abrite. Et en évitant les insecticides dans son jardin ou son potager.

*\* Philippe Grandcolas, écologue, biologiste de l'évolution, directeur de recherche et directeur adjoint scientifique de CNRS Écologie et Environnement. Auteur de Biodiversité, fake or not? (éd. Tana, novembre 2024).*

*\*\* Laurence Gaume, écologue spécialiste des interactions plantes-insectes au laboratoire Amap à Montpellier (CNRS).*

*\*\*\* "InsectChange: Comment", Peer Community Journal, octobre 2024.*



**2017**

Les médias relayent un article annonçant le déclin massif de 75 % de la biomasse des insectes dans des zones protégées en Allemagne au cours des trente dernières années.



**2021**

L'Académie des sciences se prononce pour la première fois sur la crise de la biodiversité. Elle alerte sur l'urgence de freiner le déclin des insectes et rappelle les risques majeurs qu'il fait porter sur les écosystèmes.



## Les lacs glacés d'Antarctique abritent-ils la vie ?

Oui, et le mystère a été levé grâce à l'analyse du lac Enigma. Un lac situé sur la terre Victoria, à l'est de l'Antarctique, que l'on pensait entièrement gelé. Or, une équipe internationale dirigée par des chercheurs de l'Institut italien des sciences polaires a détecté une colonne d'eau liquide stratifiée de 12 m de profondeur, isolée par une glace de 11 m d'épaisseur au-dessus d'elle. Des analyses chimiques, effectuées sur des prélèvements réalisés durant les étés 2019 et 2020, ont révélé la présence d'une diversité microbienne dominée par les *Patescibacteria*, des bactéries ultra petites et extrêmement simples. Celles-ci ne se retrouvent quasiment pas dans les lacs des vallées sèches de l'Antarctique comme ceux de McMurdo ou d'Untersee,

ce qui tend à indiquer la présence de réseaux trophiques différents. L'étude, publiée le 3 décembre 2024 dans la revue *Communications Earth & Environment*, suggère que ces communautés microbiennes pourraient être des reliques d'écosystèmes anciens présents dans le lac avant sa congélation complète. Elles auraient survécu en s'adaptant aux conditions extrêmes, notamment grâce à la stratification chimique et à l'isolement du lac – qui serait alimenté par le glacier Amorphous via un réseau souterrain fermé –, protégeant ainsi les écosystèmes internes des perturbations extérieures. Ces conditions auraient favorisé l'évolution et la persistance de ces microbes dans des niches extrêmes.

A. S.

## La chaleur extrême fait-elle vieillir plus vite ?

C'est du moins ce que suggère une étude préliminaire présentée à Seattle, lors du congrès scientifique annuel de la Société gériatrique américaine. Menée par une équipe de chercheurs de l'université de Californie du Sud, l'étude a exploré l'impact des vagues de chaleur sur le vieillissement en analysant les marqueurs épigénétiques de plus de 3 800 Américains, âgés de 56 ans et plus. Ces données, datant de 2016-2017, ont été ensuite croisées avec des cartes de température.

Le but ? Déceler une éventuelle corrélation entre les données des marqueurs moléculaires et le nombre de jours où la température a dépassé 26,7°C ou 32,3°C, selon l'endroit où habitaient les participants. La mesure de certains de ces marqueurs a montré un vieillissement moléculaire de 0,12 année pour chaque augmentation de 10% de la proportion de jours chauds. D'autres ont révélé que l'âge moléculaire des habitants des zones chaudes vieillit plus rapidement. Ces résultats suggèrent donc que la chaleur affecte le corps au niveau cellulaire et pourrait se traduire physiquement par le développement de maladies. Cependant, des inconnues subsistent : la causalité directe reste incertaine, l'effet de la climatisation n'a pas été étudié, et les réponses individuelles à la chaleur doivent encore être explorées.

A. S.



## Peut-on stocker le CO<sub>2</sub> dans les fonds marins?

C'est la promesse du projet de stockage Northern Lights, associant les géants pétroliers Equinor, Shell et TotalEnergies. En septembre et novembre dernier, l'entreprise a en effet présenté les deux briques principales de son dispositif de captage et de stockage de CO<sub>2</sub>, ou CCS. La première brique, c'est le terminal terrestre d'Øygarden, à l'ouest de Bergen, sur les rives de la mer du Nord, au sud-ouest de la Norvège. C'est ici que le CO<sub>2</sub>, préalablement liquéfié à une température minimale de -35°C, et une pression maximale de 19 barg, sera acheminé par bateau, puis injecté, via un long pipeline, dans un aquifère salin à 2 600 m

sous les fonds marins. La capacité de stockage annuelle annoncée est d'environ 1,5 million de tonnes dans un premier temps, mais elle pourra être portée à 5 millions de tonnes. La deuxième brique, c'est la livraison par le chantier naval de Dalian, en Chine, du premier navire de transport de CO<sub>2</sub> liquéfié d'une flotte de quatre bateaux: le *Northern Pioneer*, long de 130 m, large de 21 m, avec une taille de cargaison allant jusqu'à 7 500 m<sup>3</sup>; son jumeau, le *Pathfinder*, presque finalisé; et deux autres navires en cours de construction. Northern Lights est donc aujourd'hui en ordre de marche pour accueillir ses premiers mètres

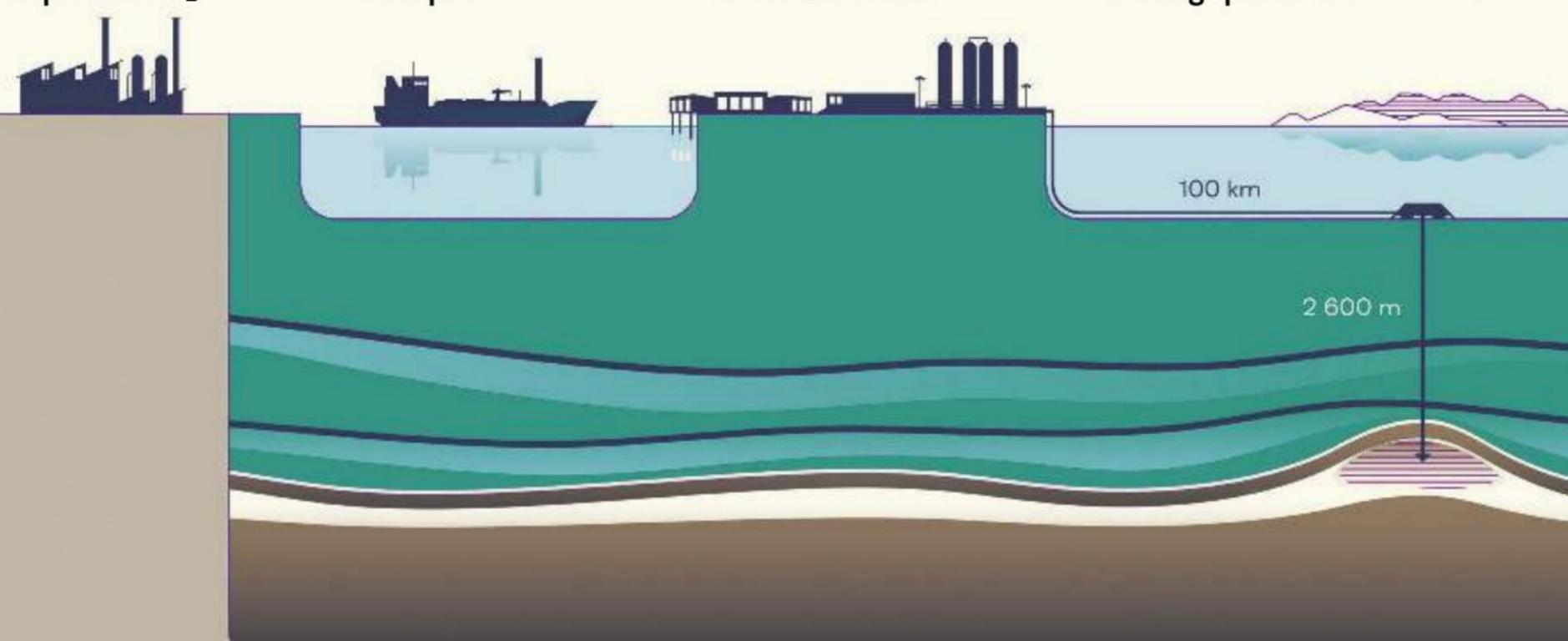
cubes de CO<sub>2</sub> liquéfié. Deux accords commerciaux ont d'ores et déjà été signés: l'un avec Yara aux Pays-Bas pour capturer et stocker 800 000 t de CO<sub>2</sub> provenant de la production d'ammoniac à Sluiskil; l'autre avec la firme Ørsted pour stocker 430 000 t de CO<sub>2</sub> biogénique [résultant de la combustion de bois ou la dégradation des sols, notamment agricoles, NDLR] par an, provenant de deux centrales électriques au Danemark. Soit, pour l'instant, un total de 1,2 Mt de CO<sub>2</sub> captées par an. Loin des 7,6 Gt annuelles nécessaires, d'ici à 2050, pour contenir le réchauffement planétaire à +1,5°C, selon l'Agence internationale de l'énergie. E. T.-A.

Capture de CO<sub>2</sub>

Transport

Terminal terrestre

Stockage permanent



# Camp Century

## La base secrète refait surface

**Q**uand le glaciologue Chad Greene a pris place en avril dernier à bord de l'avion Gulfstream III, sur la base spatiale de Pituffik au Groenland, sa mission était simple: tester la précision et les limites du nouveau radar UAVSAR (Radar à ouverture synthétique pour véhicule aérien sans pilote) pour cartographier la surface de la glace et son épaisseur jusqu'au socle rocheux de la calotte glaciaire. Mais, à 240 km à l'est de la base, ce spécialiste de la télédétection par satellite au Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la Nasa a fait une rencontre inattendue: il est tombé sur Camp Century, une base militaire américaine construite en 1959, en pleine guerre froide. Cette "ville sous la glace" était le centre névralgique du projet secret défense Iceworm (ver de glace), qui devait, à terme, se composer de 4 km de tunnels, avec des tranchées de 8 m de profondeur en surface. Ces dernières auraient permis de lancer des missiles balistiques à portée intermédiaire, baptisés Iceman, capables d'atteindre l'Union soviétique. Le projet a été abandonné en 1967 en raison des coûts élevés et de la difficulté technique à garantir la résistance des tunnels aux mouvements de la calotte glaciaire... Certes, cette base n'a jamais été oubliée. Des chercheurs

s'y activent même depuis 2016, car Camp Century est désormais un gigantesque sarcophage de mazout, déchets biologiques, chimiques et radioactifs enfouis à 30 m sous la glace. Un sarcophage que la corrosion et la fonte des glaces pourraient ouvrir. La nouveauté réside dans l'apport de la précision technologique du radar UAVSAR. Celui-ci a permis d'obtenir une cartographie 3D de l'installation et de l'épaisseur de la glace tout autour. Cette base est désormais une sentinelle du changement climatique: elle sert de point de repère pour surveiller la fonte des glaces. *"Sans une connaissance détaillée de l'épaisseur de la glace, il est impossible de savoir comment les calottes glaciaires réagiront face à des océans et une atmosphère qui se réchauffent rapidement, ce qui limite considérablement notre*

### Ici est née la glaciologie

Lors de la réalisation des tunnels, de longues carottes de glace ont été prélevées (ci-contre) et conservées par l'armée américaine. Après la fermeture de la base, en 1967, le géophysicien danois Willi Dansgaard demande à analyser ces échantillons. Il publie dans *Science*, en 1969, la première courbe reconstruisant les variations climatiques sur les 100 000 dernières années. La glaciologie moderne était née.

*capacité à projeter les taux d'élévation du niveau de la mer", a déclaré Alex Gardner, glaciologue à la Nasa, dans la revue *Earth Observatory* de l'agence spatiale américaine. Camp Century est désormais sous haute surveillance.* A. S.





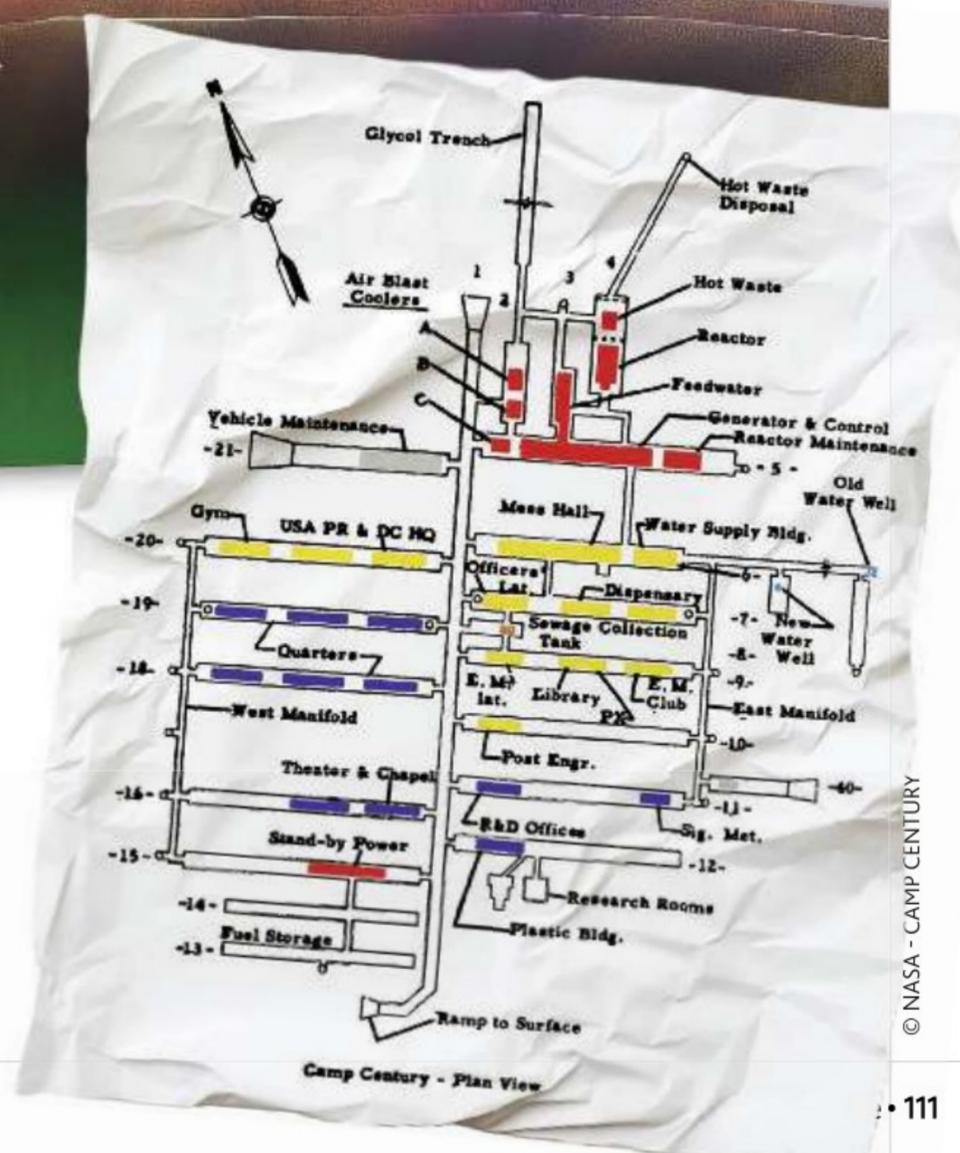
## Une ville sous la glace

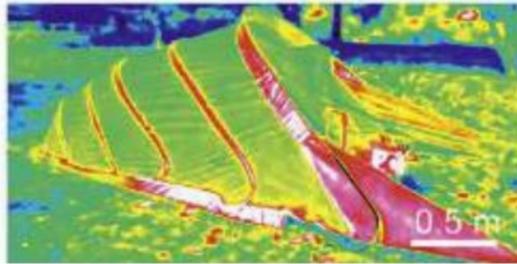
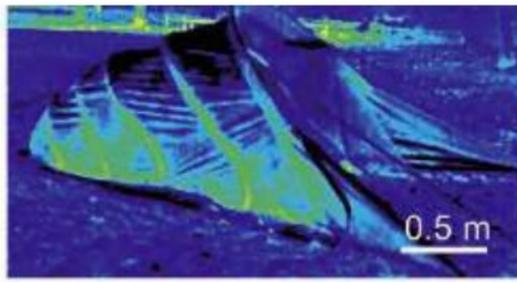
Ce plan de Camp Century (*ci-dessous*) permet de comprendre le surnom de "ville sous la glace" donné à la base. Tout a été pensé pour permettre à 200 personnes de vivre sans avoir à souffrir des températures extérieures pouvant atteindre  $-57^{\circ}\text{C}$ . Un théâtre, une chapelle, un magasin, un hôpital, des quartiers d'habitation... et une ligne de chemin de fer.



## Une carte 3D de la base

Le radar UAVSAR a permis d'obtenir une vue tridimensionnelle de la base. Toutefois il place le lit de la glace au-dessus de la base (matérialisé par un trait blanc) alors qu'il se trouve normalement à 1 km en dessous.





## Un tissu peut-il s'adapter à la chaleur ?

Une équipe d'ingénieurs et de chercheurs de l'université Tsinghua, à Pékin, vient de mettre au point un textile intelligent qui s'adapte à la température ambiante. Ce tissu est composé de microcapsules thermochromiques – capables de changer de couleur en fonction de la température –, enveloppées d'oxyde de graphène réduit (rGO) et de microparticules de sulfate de baryum ( $\text{BaSO}_4$ ). "Le rGO, qui apparaît noir à basse température, absorbe fortement le rayonnement solaire pour un chauffage efficace. Inversement, à haute température, il passe à une couleur blanche et réfléchit une grande partie du rayonnement solaire, ce qui permet une modulation optique élevée", explique l'étude. En complément, le  $\text{BaSO}_4$ , lui, augmente la réflectivité solaire et permet un refroidissement efficace. Avec ce textile, les chercheurs ont confectionné un vêtement et une tente, tous deux équipés d'un thermomètre pour enregistrer les variations de température. Résultat, le confort thermique obtenu est de 19°C à 28°C, même pour une température ambiante supérieure à 33°C, offrant des solutions pour les habitats dans des conditions climatiques fluctuantes.

A. S.

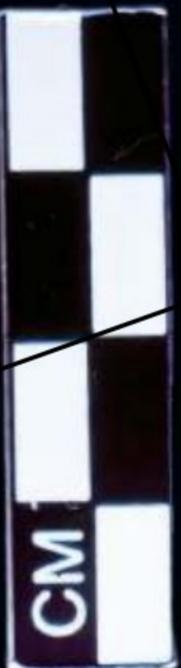
## Les gorilles soumettent-ils leurs décisions au vote ?

Il semblerait que ce soit le cas pour les déplacements. Un comportement loin de l'image d'Épinal du grand dos argenté qui règne en maître sur le groupe. Cette découverte étonnante, publiée en octobre 2024 dans *Proceedings of the Royal Society B*, a été faite par une équipe de chercheurs franco-suisse qui a observé pendant onze mois les comportements et vocalisations de trois groupes de gorilles des forêts tropicales de Dzanga-Sangha, en République centrafricaine. Il s'avère que, cinq minutes avant le déplacement du groupe, des vocalises et grognements plus fréquents se font entendre. Un comportement que les chercheurs interprètent comme "des 'votes' sur un projet commun". Et les décisions mises au "vote" peuvent provenir de n'importe quel adulte du groupe, mâle ou femelle. Ainsi, le déplacement est validé en fonction du nombre de grognements. C'est ce que l'on appelle un choix démocratique.

A. S.

## À quand remonte le premier alphabet ?

Peut-être à 2400 av. J.-C. C'est la date à laquelle remonteraient les plus anciennes écritures alphabétiques connues, découvertes en 2004 dans une tombe datant de l'Âge de bronze ancien, à Tell Umm-el Marra, en Syrie. Une équipe d'archéologues de l'université Johns-Hopkins, à Baltimore, a en effet trouvé, dans une des sépultures, des cylindres d'argile portant huit symboles distincts qui semblent correspondre à une écriture alphabétique, mais qu'il n'a pas été possible de traduire. "Jusqu'ici, les chercheurs pensaient que l'alphabet avait été inventé en Égypte ou aux alentours, peu après 1900 av. J.-C.," explique Glenn Schwartz, professeur d'archéologie qui a découvert ces cylindres. "Mais nos artefacts sont plus anciens [d'environ 500 ans, NDLR] et proviennent d'une autre région, suggérant que l'alphabet pourrait avoir une origine totalement différente de ce que nous pensions." A. S.





Alain Manceau, scientifique à l'ESRF et chercheur émérite au CNRS, a piloté les expériences utilisant la spectroscopie d'absorption de rayons X.



## Les manchots ont-ils des superpouvoirs dépolluants ?

Le mercure, en particulier sa forme organique, le méthylmercure (MeHg), est un polluant neurotoxique qui peut s'accumuler dans les chaînes alimentaires terrestres et marines. Mais certains des prédateurs au sommet de la chaîne alimentaire, comme les pétrels géants, très exposés au mercure, ont développé deux mécanismes pour éliminer le méthylmercure. Le premier au moment de la mue des plumes, en éliminant le neurotoxique fixé sur la kératine; le second, en produisant un composé minéral inerte non toxique à base de sélénium: le séléniure de mercure, appelé tiémannite. Ce dernier permet la détoxification du méthylmercure et protège les organes. Mais il semblerait que les manchots empereurs, prédateurs intermédiaires se nourrissant essentiellement de calamars et de poisson, ont une troisième arme secrète: le Hg-dithiolate. Un complexe retrouvé habituellement chez les bactéries qui leur permet d'altérer le fonctionnement du

méthylmercure à l'intérieur du corps – et non dans le microbiote – en le liant à des molécules contenant du soufre. Une "nouvelle voie" de dépollution identifiée par des chercheurs du Synchrotron européen de Grenoble (ESRF) et du CNRS, grâce à l'utilisation de la spectroscopie d'absorption des rayons X: "Nous pensons que ce mécanisme de déméthylation 'moins sophistiqué' est plus courant chez les vertébrés de niveau trophique inférieur, comme les reptiles, qui sont moins contaminés par le méthylmercure et n'ont pas besoin d'un mécanisme de décontamination aussi avancé que celui des pétrels géants", expliquent les auteurs de l'étude parue dans le *Journal of Hazardous Materials* le 13 novembre 2024. Ils estiment que ces recherches sont cruciales pour tracer le cycle biogéochimique du mercure dans les écosystèmes, des bactéries aux prédateurs supérieurs. A. S.

### POUR EN SAVOIR PLUS

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

- #270 "Les grands singes, leur histoire, leurs secrets, leur avenir"
- #279 "30 animaux qui défient la science"
- #303 "Réparer la nature, les chercheurs ouvrent le champ des possibles"

- #306 "Agriculture, quelles solutions pour demain?"
- #309 "Fonte de la cryosphère, quel monde après?"
- #315 "Bien vieillir, les nouvelles pistes de la recherche"

# UN OIGNON SOUS LA MER

**EN 1957, UN ÉTRANGE ENGIN EST ASSEMBLÉ SUR LE PORT DE MARSEILLE, SOUS LES YEUX ATTENTIFS DU COMMANDANT COUSTEAU, À QUELQUES PAS DE SON NAVIRE MYTHIQUE, LA CALYPSO...**

Un an après la sortie du documentaire *Le Monde du silence*, le commandant Jacques-Yves Cousteau cherche un moyen de descendre plus profondément dans les abysses et, surtout, d'y rester plus longtemps. Exit les bathyscaphes, il faut un vrai outil d'exploration des fonds marins. L'idée? Une "soucoupe volante" qui s'inspire de la silhouette de la tortue de mer et de sa capacité à fendre l'eau pour se déplacer sous l'océan, et offrant une autonomie de six heures d'oxygène. Concrètement, l'engin ressemble à "une toupie d'acier composée de deux coupelles superposées et doublées extérieurement par une coque en fibre de verre", d'après la description qu'en font les tôliers de Maubeuge, chargés de confectionner la structure. Visuellement plus proche de l'oignon que de la tortue, donc. Côté propulsion, l'engin s'inspire davantage du calamar. Ainsi, l'eau est aspirée via deux tuyères situées sur les ailerons et alimentées par un moteur de 2 chevaux (la "Deudeuch"



**C'ÉTAIT ÉCRIT** DANS **SCIENCE & VIE**

mène à tout!) pour ressortir, sous pression, à l'arrière de ce mini sous-marin. La propulsion devrait permettre de se déplacer à 3 nœuds, soit environ 5,5 km/h. Une vitesse suffisante pour filmer de beaux spécimens marins, grâce à la caméra fixée à l'avant, même si la position prévue pour les caméramans n'est pas très académique. La "soucoupe" peut accueillir deux hommes "couchés sur le ventre, sur un lit en plastique-mousse" qui pourront ainsi conduire l'engin "à l'aide de commandes asservies hydrauliquement" et le faire plonger jusqu'à 600 m de profondeur. En théorie. En pratique, la "soucoupe" sous-marine a commencé ses explorations, en 1959, à 350 m maximum. Le commandant Cousteau lui donnera le nom de Denise, en hommage à la femme de l'ingénieur qui l'a conçue. **A. S.**

## 600 mètres sous les mers avec LA "SOUCOUBE 2 CH"

La technique de l'exploration sous-marine vient de faire un nouveau pas. A Marseille, port d'attache matériel et sentimental du commandant Cousteau et de son navire la « Calypso », un nouvel engin est en cours de montage. A la soucoupe volante il emprunte ses formes, à la tortue de mer ses qualités mécaniques.

Pour un géomètre ce ne serait qu'un « hélicoptère de révolution ». Pour les tôliers de Maubeuge, qui l'ont construit, c'est plus prosaïque : une toupie d'acier composée de deux coupelles superposées et doublées extérieurement par une coque en fibre de verre. Entre les deux enveloppes est logé un moteur électrique de 2 ch alimentant deux tuyères placées sur des ailerons. Celles-ci, de 50 cm de long et 20 cm de diamètre, ont une poussée de 7 à 8 kg. L'eau est aspirée par l'avant, et rejetée par l'arrière à grande vitesse, ce qui permet à la soucoupe (ou la tortue) de filer allègrement ses trois nœuds. Un lest de tétrachlore de carbone assure la descente et la montée ; deux bacs à mercure procurent la stabilité et l'inclinaison désirée.

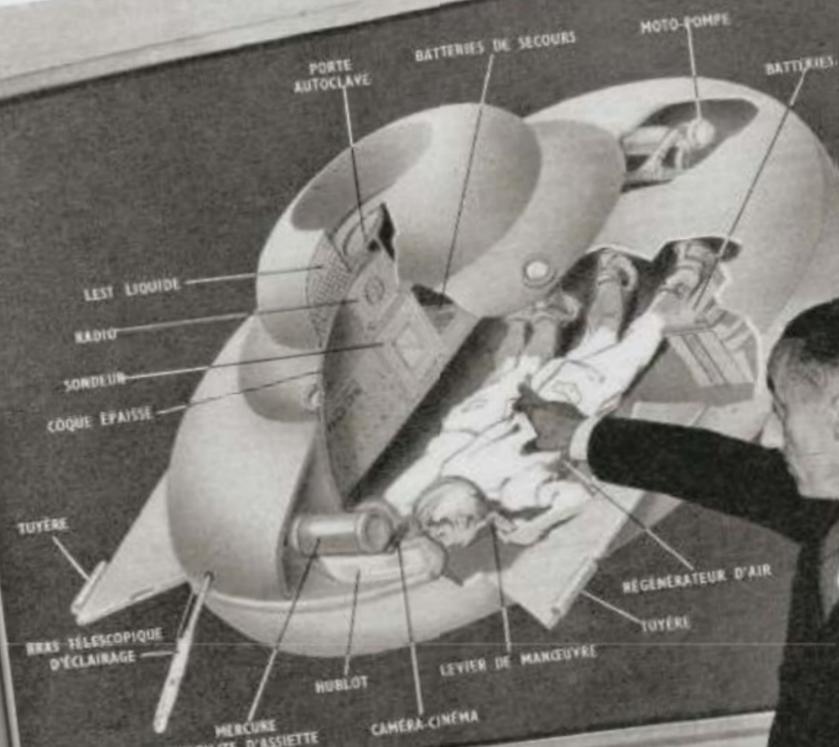
Pour voir dans les profondeurs, trois lampes éclairent la mer sur un rayon d'une dizaine de mètres avec, en plus, un bras télescopique portant un flash électronique pour la photo et deux lampes de 5 à 600 watts pour la caméra. La coque est percée de quatre hublots et d'une meurtrière en plexiglas.

Couchés sur le ventre, mais sur un lit en « plastique-mousse », deux hommes peuvent conduire l'engin à l'aide de commandes asservies hydrauliquement. Un régénérateur d'air procure une autonomie moyenne de 6 heures avec une réserve maximum de 12 heures.

Chien d'arrêt de la « Calypso » qui l'amènera au but de l'exploration au moyen d'une grue hydraulique, la soucoupe sous-marine pourra prospecter en toute quiétude le monde du silence. Des pincettes lui permettront même de faire des prélèvements de roches ou d'échantillons végétaux et animaux. Si la toupie ne prétend pas aux performances du bathyscaph, elle pourra tout de même explorer les continents perdus jusqu'à la profondeur de 600 mètres.

YVES MAZELLIER

Conçue par le commandant Cousteau, usinée à Maubeuge, assemblée à Marseille, la soucoupe est un oignon d'acier dans sa pelure en fibre de verre.





# INTÉGREZ L'INCUBATEUR SCIENCE & VIE !

Vous êtes ingénieur, inventeur, porteur de projet, startuppeur...

## SCIENCE & VIE VOUS OFFRE



Un espace  
de travail pendant  
6 mois



L'accès  
à un réseau  
d'experts



Une médiatisation  
exceptionnelle  
de votre projet

## REJOIGNEZ-NOUS VITE !

Inscriptions sur [incubateursv@reworldmedia.com](mailto:incubateursv@reworldmedia.com)

[science-et-vie.com](http://science-et-vie.com)

TOUTES  
LES INFOS  
ICI



Avec la participation de



et en partenariat avec





A l'attention de  
Mr. Schrödinger

**FRAGILE** 



**Transport  
d'ANIMAUX  
VIVANTS** ?