

Trimestriel n° 320
JUIN 2025

CNRS

LE JOURNAL



BIOLOGIE

Et les plantes colonisèrent
la terre ferme...

DOSSIER

D'Einstein à
l'ordinateur quantique

PORTFOLIO

Les mathématiques
prennent forme

HISTOIRE

Les origines françaises
de la Bombe



La banque coopérative
de la Fonction publique

CASDEN Banque Populaire – Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable – Siège social : 1 bis rue Jean Wiener 77420 Champs-sur-Marne – Siren n° 784 275 778 – RCS Meaux – Immatriculation ORIAS n° 07 027 138 – BPCE – Société anonyme à directorat et conseil de surveillance au capital de 168 932 730 euros – Siège social : 7, promenade Germaine Sablon 75 013 Paris – RCS Paris N° 493 455 042 – Immatriculation ORIAS n° 08 045 100 – Crédit photo : © Roman Jellanno • Conception : Insign 2021 • Merci à Jenny, enseignante chercheuse d'avoir prêté son visage à notre campagne de communication.

COMME MOI, REJOIGNEZ LA CASDEN, LA BANQUE DE LA FONCTION PUBLIQUE !

Jenny, Enseignante chercheuse



PARTENAIRE PREMIUM

casden.fr



Retrouvez-nous chez

**BANQUE
POPULAIRE**

Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

Téléphone : 01 44 96 40 00**E-mail :** lejourn@cnrs.fr**Le site internet :** <https://lejournal.cnrs.fr>**Anciens numéros :**<https://lejournal.cnrs.fr/numeros-papiers>**Directeur de la publication :**

Antoine Petit

Directeur de la rédaction :

Jérôme Guilbert

Rédacteur en chef :

Saman Musacchio

Rédacteurs en chef adjoints :

Laure Cailloce, Yaroslav Pigenet

Rédacteurs :

Sophie Félix, Mehdi Harmi, Marina Julienne

Maxime Lerolle, Laurence Stenvot

Ont participé à ce numéro :

Thomas Allard, Lydia Ben Ytzhak, Kheira Bettayeb,

Julie Degen, Morgane Gillard, Mathieu Grousseau,

Sylvain Guilbaud, Denis Guthleben

Secrétaire de rédaction :

Fabien Maréchal

Direction artistique :

David Faure

Iconographes :

Anne-Emmanuelle Héry, Sophie Léonard

et Valérie Delchambre

Gestionnaire :

Mathieu Chatellier

Assistant de direction :

Frédéric Roman

Impression :

Roto France Impression

25 rue de la Maison Rouge, 77185 Lognes

ISSN 2261-6446

Dépôt légal : à parution



Photos CNRS disponibles à :

contact-mediatheque@cnrs.fr

<https://images.cnrs.fr>

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

En couverture :

Modèle mathématique façonné à la main.

© Henri Duvalard / Collections de l'Institut Henri Poincaré

**Vous travaillez au CNRS
et souhaitez recevoir
CNRS LE JOURNAL
dans votre boîte aux lettres ?**

Abonnez-vous gratuitement sur :

» lejournal.cnrs.fr/abojournal

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



« En préambule à la Conférence des Nations unies sur l'océan, le CNRS coorganise le One Ocean Science Congress, appelé à nourrir la décision publique internationale. »

La troisième Conférence des Nations unies sur l'océan (Unoc) se tiendra à Nice du 9 au 13 juin. Elle marquera une étape fondamentale pour la gouvernance et la protection de l'océan. Immense, fluide et opaque, l'océan abrite des milliers d'espèces qui interagissent à travers des relations complexes et joue un rôle essentiel dans le climat planétaire. Il accueille aussi de vastes secteurs d'activités humaines. La conférence diplomatique, elle, mobilisera des milliers d'acteurs. Elle sera précédée par un congrès scientifique (OOSC, pour « One Ocean Science Congress ») coorganisé par le CNRS et l'Ifremer, et appelé à fournir les éléments nécessaires pour informer la décision publique internationale sur une base scientifique.

La protection de l'océan nécessite des approches interdisciplinaires capables. C'est dans cet esprit qu'a été créé, en 2021, le Groupement de recherche océan et mer (OMER), qui réunit quelque 1 500 scientifiques issus du CNRS, d'autres organismes de recherche, d'universités, ainsi que des partenaires non académiques. Son conseil scientifique se compose de 30 membres, dont l'expertise couvre un large spectre, allant de la physique et de la biologie fondamentales aux sciences humaines et sociales, en passant par l'informatique et l'océanographie.

OMER s'organise en 13 groupes de travail¹, dont un est dédié à la recherche autour des ports, un autre consacré à la recherche sur l'instrumentation en milieu marin, ou encore un groupe à la problématique de l'économie de l'océan... Pour mener des études dans ce cadre, 34 doctorants sont financés par le CNRS et sélectionnés par le GdR OMER.

La participation d'OMER à l'Unoc est conséquente. Trois groupes de travail OMER ont proposé des sessions – qui ont été acceptées – au congrès scientifique OOSC. Un quatrième va réaliser un journal ethnographique de la Conférence pour étudier l'implication des différentes catégories d'acteurs dans la prise de décision. Les étudiants OMER

contribueront dans le cadre de l'initiative « Sciences-sur-mer ». Des événements « Art et science », organisés par OMER, auront également lieu tout au long de la période.

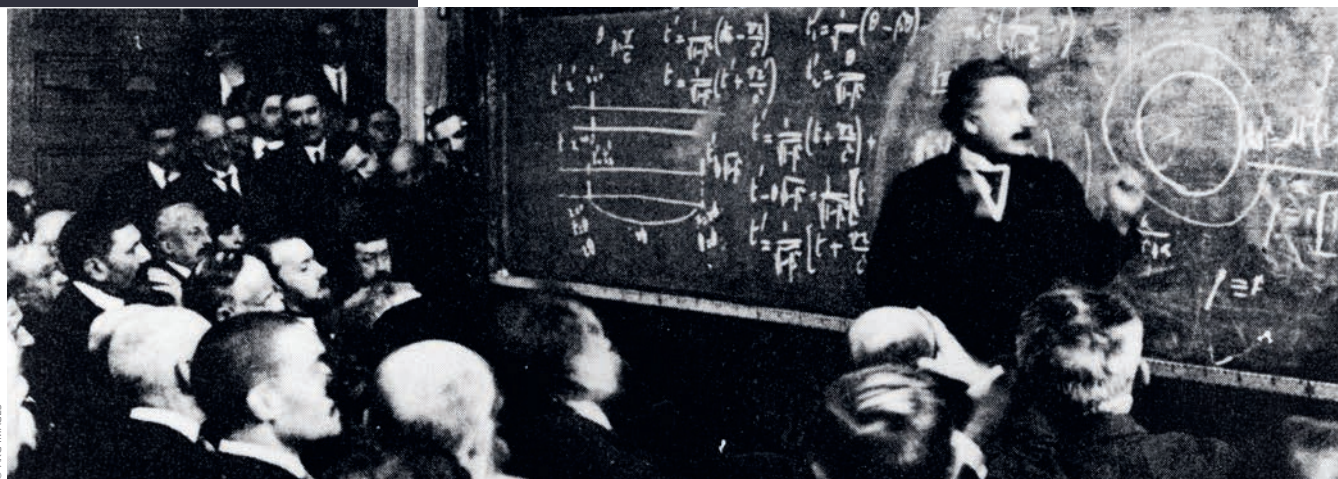
La participation du CNRS, acteur majeur de la recherche en sciences marines, ne se limite pas à celle d'OMER. L'organisme coorganise l'OOSC, organise des *side events* sur l'observation océanique ou sur l'*ocean equity*, et participe à des initiatives scientifiques de portée internationale : le Panel international pour la durabilité de l'océan (IPOS), Space4Ocean, Mercator Ocean International...

¹ <https://ocean.cnrs.fr/groupes-de-travail/>

Fabrizio D'Ortenzio
Directeur du GdR OMER



© COLLECTION PERSONNELLE



© AGF IMAGES

GRAND FORMAT

11

De l'éclair d'Einstein à l'ordinateur de lumière	12
1905, Einstein inaugure l'ère quantique	14
Pascale Senellart, atout quantique	18
Des modèles mathématiques entre art et science	22
Comment le piano a conquis le monde	28



© SOPHIE DABO-NIANG / CNRS

«Le CNRS, acteur majeur
et moteur de la
recherche mondiale»

EN PERSONNE

5

« Le CNRS, acteur majeur et moteur de la recherche mondiale »	6
Brèves	10

EN ACTION

33

Quand le vivant était géant	34
Peut-on télécharger son esprit ?	38
Marie Tharp, pionnière omise de la tectonique des plaques	40
La richesse des langues des signes à portée de clic	43
« La science est indispensable pour comprendre l'océan »	46
Et les plantes colonisèrent la terre ferme... ..	48
Une carte pour visualiser l'énergie dans le cerveau	50
L'optimisation face aux questions éthiques	52
Roses : sur la piste des molécules au parfum enivrant	54
Cancer, le double jeu du fer	56

LES IDÉES

59

Les origines françaises de la bombe atomique	60
À lire	65

LA CHRONIQUE

CNRS Terre et Univers : 40 bougies !	66
--	----



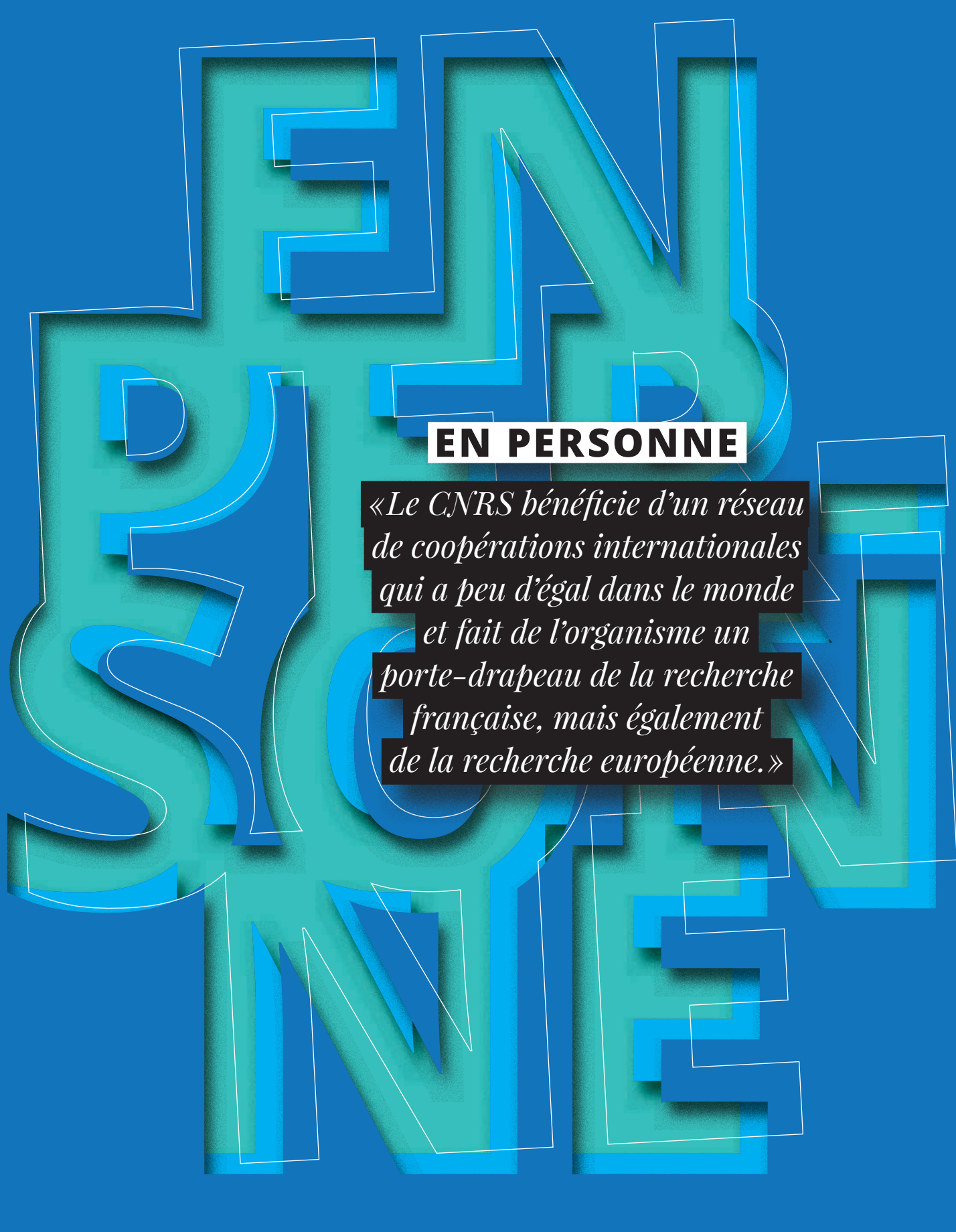
© MORANDI TULLI ET BRUNO / HEMISFER

Roses : sur la piste
des molécules
au parfum enivrant



© US NATIONAL ARCHIVES (ID 623446)

Les origines françaises
de la bombe atomique

The background features large, stylized, 3D letters in shades of blue and teal. The letters 'EN' are at the top, 'PERSONNE' is below them, and 'EN' is at the bottom. The letters have a layered, cut-out appearance with white outlines and shadows.

EN PERSONNE

«Le CNRS bénéficie d'un réseau de coopérations internationales qui a peu d'égal dans le monde et fait de l'organisme un porte-drapeau de la recherche française, mais également de la recherche européenne.»

«Le CNRS, acteur majeur et moteur de la recherche mondiale»

Le CNRS dispose de onze bureaux de représentation à travers le monde. Vous venez de réorganiser ce réseau avec le déménagement d'un bureau du CNRS à São Paulo (Brésil) et l'ouverture récente d'un bureau à Nairobi (Kenya). Pourquoi ces changements stratégiques ?

Alain Mermet Le CNRS bénéficie d'un réseau de coopérations internationales qui a peu d'égal dans le monde. La portée de ce réseau – composé de bureaux de représentation, de laboratoires internationaux (IRL), d'unités mixtes des instituts français de recherche à l'étranger (Umifre), mais aussi d'implantations en outre-mer et, aujourd'hui, de centres internationaux de recherche (IRC) – fait de l'organisme un porte-drapeau de la recherche française, mais également de la recherche européenne.

À la fin des années 1990, 15 % des publications scientifiques mondiales étaient issues de pays à revenu intermédiaire élevé, contre près de 40 % aujourd'hui, témoignant d'un rééquilibrage du paysage de la recherche mondiale.

Les grandes puissances comme la Chine et l'Inde ont bouleversé la dynamique mondiale, quand on

ENTRETIEN En intensifiant sa stratégie internationale, le CNRS vise à s'intégrer dans des dynamiques scientifiques mondiales et à développer des partenariats de premier plan. Alain Mermet, nommé début 2024 à la tête de la direction Europe et international du CNRS, en dévoile les priorités.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURENCE STENVOT

pense qu'il y a vingt-cinq ans, seulement trois pays (États-Unis, Japon et Royaume-Uni) se partageaient la moitié des publications scientifiques. Nos évolutions stratégiques, y compris le déménagement du bureau de São Paulo (Brésil) et l'ouverture récente de celui de Nairobi (Kenya)¹, marquent notre volonté de s'adapter à ces nouvelles dynamiques et de porter dans la durée, dès aujourd'hui, des coopérations avec des puissances scientifiques émergentes, qui pèseront demain sur l'échiquier mondial de la science.

«Le CNRS reste déterminé à capitaliser sur ses nombreux partenariats avec les États-Unis.»

L'élection du président Donald Trump a marqué un tournant aux États-Unis, accompagné d'une remise en cause croissante de la science et de l'expertise scientifique. Quelle lecture faites-vous de cette dynamique sur le plan mondial ?

A. M. Les mesures prises par l'administration Trump à l'encontre de la recherche et de la science en général (coupes budgétaires d'agences fédérales majeures telles que la Nasa, la NSF ou les NIH ; accès réduits à des bases de données de recherche...) rendent nos partenaires universitaires américains inquiets sur l'avenir de la recherche américaine, pourtant leader dans des domaines d'enjeu majeur tels que le climat, l'environnement, ou encore la santé. Ils sont également inquiets sur la politique migratoire de la nouvelle administration, susceptible de menacer le modèle économique des universités américaines, qui accueillent de nombreux étudiants étrangers. Enfin, on ressent de vives inquiétudes sur la place très réduite



► Alain Mermet, docteur en physique des matériaux, a dirigé le bureau du CNRS à Bruxelles de 2021 à 2024.

de la coopération avec l'Afrique, soulignant que c'est sur ce continent qu'une « *partie du basculement du monde* » se jouera. Avec une population estimée à 1,7 milliard d'habitants en 2027, dont 75 % auront moins de 35 ans, l'Afrique possède un formidable potentiel scientifique. De plus en plus de pays du continent africain, et en particulier de l'Afrique subsaharienne, redoublent d'investissements dans la recherche et dans l'enseignement supérieur.

Convaincu des opportunités de coopération inédites avec le continent africain, mais également de son rôle de « révélateur de talents » pour former les prochaines générations de chercheuses et de chercheurs, d'où qu'ils soient, le CNRS a lancé en 2022 un plan pluriannuel de coopérations avec l'Afrique³. Cette stratégie s'inscrit sur le long terme, avec des outils de coopération dédiés prenant en compte les spécificités et les attentes de nos partenaires africains.

C'est dans ce cadre que le CNRS a ouvert en octobre dernier son deuxième bureau de représentation en Afrique, à Nairobi, après celui de Pretoria (Afrique du Sud). Localisé en Afrique anglophone, mais voué à couvrir l'Afrique centrale et l'Afrique de l'Ouest, ce bureau est un peu une nouvelle frontière pour le CNRS. Il reflète une ambition forte : explorer, dans un paysage continental en forte évolution, de nouveaux horizons scientifiques.

À la suite du rapport⁴ de Mario Draghi, l'Union européenne semble désormais vouloir reprendre la

qu'occupera la science dans les processus de décision politique.

C'est dans ce contexte que le CNRS a renouvelé la direction du bureau de Washington². Celui-ci jouera un rôle clé pour suivre ces transformations et assurer un dialogue constant avec l'ensemble de nos partenaires. Il entend aussi promouvoir auprès des jeunes talents, tant américains que ceux d'autres parties du monde traditionnellement tournés vers les États-Unis, que l'Europe, avec Choose Europe for Science, et la France, avec Choose France et Choose CNRS, offrent des opportunités de carrières scientifiques attractives dans des domaines cruciaux pour les sociétés de demain.

Malgré ces incertitudes, le CNRS reste déterminé à capitaliser sur ses nombreux partenariats avec les États-Unis, des partenariats d'excellence empreints de confiance, pour répondre aux grandes questions scientifiques qui sous-tendent les défis technologiques et sociétaux de notre époque.

L'idée que le xxi^e siècle pourrait être celui de l'Afrique est largement partagée. Quel rôle le CNRS peut-il jouer dans cette dynamique ?

A. M. En 2017, le président Emmanuel Macron a appelé à un renouvellement

1. <https://bit.ly/CNRS-saopaulo> et <https://bit.ly/CNRS-Nairobi> 2. Jan Matas, ex-directeur du bureau d'Ottawa, a pris ses fonctions le 1^{er} janvier 2025. 3. <https://bit.ly/CNRS-Afrique> 4. <https://bit.ly/413YWB6>



© THE UNIVERSITY OF ARIZONA/BIOSPHERE 2

main avec plusieurs initiatives clés telles que la « Boussole de la compétitivité », dont la recherche et l'innovation devraient être des éléments centraux pour dynamiser la compétitivité européenne face aux géants américain et chinois. Comment le CNRS participe-t-il à ces efforts européens ?

A. M. Promouvoir la place du CNRS à l'international ne peut se faire aujourd'hui sans l'appui d'une Europe de la recherche forte, attractive et cohésive. Face à des acteurs comme la Chine, dont la production scientifique domine en termes quantitatifs et concurrence sérieusement l'Union européenne et les États-Unis en termes qualitatifs, renforcer l'espace européen de la recherche est un incontournable.

Le CNRS, qui est le premier bénéficiaire historique des programmes-cadres européens, doit donc maintenir le cap à l'Europe, en poursuivant le

▼ Le CNRS est associé depuis 2014 au projet Biosphère 2, à Oracle (Arizona).

déploiement de sa feuille de route européenne tout en consolidant ses relations bilatérales au sein de l'UE. Le bureau de Bruxelles⁵ joue un rôle clé dans cette stratégie, en facilitant les interactions avec les décideurs de la Commission européenne.

Ces dialogues directs avec la Commission, dont différents instituts du CNRS se saisissent, sont nécessaires en cette période de préparation

du prochain programme-cadre. Après son *position paper*⁶ sur le FP10 [*prochain programme-cadre, Ndlr*], à l'été dernier, le CNRS entend défendre, avec ses partenaires du G6, les intérêts d'une recherche européenne dotée de budgets clairement identifiés et sanctuarisés.

Si la participation aux programmes européens demeure une priorité pour le CNRS, maintenir des coopérations bilatérales au sein de l'UE est également une priorité pour renforcer la confiance entre partenaires européens. Ces liens de confiance sont essentiels pour porter ensemble des projets collaboratifs à Bruxelles. Ils le sont d'autant plus avec les partenaires européens qui ne se retrouvent pas nécessairement dans les programmes communautaires, comme les pays du *widening*⁷. En ce sens, les outils de coopération du CNRS tels que les International Emerging Actions (IEA), les International Research

« La participation
aux programmes
européens demeure
une priorité
pour le CNRS. »

▲ Membres d'un programme de recherche commun mené par Sophie Dabo (mathématicienne au CNRS) et Patrick Tchepmo (North-West Univ., Afr. du sud).

Projects (IRP)⁸ ou bien les International Research Networks (IRN)⁹ doivent être davantage exploités comme des leviers pour déposer des projets à l'Europe.

Enfin, une forte participation du CNRS aux programmes européens est un atout pour accroître son rayonnement à l'international. La position du CNRS aux programmes-cadres, qui exprime à la fois l'excellence de ses chercheurs, mais aussi une pratique expérimentée de la mécanique administrative européenne, est un facteur d'attractivité sur la scène internationale – c'est ce que nous disent aujourd'hui nos partenaires anglais, canadiens et néo-zélandais, récemment associés à Horizon Europe.

Comme vous l'évoquez, le CNRS poursuit le développement de son réseau de centres de recherche internationaux (IRC) avec l'ouverture récente d'un nouveau centre

à Sherbrooke, au Canada, portant leur nombre total à six. Quelle est la valeur ajoutée de ces structures pour la recherche française ?

A. M. Rester au meilleur niveau mondial de la recherche implique de renforcer notre coopération avec des partenaires de premier rang qui partagent les mêmes valeurs et une vision commune de la science, au-delà de la sphère européenne. La force de frappe du CNRS à l'international, développée au fil des décennies grâce à des politiques de coopération ambitieuses et sans cesse renouvelées, a permis de répondre à cet impératif, via la création de centres internationaux de recherche.

Initiés en 2021, ces centres sont des cadres structurants de coopération institutionnelle, englobant un ensemble de collaborations pluri- et interdisciplinaires. Ils expriment une volonté commune, avec nos partenaires, de réviser notre logiciel

▲ Campagne de relevés photo et GPS par des chercheurs français et botswanais dans le delta de l'Okavango pour en étudier les crues.



© SOPHIE DABO / CNRS

de coopération, en ancrant nos collaborations dans la durée et dans la confiance, autour de grands enjeux de recherche. Car, bien plus qu'il y a vingt ans, les objets d'intérêt scientifique tels que le climat, les océans, la biodiversité, mais également la santé mondiale, ou la transition énergétique (la liste est bien plus longue !) revêtent un caractère global qui impose des approches et des coopérations d'ordre global.

Les IRC du CNRS ouvrent de nouvelles perspectives de coopération, tant pour aborder des thématiques de recherche transdisciplinaires que pour maximiser l'impact de nos collaborations internationales. La Direction Europe et international œuvrera en 2025 à bâtir des passerelles entre les IRC pour, in fine, bâtir un réseau mondial, empreint du label d'excellence que porte le CNRS sur la scène internationale. Plus que jamais, le CNRS s'affirme comme un acteur majeur, sinon moteur, de la recherche mondiale. ■

5. Alain Mermet a été directeur du bureau du CNRS à Bruxelles de 2021 à 2024. 6. <https://bit.ly/3CRBsFM> 7. Pays de l'UE ou associés considérés comme moins performants en matière de recherche et d'innovation. 8. IRP : ces projets de recherche collaborative, entre un ou plusieurs laboratoires du CNRS et des laboratoires d'un ou deux pays étrangers, consolident des collaborations déjà établies. 9. IRN : ces outils structurent une communauté scientifique à l'international composée d'un ou plusieurs laboratoires français (dont au moins un laboratoire du CNRS) et de plusieurs laboratoires à l'étranger, autour d'une thématique partagée ou d'une infrastructure de recherche.



© CYRIL FRESILLON/SCIENCES FEMMES/CNRS IMAGES

Mehdi Gmar, nouveau directeur général délégué à l'innovation

Mehdi Gmar a succédé à Jean-Luc Moullet comme directeur général délégué à l'innovation (DGGI) du CNRS au 1^{er} mars 2025. Ingénieur en physique et docteur en instrumentation nucléaire, il a précédemment dirigé CNRS Innovation, la filiale dédiée à la valorisation des travaux de recherche. Il pilotera désormais la stratégie d'innovation et de transfert technologique du CNRS. L'ambition : renforcer l'impact économique et sociétal de la recherche publique.



© CYRIL FRÉSSILLON / CNRS IMAGES

Hélène Maury

à la tête de la DRH

Juriste spécialisée en propriété industrielle, Hélène Maury commence sa carrière dans l'industrie, puis rejoint le CNRS en 1999. Elle y occupe plusieurs fonctions stratégiques – de la direction juridique à la direction de cabinet du président, y compris le pilotage administratif de départements scientifiques et la direction de la délégation régionale. Après un passage au Centre national des œuvres universitaires et scolaires et à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale, elle retrouve le CNRS en avril 2025 comme directrice des ressources humaines.



© CYRIL FRÉSSILLON / CNRS IMAGES

Catherine Grandhomme

pilote la Direction des relations
avec les entreprises

Catherine Grandhomme, de formation ingénieure en thermique-énergétique, a été nommée directrice de la Direction des relations avec les entreprises (DRE) du CNRS au 15 mai 2025. Après vingt ans dans l'industrie nucléaire et différentes fonctions de direction d'équipe et de développement d'activités, elle a rejoint le CNRS en 2020, où elle a défini et mis en œuvre la démarche Filières stratégiques pour développer les collaborations de recherche entre les entreprises et le CNRS, au cœur de la mission de la DRE.



© CYRIL FRÉSSILLON / CNRS IMAGES

Florence Morineau

nouvelle déléguée
en Rhône Auvergne

Elle a pris ses fonctions le 12 mai 2025 comme déléguée régionale du CNRS en Rhône Auvergne. Elle a débuté sa carrière à la Commission européenne, avant de rejoindre l'université de Rennes, puis le CNRS, en 2001, où elle a exercé des fonctions en valorisation, gestion et partenariats, puis en tant que déléguée régionale adjointe. Elle était déléguée régionale de l'IRD en Occitanie depuis 2016.



© IRD

Séverine Martrenchard

préside le comité scientifique
du concours CGénial

Déléguée scientifique pour l'éducation, la médiation et la culture scientifiques à CNRS Physique, Séverine Martrenchard prend la présidence du comité scientifique de CGénial, un concours organisé par le dispositif ministériel Sciences à l'école et la Fondation CGénial. Il encourage tous les ans des milliers d'élèves à développer leur créativité scientifique et technique, renforçant l'attrait des carrières scientifiques pour les filles et les garçons.



© CNRS

Anne- Virginie Salsac

reçoit
le Trophée de
l'innovation de
la SATT Lutech

Directrice de recherche au CNRS, au laboratoire Biomécanique et bio-ingénierie (CNRS/Université de technologie de Compiègne), Anne-Virginie Salsac est lauréate du Trophée de l'innovation de la SATT Lutech, qui distingue des projets scientifiques à fort potentiel de transfert technologique. Elle développe des travaux pionniers en mécanique des fluides appliquée au transport biologique, associant ainsi excellence académique et impact concret.



© YANNICK LE MALO



© COLLECTION PERSONNELLE

Anne-Karine Bouzier-Sore

Lauréate du palmarès Forbes France 50 Over 50, organisé en partenariat avec L'Oréal Paris pour célébrer des femmes dont l'expérience inspire et transforme, Anne-Karine Bouzier-Sore, directrice de recherche au CNRS, au Centre de résonance magnétique des systèmes biologiques (CNRS/Université de Bordeaux), explore le métabolisme cérébral par résonance magnétique.

GRAND FORMAT

GRAND FORMAT

« On peut imaginer un labyrinthe dans lequel l'ordinateur classique ne peut explorer qu'une seule direction à la fois, tandis qu'avec la superposition quantique, on peut tester plusieurs chemins en même temps. »

*De l'éclair d'Einstein à
l'ordinateur
de lumière*



À l'aube du xx^e siècle, Einstein bouleverse la physique en dévoilant la nature quantique de la lumière, posant les bases d'une révolution scientifique majeure. Un siècle plus tard, une chercheuse s'empare de cet héritage pour créer une start-up et concevoir un ordinateur quantique photonique, où la lumière devient support du calcul – repensant cette fois l'informatique. Entre audace du passé et innovation de demain, explorez une science en pleine métamorphose.

La Superposition quantique,
huile sur toile (24 x 32 cm)
de Natacha Ivaldi (2024).

1905

Einstein inaugure l'ère quantique

MATIÈRE

HISTOIRE Il y a 120 ans, lors de son année « miraculeuse », Albert Einstein explique l'effet photoélectrique, établissant les prémices de la mécanique quantique. Christian Bracco, historien des sciences, raconte.

PROPOS RECUEILLIS PAR SYLVAIN GUILBAUD



Portrait d'Albert Einstein en 1905.

Pourquoi l'année 1905 est-elle qualifiée de « miraculeuse » pour Albert Einstein ?

Christian Bracco¹ Cette année a été qualifiée a posteriori ainsi, car Albert Einstein signe quatre articles considérés aujourd'hui comme fondateurs de la physique moderne dans la revue de référence *Annalen der Physik*, en plus de sa thèse sur une nouvelle détermination des dimensions moléculaires. Parmi ces articles, il y a celui intitulé « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière » (dans lequel Einstein introduit l'idée que la lumière est constituée de quanta lumineux dont l'énergie dépend de la fréquence), que l'on voit comme les prémices de la

mécanique quantique. Mais il y a aussi l'article sur le mouvement aléatoire de particules dans un fluide (dit « mouvement brownien »), l'article sur la relativité restreinte et, enfin, celui qui établit la célèbre formule $E=mc^2$, sur l'inertie de l'énergie (à partir de variations).

Au premier abord, on a du mal à imaginer que cet ensemble de contributions vient, la même année, de quelqu'un qui était en marge du milieu institutionnel scientifique.

Qui est Albert Einstein en 1905 ?

C. B. Il n'est bien sûr pas encore le scientifique de renommée internationale qu'il deviendra après la Première Guerre mondiale, lorsque sa théorie de la relativité générale

sera confirmée par les observations d'Arthur Eddington sur la déviation de la lumière par le Soleil (1919) et qu'il sera présenté médiatiquement comme le nouveau Newton. En 1905, à 26 ans, Einstein est expert technique de 3^e classe au Bureau des brevets et de la propriété intellectuelle de Berne. Il est sorti diplômé de l'École polytechnique fédérale de Zurich en 1900, mais il ne trouve pas de poste d'assistant².

Il commence néanmoins une première thèse sur les forces moléculaires. Mais, probablement car il se trouve dans une impasse scientifique, il l'abandonne. Il continue des recherches sur

la théorie thermodynamique de Ludwig Boltzmann et publie en 1904 un article sur les fluctuations d'énergie dans *Annalen der Physik*. Si on lit entre les lignes de cet article, on comprend qu'à la fin, Einstein a déjà l'idée de ce qui deviendra plus tard les photons.

Quelle est l'origine de cette idée de quanta lumineux ?

C. B. La difficulté, pour l'historien, c'est qu'Einstein n'a pas laissé de traces de ses brouillons ou de ses réflexions de l'époque, hormis les lettres qu'il écrit à Mileva Marić, rencontrée à l'École polytechnique fédérale de Zurich et qu'il épousera en 1903, ou à son grand ami Michele Besso.

Par l'intermédiaire de ce dernier, on sait que, dès 1895, Einstein s'intéressait, entre autres, au débat issu du XVII^e siècle sur la nature de la lumière – Isaac Newton pensait qu'elle était constituée de corpuscules et Christian Huygens argumentait qu'elle était faite d'ondes. Fin XIX^e, la nature ondulatoire de la lumière est admise. Il semble pourtant qu'Einstein garde en tête l'idée de Newton, peut-être parce que la théorie atomique de la matière progresse et que c'est l'époque de la découverte de l'électron.

Une racine importante de l'article d'Einstein sur les quanta, ce sont les travaux de Max Planck sur le rayonnement du corps noir³. De quoi s'agit-il ?

C. B. À la fin du XIX^e siècle, on sait que la matière émet du rayonnement, dont les caractéristiques, dans le cas d'un corps dit « noir », ne dépendent que de la température. L'exemple type est l'enceinte d'un four en train de chauffer : on doit pouvoir calculer comment se répartit l'énergie du

« Einstein publie en 1904 un article sur les fluctuations d'énergie. Si on lit entre les lignes, on comprend qu'à la fin, il a déjà l'idée de ce qui deviendra les photons. »

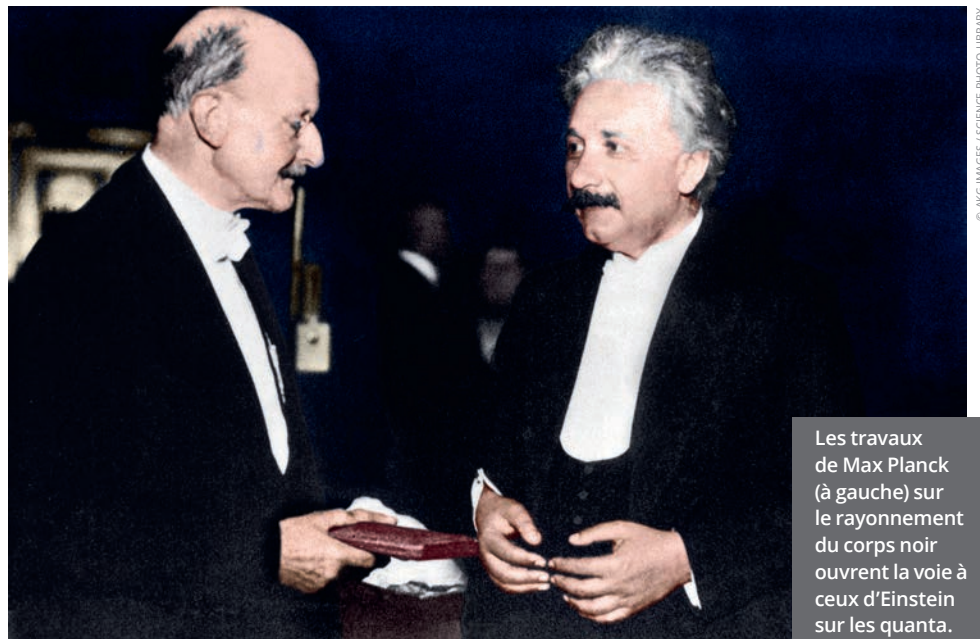
rayonnement en fonction de sa longueur d'onde. Or les physiciens n'arrivaient pas à trouver la formule qui fonctionne pour toutes les longueurs d'onde et qui corresponde aux résultats expérimentaux.

En octobre 1900, Max Planck propose une loi générale et, en décembre, une explication en introduisant pour la première fois des quanta, des paquets d'énergie discrets, au sens mathématique du terme. Mais, attention : il ne pense pas que la lumière est elle-même discrétisée, comme le fera Einstein. La lumière reste ondulatoire, mais l'enceinte du four est vue comme un ensemble de petites antennes (« résonateurs » hertiens) sur lesquelles l'énergie lumineuse se répartit par paquets d'énergie.

En avril 1901, Einstein écrit à Mileva Marić qu'il a du mal à faire sienne l'hypothèse des résonateurs. En mai, il lit l'article de Philipp Lenard sur l'effet photoélectrique.

En quoi consiste cet effet photoélectrique ?

C. B. Les physiciens ont observé qu'en éclairant une cathode métallique, on pouvait recueillir un courant électrique. Par ses expériences faites dans le vide, publiées en 1900, Philipp Lenard montre indubitablement que des électrons sont arrachés du métal quand la fréquence de la lumière dépasse un certain seuil, qui dépend du matériau. Dans une lettre à Mileva Marić, en mai 1901, Einstein est transporté de joie par cette lecture. Il a



Les travaux de Max Planck (à gauche) sur le rayonnement du corps noir ouvrent la voie à ceux d'Einstein sur les quanta.

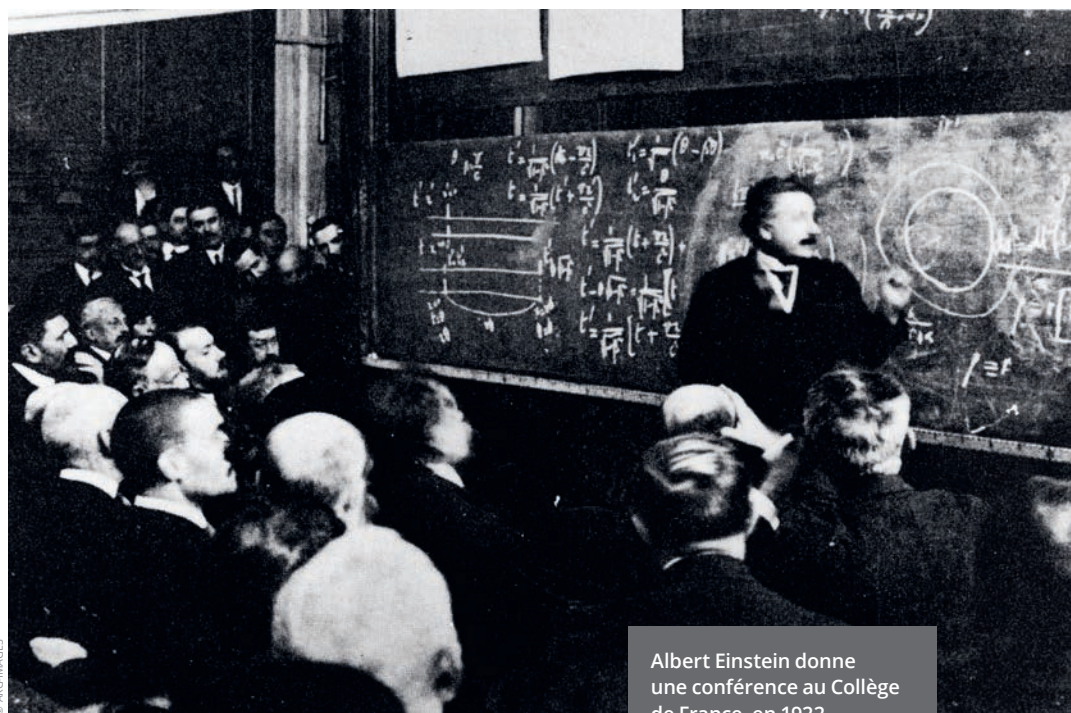
1. Maître de conférences à l'université Côte d'Azur et chercheur au Laboratoire Temps Espace (LTE, unité CNRS/Observatoire de Paris-PSL/Sorbonne Université), il est aussi l'auteur de *Quand Albert devient Einstein* (CNRS Éditions, 2017). 2. Sur les années 1895-1902, lire aussi doi.org/10.4081/scie.2018.663 3. Corps noir : corps qui absorbe intégralement l'énergie électromagnétique reçue.

vraisemblablement compris que cela mettait en évidence quelque chose auquel il pensait.

En effet, l'effet photoélectrique questionne la théorie ondulatoire de la lumière car, si vous éloignez la source, l'énergie de l'onde devrait être trop faible pour arracher les électrons. Au contraire, si la lumière arrive par paquets dont l'énergie dépend de la fréquence, on peut comprendre qu'elle communique son énergie aux électrons et qu'ainsi elle produise un courant à partir d'un certain seuil (correspondant à l'extraction des électrons du métal). Mais personne ne songe à cela en 1901, sauf Einstein, qui a des idées originales et tisse des liens entre les travaux des différents auteurs qu'il a étudiés.

Quelle est la réception de l'article d'Einstein de 1905 sur les quanta par la communauté scientifique ?

C. B. Dans l'article, Einstein raisonne par analogie entre le rayonnement du corps noir et un gaz parfait comme décrit par Boltzmann, et montre que tout se passe comme si la lumière était constituée d'un gaz de particules dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence. L'effet photoélectrique est une application pour laquelle Einstein formule une prédiction. Il n'interprète pas la loi complète précédemment trouvée par Max Planck, mais seulement une approximation valable pour les courtes longueurs d'onde (la loi de Wien, de 1896).



Albert Einstein donne une conférence au Collège de France, en 1922 – année où il reçoit le prix Nobel de physique 1921.

Néanmoins, il sait que son hypothèse est révolutionnaire. De nombreux scientifiques, comme Planck, n'accepteront pas alors les quanta lumineux. Cependant, dès 1913, Niels Bohr les utilisera pour son modèle qui décrit les électrons sur des orbites stables autour d'un atome. Ces électrons effectuent des sauts d'énergie en absorbant et émettant des quanta de lumière. On parle de niveaux « quantifiés » d'énergie. Le modèle permet de retrouver les valeurs expérimentales des raies d'émission de l'atome d'hydrogène. C'est un des premiers résultats importants de la physique quantique naissante.

Puis, en 1916, les expériences de Robert Millikan sur l'effet photoélectrique confirment la loi donnée

par Einstein. En 1923, Arthur Compton montre que les quanta lumineux portent effectivement une quantité de mouvement, qu'ils peuvent transmettre à la matière. Ils deviennent des particules à part entière, qu'on appelle aujourd'hui « photons ».

Einstein a reçu le prix Nobel de physique en 1922 « pour ses travaux sur la physique théorique et en particulier sur l'interprétation de l'effet photoélectrique ».

A-t-il apporté d'autres contributions à la mécanique quantique ?

C. B. Oui. En 1916, Einstein utilise les quanta pour introduire l'effet d'émission stimulée – c'est-à-dire le fait que, lorsqu'un photon arrive avec l'énergie adéquate sur un atome excité, ce dernier émet dans la même direction un photon rigoureusement identique. Cinquante ans plus tard, cet effet sera la base du fonctionnement des lasers.

En 1924, la statistique de Bose-Einstein permet de décrire l'état des bosons, la famille de particules dont les photons font partie. Elle prédit qu'à basse température, des atomes se comportant comme des bosons

« En 1916, Einstein utilise les quanta pour introduire l'effet d'émission stimulée (...). Cet effet sera la base du fonctionnement des lasers. »

peuvent se retrouver tous dans un même état. Ces « condensats de Bose-Einstein » sont observés en laboratoire aujourd'hui et il s'agit d'un état purement quantique de la matière.

Einstein semble ensuite s'être éloigné de la mécanique quantique. Pourquoi ?

C. B. Il s'était déjà tourné vers d'autres sujets, comme la relativité générale. Il n'a pas directement participé au développement de cette mécanique quantique dont on célèbre le centenaire cette année. Cela a été l'œuvre de scientifiques comme Born, Heisenberg, Jordan ou encore Schrödinger ou Dirac. Ceux-ci avaient une approche très mathématique qui ne satisfaisait pas Einstein. Sans remettre en cause leurs résultats, il les critiquait, considérant que la mécanique quantique n'était pas



Le prix Nobel de physique 1921 remis à Einstein.

© THE HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM

complète. Il a par exemple contribué en 1935 à un article montrant que la mécanique quantique permet que, dans certains systèmes de deux particules, le résultat d'une mesure sur l'une conditionne instantanément le résultat de la mesure sur l'autre, semblant contredire au caractère

fini de la vitesse de propagation de l'information. C'est le « paradoxe EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) ». On appelle aujourd'hui cela l'« intrication », que des expériences comme celle d'Alain Aspect (colauréat du prix Nobel de physique 2022) ont démontrée.

Ainsi, même en critiquant le développement de la physique quantique, Einstein a contribué à donner naissance à un nouveau concept au cœur de la recherche actuelle dans les technologies quantiques. [II](#)

En 1927, le 5^e Congrès Solvay de physique, avec Einstein (1^{er} rang, au centre) et 16 autres Nobel ou futurs Nobel, traite notamment de la mécanique quantique.



© BENJAMIN COUPRIE, BRUXELLES

Pascale Senellart, atout quantique

© CYRIL FRÉSSILLON / CHRS IMAGES

Pascale Senellart étudie les boîtes quantiques depuis 2002.

NUMÉRIQUE

INFORMATIQUE Reconnue pour ses travaux sur les boîtes quantiques, la physicienne mène ses recherches au sein du laboratoire commun au Centre de nanosciences et de nanotechnologies et à la start-up qu'elle a cofondée. Dans son viseur : les technologies quantiques à base de photons. Portrait.

PAR THOMAS ALLARD

Pascale Senellart est une passionnée de physique quantique. Depuis plus de vingt ans, la directrice de recherche au Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N)¹ scrute l'infiniment petit. Ses objets d'étude sont les photons (les petits grains élémentaires de lumière) et les boîtes quantiques qui peuvent générer ces derniers « à la demande ». Ces nanostructures semi-conductrices en forme de lentille aplatie et constituées d'un amas d'environ 10 000 atomes ont été découvertes par hasard il y a quarante ans, alors que les chercheurs développaient de nouveaux matériaux pour fabriquer des lasers.

Au départ, la communauté scientifique ne leur trouve pas d'utilité concrète dans ce domaine. Mais une expérience menée en 1994 par le physicien Jean-Yves Marzin² va tout changer. « Dans cet article fondateur, les scientifiques mesurent pour la première fois l'émission de lumière par un seul de ces nano-objets et montrent que les niveaux d'énergie des électrons y sont quantifiés, détaille la chercheuse. Nous avons alors la preuve que la boîte quantique se comporte comme un atome unique. » Une sorte d'atome artificiel, en somme.

Ces travaux seront essentiels pour les recherches menées par Pascale Senellart, qui commence à étudier ces boîtes quantiques en 2002. Car si, dans la nature, l'atome est le seul système qui puisse émettre de la lumière en générant les photons un par un, ces boîtes quantiques se révèlent bien plus faciles à manipuler en laboratoire qu'un atome individuel. « Cependant, les chances de pouvoir récupérer le photon étaient très minces, car il est émis dans toutes les directions de l'espace », nuance

1. Unité CNRS/Université Paris-Saclay/Université Paris Cité. Le C2N est né du regroupement du Laboratoire de photonique et de nanostructures (LPN) et de l'Institut d'électronique fondamentale (IEF). 2. Jean-Yves Marzin, décédé en 2023, a été directeur de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (Insis). Il a notamment consacré ses recherches aux propriétés optiques des micro- et nanostructures.

Sources de photons uniques vues au microscope électronique. Chaque « roue » est une cavité optique qui permet de collecter les photons uniques émis par la boîte quantique placée en son centre.

la chercheuse. Or le physicien Edward Purcell a montré en 1946 que *« l'émission de lumière par un atome est une propriété qui dépend à la fois de ce dernier, mais aussi de son environnement électromagnétique »*.

En plaçant l'atome artificiel dans une cavité optique, il se trouve piégé entre deux miroirs, qui vont constituer une caisse de résonance pour la lumière. L'atome se couple ainsi au vide du champ électrique confiné à l'intérieur de la cavité. Les scientifiques peuvent dès lors le forcer à émettre son photon dans une direction précise.

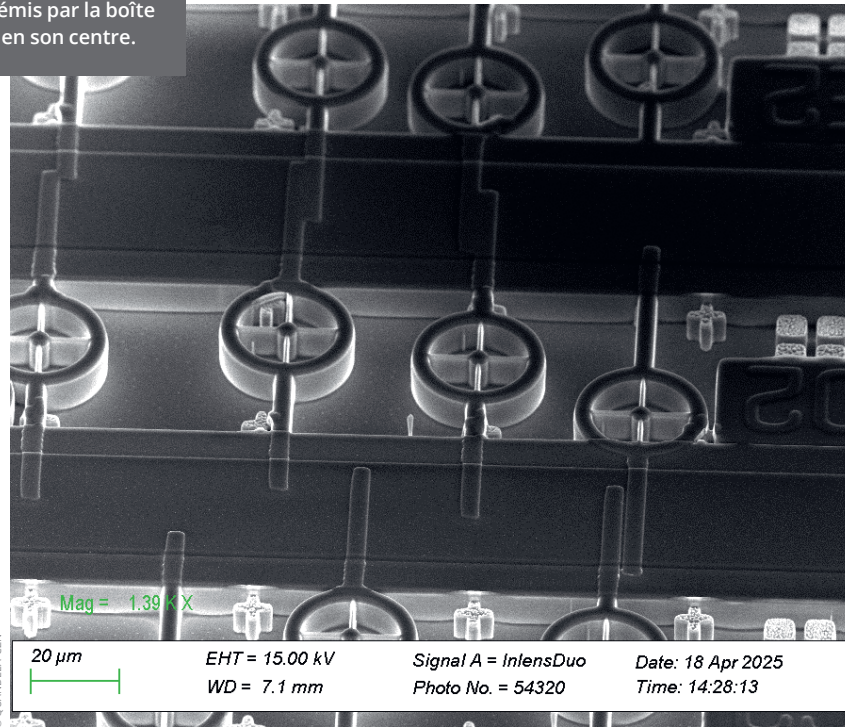
Mais un obstacle restait à franchir : comment positionner précisément une boîte quantique unique – ou atome artificiel – au sein d'une cavité ? Durant de longues années, de nombreux scientifiques ont tenté de forcer les boîtes quantiques à se former en un lieu précis. *« Cette technique fonctionnait, mais les photons émis étaient alors de mauvaise qualité. L'approche que j'ai proposée dès 2005 était différente. Il s'agissait de laisser la boîte quantique se former où elle le souhaite, puis de la détecter avec une précision nanométrique en la faisant interagir avec un laser. Ensuite, nous construisons la cavité optique en forme de cylindre autour. »*

Deux ans plus tard, cette idée *« un peu farfelue »* devient réalité. Une réelle avancée dans le domaine de l'optique quantique : *« Cela nous a permis de générer des photons à la demande, et nous étions désormais capables d'en récupérer une grande partie (près de 80 %) dès 2013 ! »* La médaille d'argent du CNRS récompense ces travaux en 2014.

Intriquer les photons

De nombreux scientifiques travaillant dans le domaine du calcul et des communications quantiques à base de lumière contactent alors Pascale Senellart : *« Ces chercheurs qui utilisent le photon pour encoder l'information étaient particulièrement intéressés par nos résultats. »*

En effet, ces grains de lumière sont des particules de choix pour encoder des bits quantiques (ou qubits), les éléments de base des calculateurs quantiques.



Dans un ordinateur équipé de bits classiques, l'information se résume à une succession de 0 et de 1. L'ordinateur quantique, lui, utilise des qubits qui sont à la fois des 0 et des 1, dans un état que l'on dit « superposé ».

Hélas, *« les photons que nous étions parvenus à générer à l'époque n'étaient pas d'assez bonne qualité »* pour cette application, précise la chercheuse. Réaliser des ordinateurs quantiques à base de lumière nécessite de travailler avec des photons indiscernables. La boîte quantique doit donc générer des trains de photons parfaitement identiques en tout point – condition indispensable afin que ces grains de lumière puissent s'intriquer (afin que leurs états quantiques restent liés quelle que soit la distance les séparant).

Or le fait d'intriquer ces photons permet de démultiplier largement la puissance de calcul, explique la physicienne : *« On peut imaginer un labyrinthe dans lequel l'ordinateur classique ne peut explorer qu'une seule direction à la fois, tandis qu'avec la superposition quantique, on peut tester plusieurs chemins en même temps. En ajoutant l'intrication à cette image, on permet en quelque sorte à plusieurs particules quantiques d'explorer conjointement l'ensemble des chemins en parallèle et, ainsi, de trouver la sortie beaucoup plus rapidement. »*

Mais générer des photons identiques reste difficile, souligne Pascale Senellart : *« Le moindre champ électrique qui interagit avec mon atome artificiel va le perturber, ce qui conduit à l'émission de photons différents. »* Entre 2013 et 2016, la chercheuse et son équipe redoublent d'efforts

L'ordinateur quantique utilise des qubits qui sont à la fois des 0 et des 1, dans un état que l'on dit "superposé".

afin de mettre au point un système dans lequel l'atome artificiel interagirait le moins possible avec son environnement. Ils ajoutent notamment un contrôle électrique, chargé d'évacuer les électrons perturbateurs situés au voisinage de l'atome. Bingo !

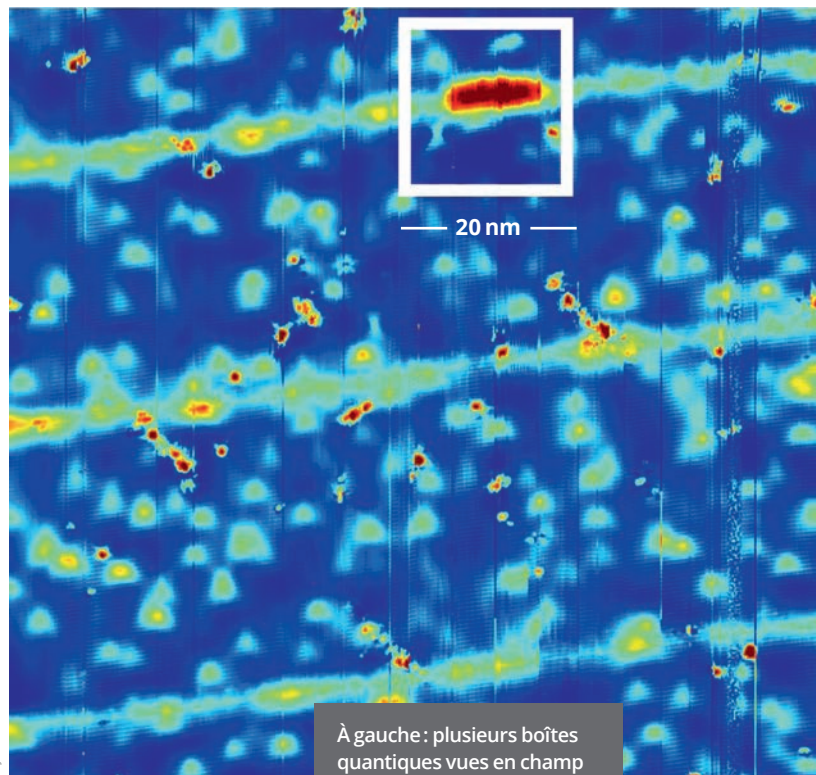
« En 2016, nous avons atteint un niveau de 99,5 % d'indiscernabilité. » Le résultat est si incroyable que la chercheuse en reste bouche bée : « C'était trop beau pour être vrai ! » Pascale Senellart et son équipe viennent de mettre sur pied des photons adaptés aux calculs quantiques.

La révélation dans un radiotélescope

Mais comment la chercheuse est-elle tombée dans la marmite quantique ? Si, enfant, Pascale était une bonne élève, la science ne sonnait pas comme une évidence. Née en 1972 à Corbeil-Essonnes, elle grandit près d'Orléans. Sa mère est institutrice, et son père, commercial chez IBM.

La jeune Pascale et ses parents font régulièrement la route pour se rendre à Quincy, près de Bourges, où résident ses quatre grands-parents. « Sur le trajet, nous passions toujours devant la station de radioastronomie de Nançay, où se trouve l'un des premiers grands radiotélescopes au monde. » Avec ses deux miroirs de 35 et 40 mètres de haut, la structure l'intrigue et pique sa curiosité. Alors, au moment de choisir un lieu d'accueil pour son stage de troisième, la collégienne n'hésite pas : ce sera à la station de Nançay.

« C'était une semaine extraordinaire, se remémore-t-elle. J'ai commencé mon stage auprès d'un technicien, mais je posais tellement de questions qu'ils ont fini par me mettre avec les chercheurs. » Puis elle y retourne à chaque période de



© JEAN-CHRISTOPHE GIRARD / C2N

À gauche : plusieurs boîtes quantiques vues en champ large par microscopie à effet tunnel. À droite : boîte quantique (placée au centre de la cavité optique) isolée.



Pascale Senellart au côté de l'ordinateur à photonique quantique fabriqué par la start-up française Quandela, à Massy.

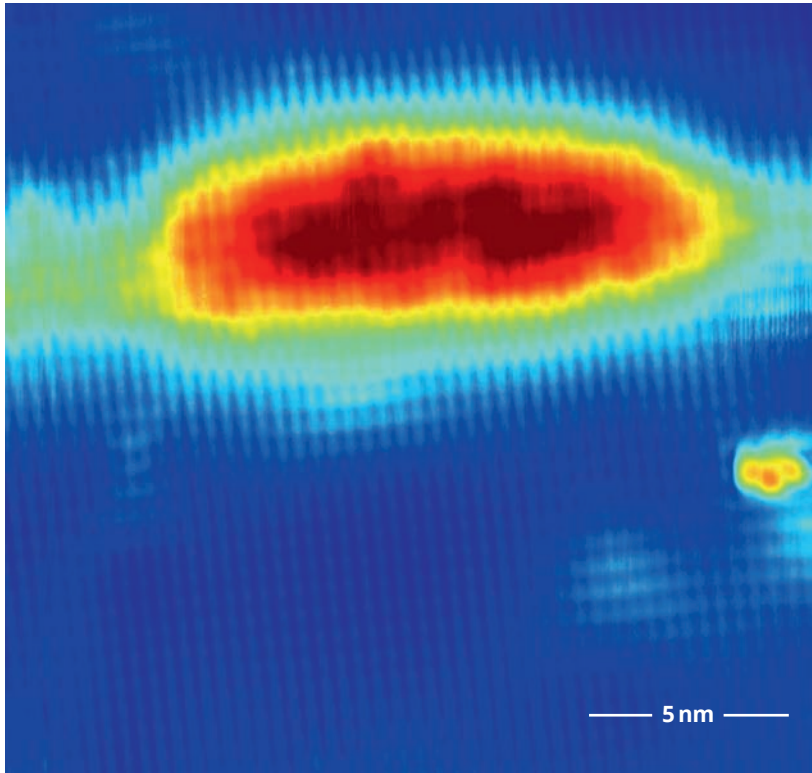
© CYRIL FRÉJOLON / CNRS IMAGES

vacances scolaires. « Je me sentais bien avec tous ces gens qui prenaient le temps de m'expliquer leurs études scientifiques. » Après son bac, elle souhaite intégrer les classes préparatoires aux grandes écoles. Direction la capitale : elle entre au prestigieux établissement Louis-le-Grand. Déjà, les notions de physique quantique l'intriguent : « Je savais juste que c'était une science différente, un peu mystérieuse. »

Tout bascule lors d'un oral du concours de l'École nationale supérieure (ENS) de Lyon. Dans un exercice soumis par les professeurs, un flux de lumière passe à travers deux fentes en même temps, puis forme des franges d'interférence en arrière-plan. « Il fallait imaginer qu'on baisse le flux jusqu'à ce qu'il n'y ait plus qu'un seul grain de lumière, un photon, qui passe entre ces fentes. Puis ils m'ont fait faire un exercice de pensée extraordinaire, qui permet d'aborder les fondements de la mécanique quantique : si j'essayais de savoir par où passe ce photon solitaire, alors je perdais la figure d'interférence. » Les examinateurs viennent d'ouvrir une porte que la future chercheuse ne refermera jamais. Pascale Senellart sait désormais qu'elle fera de la physique quantique.

Entre CNRS et industrie

Finalement, elle n'intègre pas l'ENS, mais Polytechnique, en 1993. Là, l'étudiante découvre enfin la mécanique quantique. Mais elle se passionne aussi pour l'univers des matériaux semi-conducteurs, grâce à sa rencontre avec les physiciens Claude Weisbuch et Claudine Hermann, « la première femme professeure de l'histoire de l'École



« Notre premier modèle équipé de six qubits a vu le jour fin 2022, et nous travaillons pour augmenter continuellement ses capacités. »

polytechnique ». Pascale Senellart entame alors un doctorat portant sur ces intrigants objets de recherche. Elle soutient sa thèse en 2001, puis passe quelques mois dans un laboratoire industriel, chez Schlumberger (actuel SLB), où elle met au point des lasers semi-conducteurs pour détecter la composition du gaz naturel. Elle prend ensuite un poste d'attachée temporaire d'enseignement et de recherche à l'université Paris 7, tout en continuant ses travaux dans un autre laboratoire industriel, chez Thales.

Un an plus tard, elle postule au CNRS et intègre le Laboratoire de photonique et nanostructures. « *C'était un rêve qui se réalisait enfin* », confie la physicienne.

Son passage dans l'industrie a changé sa manière d'analyser les choses, assurent les chercheurs qui l'ont connue au cours de sa thèse. Mais cela a aussi suscité chez elle un réel esprit d'entreprise. Alors, au moment où son jeune collègue Niccolò Somaschi lui propose de fonder une start-up pour commercialiser les sources de photons uniques qu'ils ont développées en laboratoire, elle décide de le suivre dans l'aventure.

Avec Valérian Giesz, alors doctorant au C2N, ils mettent sur pied Quandela en 2017. « *Nous avons des profils très complémentaires et l'entente est vraiment excellente* », analyse la chercheuse, qui rejoint l'Académie des sciences en 2022, puis l'Académie des technologies en mars 2025.

Un laboratoire commun

À l'image des photons intriqués qu'elle étudie, Pascale Senellart explore plusieurs voies en parallèle. Les allers-retours entre la start-up et le C2N sont facilités par la création d'un laboratoire commun, QDLight, en 2024. « *Les études menées chez Quandela nourrissent les recherches fondamentales du C2N, et inversement. C'est une boucle de rétroaction positive permanente* », s'enthousiasme-t-elle.

Depuis 2020, la start-up a pris une nouvelle dimension. La chercheuse et ses collègues se sont lancés dans la course à l'ordinateur quantique : « *Notre premier modèle équipé de six qubits a vu le jour fin 2022, et nous travaillons pour augmenter continuellement ses capacités.* »

Le supercalculateur quantique du futur verra-t-il le jour dans les laboratoires de Quandela ? Une chose est sûre : dans ce domaine de recherche en plein essor, nous ne sommes pas au bout de nos surprises. « *En travaillant sur la génération et la manipulation des photons, se réjouit la scientifique, nous passons notre temps à ouvrir de nouvelles voies d'études fondamentales qui déboucheront peut-être sur d'autres applications.* » ||





1. Redécouverts dans les années 1980, les plus de 600 modèles mathématiques de la collection, devenue l'un des emblèmes de l'Institut Henri Poincaré (IHP), ont bénéficié d'un nouvel inventaire exhaustif, achevé en 2022 après trois années de travail. Pris en photo et scientifiquement décrits, ils sont depuis tous consultables sur le site de l'IHP². Près de 300 d'entre eux sont exposés dans la bibliothèque et une quarantaine, installés au sein de l'exposition permanente de la Maison Poincaré depuis son ouverture, en 2023.

Des modèles mathématiques entre art et science

NUMÉRIQUE

MATHÉMATIQUES Depuis 1928, l'Institut Henri Poincaré¹, à Paris, héberge plus de 600 modèles mathématiques. Conçus à la fin du XIX^e siècle pour l'enseignement universitaire, ces objets ont inspiré les artistes surréalistes. Désormais numérisée, cette collection, l'une des plus importantes du monde, est en partie exposée à la Maison Poincaré.

TEXTE PAR MAXIME LEROLLE
PHOTOS HENRI DUVILLARD

© COLLECTIONS DE L'INSTITUT HENRI POINCARÉ, PARIS (CC BY-NC-SA)



2. Près de la moitié des modèles de la collection de l'IHP provient de fabricants allemands, Ludwig Brill, puis Martin Schilling. Leur production industrielle de modèles en bois et plâtre révolutionna l'enseignement de la géométrie descriptive, qui reposait jusqu'alors sur la fabrication de tels supports par les professeurs. L'IHP possède près de 300 objets de leurs catalogues – la plus grosse collection au monde... et celle en meilleur état. Ce modèle en bois représente une surface de Kuen, à la courbure en tout point constante et négative. (Coll. Brill-Schilling, cote Ct-Neg-009.)

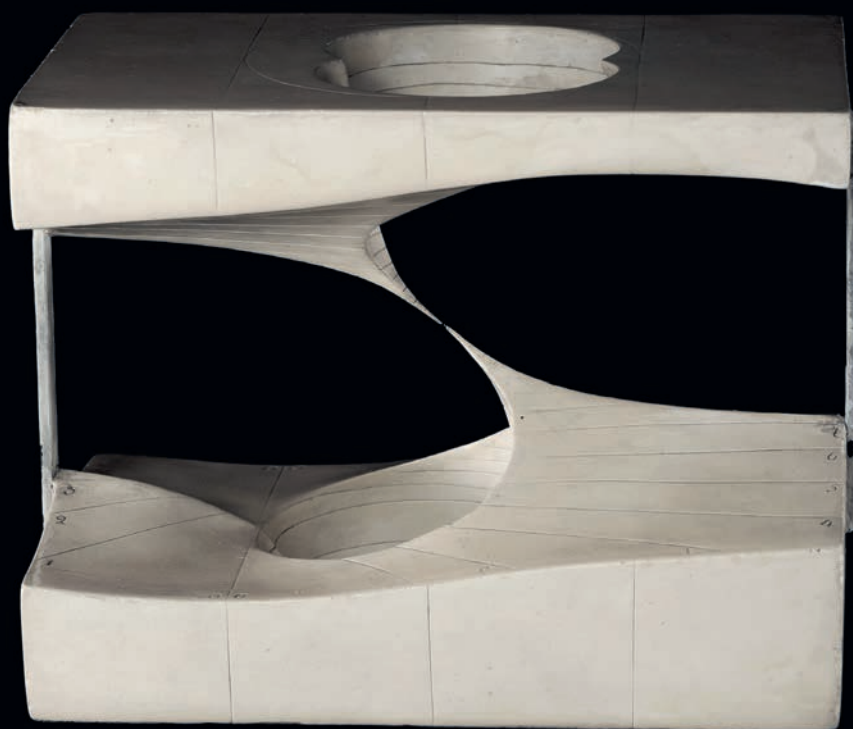
¹. Unité CNRS/ Sorbonne Université. ². Collection patrimoniale de l'IHP : <https://patrimoine.ihp.fr>

3. En parallèle de l'industrie allemande, une petite industrie française vit le jour à la fin du XIX^e siècle. L'IHP possède ainsi une centaine d'objets du catalogue d'un géomètre français, Charles Muret, à l'instar de ces cercles de Villarceau en plâtre. Ces figures constituent deux cercles obtenus en sectionnant un tore selon un plan diagonal bitangent qui passe par le centre du tore. (Coll. Muret, cote Cy-Tor-003.)



4. L'industrialisation des modèles mathématiques n'a pas mis un terme à leur fabrication artisanale. L'IHP abrite ainsi une collection unique au monde, extrêmement bien conservée, d'une soixantaine d'objets. Cette surface cubique non réglée et ses 27 droites réelles furent façonnées à la main par le mathématicien Joseph Caron, à la demande de son collègue Gaston Darboux. (Coll. Caron, cote Cu-Dro-003.)

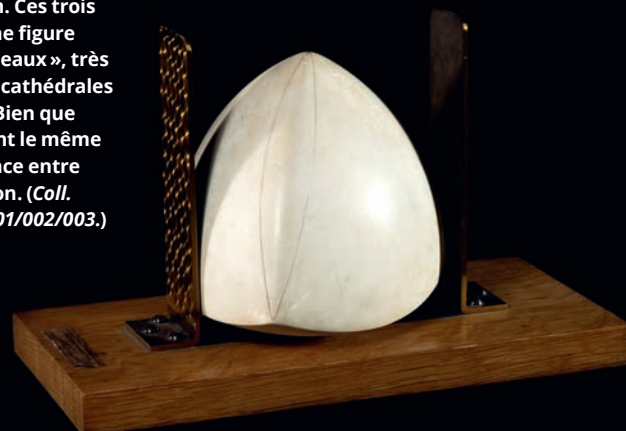


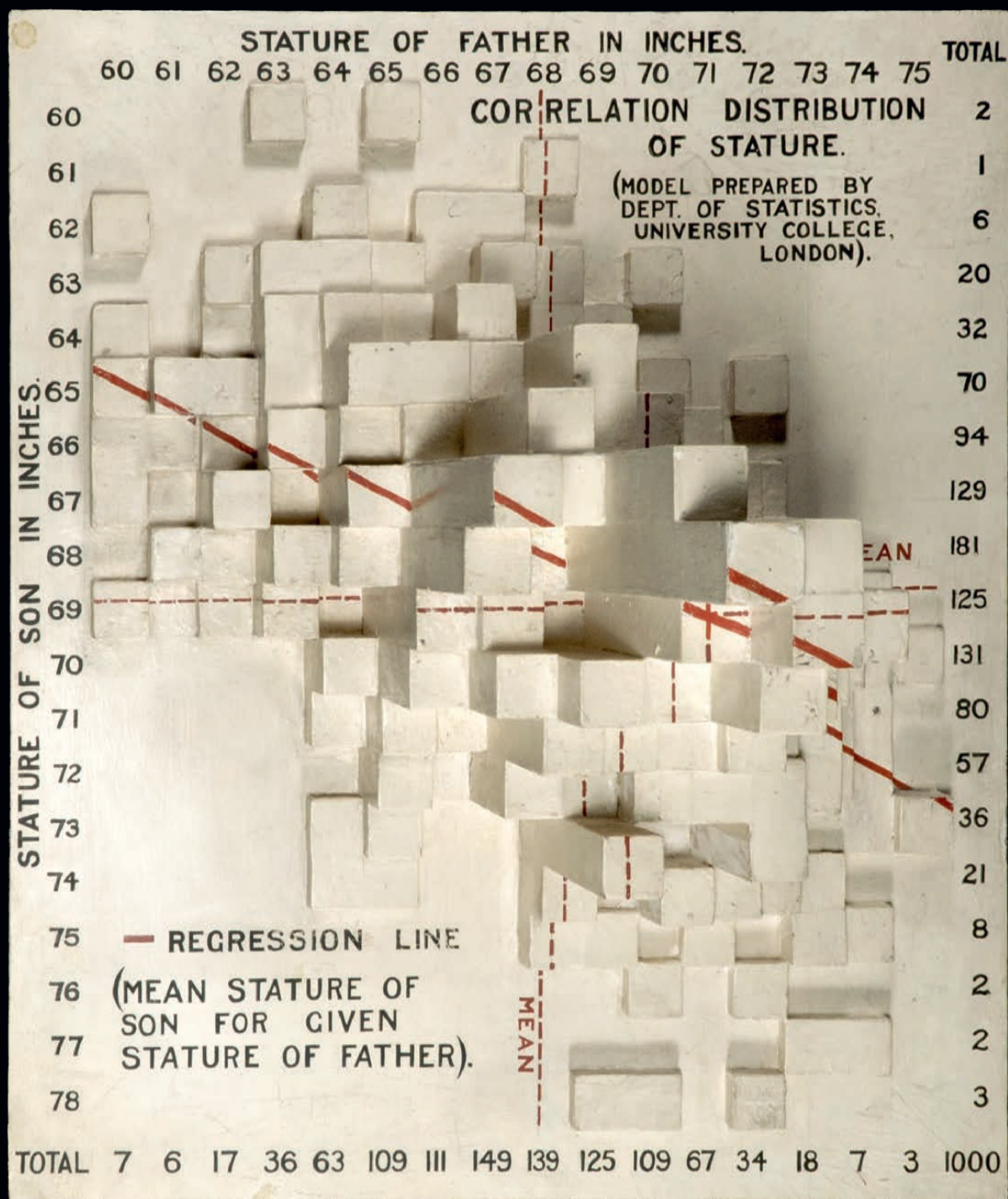


5. Quelques autres modèles relèvent le défi de figurer des phénomènes invisibles sous une forme matérielle. Ce volume représente la surface courbée de la lumière, que l'on peut par exemple observer via les taches lumineuses au fond d'une piscine. (Coll. Brill-Schilling, cote Gd-Cau-001.)



6. Certains modèles privilégient une fonction de démonstration. Ces trois volumes généralisent une figure appelée le « triangle de Reuleaux », très utilisée dans les rosaces des cathédrales gothiques notamment. Bien que de formes différentes, ils ont le même diamètre, égal à la distance entre les deux plaques en laiton. (Coll. Brill-Schilling, cotes Sg-Lgc-001/002/003.)





7. Si les modèles tombèrent en désuétude et perdirent leur utilité pédagogique au cours des années 1930-1940, il subsista dans les décennies suivantes une production marginale à des fins de médiation scientifique. Dans les années 1980, le Palais de la découverte fabriqua de nombreux objets, cédés à l'IHP, à l'image de cette planche dite « de Galton » (du nom du scientifique anglais Francis Galton), qui représente une analyse statistique indiquant la corrélation entre la taille des pères et celle de leur fils. (Coll. modèles mathématiques, cote Od-004.)



8. Tandis que les modèles perdaient leur fonction pédagogique originelle, ils gagnèrent très vite, après l'ouverture de l'IHP, un autre public : les artistes, notamment les surréalistes. Initié par le peintre Max Ernst, Man Ray fut saisi par ces objets et s'en nourrit autant pour des photographies que pour sa série de tableaux intitulée *Équations shakespeariennes*, qui rendirent la collection célèbre dans le monde entier et assurèrent sa conservation. Ici, un modèle d'une surface développable sur le parabolôïde de révolution de 12^e ordre et 10^e classe, qui rappellera à l'artiste l'histoire de Roméo et Juliette. (Coll. Brill-Schilling, cote Qd-005.)

9. Même si des logiciels de visualisation ont remplacé les modèles géométriques aussi bien pour l'enseignement que la recherche, nombre de mathématiciennes et mathématiciens continuent de créer eux-mêmes de tels objets – tant par souci de les visualiser dans l'espace réel que par plaisir de les concevoir et manipuler. Dans les années 2010, l'IHP a ainsi reçu du mathématicien hongrois Gábor Domokos et de l'ingénieur Péter Várkonyi ce *gömböc*, une forme particulièrement rare, dotée d'un unique point d'équilibre stable et d'un unique point d'équilibre instable, de sorte qu'il revient toujours à la même position. Celui-ci est numéroté « 1928 » en référence à la date de naissance de l'institut. (Coll. modèles mathématiques, cote Sg-Sta-001.)





Des esclaves transportent un piano à queue, en Amérique du Sud, au XIX^e siècle.

Comment le piano a conquis le monde

SOCIÉTÉS



MUSIQUE Fabriqués surtout en Angleterre et en France à partir du début du XVIII^e siècle, les pianos furent exportés en masse, surtout en Amérique. Voici l'étonnante saga d'un instrument qui a traversé océans, classes sociales et styles de musique.

PAR MARINA JULIENNE

Nous sommes à Rio de Janeiro, en 1862. Sur cette gravure (ci-dessus), six esclaves portent sur leur tête un piano à queue de plus de 600 kg. Il y a de fortes chances que ce soit un Pleyel ou un Gaveau. Cette scène, qui semble aujourd'hui incongrue, est emblématique d'un commerce florissant à l'époque, celui des pianos exportés depuis l'Europe dans le monde entier.

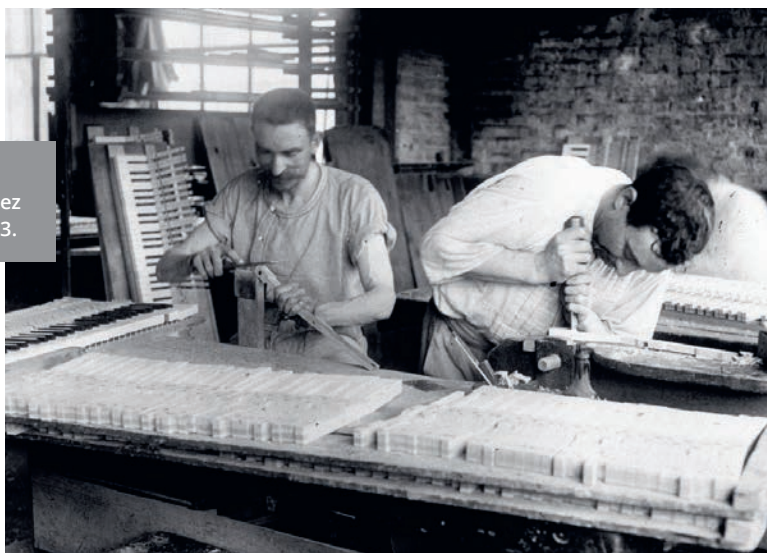
En résidence pendant un an au Musée de la musique, à Paris, la chercheuse Anaïs Fléchet¹ s'est intéressée à cette histoire méconnue de l'instrument symbole de la civilisation européenne – un instrument porteur de hiérarchies sociales, raciales et de genre, qui va pourtant très rapidement trouver sa place dans des sociétés patriarcales et encore largement esclavagistes.

C'est dans le cadre du triomphe de l'impérialisme européen en Afrique, en Asie, mais aussi de la domination économique et culturelle de l'Europe en Amérique latine et aux Caraïbes que le piano s'impose et se « tropicalise ».

Mais de quand date cet instrument ? Le clavecin règne en maître dans les salons européens de l'aristocratie depuis le XV^e siècle, quand un certain Bartolomeo Cristofori, au début du XVIII^e siècle, en Italie, déplore le manque de contrôle sonore de ses touches. Il remplace le mécanisme de pincement des cordes par des marteaux, qui vont les frapper avec différentes intensités. Le pianoforte est né, qui tire son nom de la modulation (*forte* ou *piano*) rendue

1. Chercheuse au Laboratoire interdisciplinaire en études culturelles (unité CNRS/Université de Strasbourg) et professeure d'histoire contemporaine à Sciences-Po Strasbourg.

Fabrication
d'un piano chez
Pleyel, en 1913.



© AGENCE MEURICE / GALICA BNF

possible par ces marteaux. *« Les deux instruments, clavecin et piano, coexistent au moins jusqu'à la Révolution de 1789, et c'est au cours de la seconde moitié du XVIII^e siècle que se fera la transition, explique Thierry Maniguet, conservateur au Musée de la musique. La vogue du piano se répand ensuite dans toute l'Europe, et il devient l'instrument-roi, notamment dans les milieux bourgeois, au XIX^e siècle. »*

Les pianos sont d'abord fabriqués surtout en Angleterre (par l'Allemand Johann Christoph Zumpe et l'Écossais John Broadwood), puis également en France, avec Sébastien Érard (1752-1831), puis ses concurrents Ignace Pleyel (1757-1831), Jean-Henri Pape (1789-1875) et, plus tard, Gaveau (maison créée en 1847). Érard fonde un véritable empire. Ses deux manufactures, à Paris et à Londres, produisent environ 2 500 pianos par an au milieu du XIX^e siècle.

« Il faut imaginer d'immenses usines dans lesquelles travaillent des centaines d'ouvriers spécialisés », raconte Anaïs Fléchet. Pleyel est installé au cœur de Saint-Denis, Gaveau emploie 350 ouvriers à Fontenay-sous-Bois, et Broadwood, près de 600 à Londres, hors personnel administratif !

En 1800, les fabricants produisent 2 000 instruments par an, réservés à quelques *happy few*. Mais la production augmente rapidement, passant à 50 000 unités en 1850, puis à 500 000 pianos par an en 1900.

95 000 pages d'archives

Par bonheur pour les chercheurs comme Anaïs Fléchet, ces facteurs de pianos consignent alors dans d'immenses registres des informations sur chaque instrument fabriqué : type de piano (oblique, droit, à queue, crapaud, etc.), bois principalement utilisé (palissandre ou acajou). Sur ces registres, on trouve aussi le nom des divers ouvriers pour chaque métier – caissier, tableur, monteur de cordes, ferreur, vernisseur, finisseur –, ainsi que le prix de vente, le nom de l'acheteur et la ville de destination. Le Musée de la musique a récupéré il y a quelques années les registres des maisons Érard et Pleyel, et a commencé à les numériser. En se plongeant dans quelque 95 000 pages à déchiffrer, Anaïs Fléchet a pu suivre le trajet de ces objets, qui pouvaient mesurer 2 à 3 mètres et peser jusqu'à 1 tonne.

Il faut les imaginer emballés dans d'énormes caisses, chargés sur des bateaux à voile puis à vapeur, tanguant sur les flots, passant le cap Horn, traversant les océans, en route vers Buenos Aires, Rio de Janeiro, Charleston, Boston, Montréal, Constantinople, La Havane, voire Shanghai ou Vladivostok...

« La révolution industrielle et le développement du commerce qui l'accompagne ont facilité cette expansion du piano dans le monde, souligne Anaïs Fléchet. Au début, c'est-à-dire dès 1800, les pianos sont exportés surtout en Amérique du Nord, puis en Amérique latine, mais également ensuite dans les colonies d'Afrique du Nord (Algérie, Maroc). »

On les retrouve d'abord dans les salons des élites européennes, où longtemps le piano reste signe de richesse. *« En Europe, à partir de 1830, la moyenne et la petite bourgeoisie constituent à la fois un nouveau public et une nouvelle clientèle, observe le conservateur Thierry Maniguet. Le piano fait partie intégrante de l'éducation de toute jeune fille de bonne famille et orne les intérieurs bourgeois. »*

Ailleurs, les pianos sortent aussi des salons, se dispersant dans les fazendas (vastes domaines agricoles) au Brésil, dans des théâtres, des salles de café-concert. *« Dans les grandes villes d'Amérique latine, les magasins de musique étaient de véritables lieux de rencontre, poursuit Anaïs Fléchet. Les élites venaient y acheter des instruments, écouter de la musique, discuter, être vues. Les marchands de pianos étaient aussi des éditeurs de partitions et des organisateurs de concerts, ils vendaient de la musique au rez-de-chaussée et tenaient salon à l'étage. Ils employaient des pianistes pour jouer les nouvelles musiques à la mode, des réductions d'opéra, des valse et des polkas, mais aussi des tangos, des habaneras ou des chansons populaires. »*

Petit à petit, le piano devient un bien relativement « ordinaire ». En témoigne une petite annonce d'un journal brésilien, où une proposition d'achat pour un piano est

« Dès 1800, les pianos sont exportés surtout en Amérique du Nord, puis en Amérique latine. »

intercalée entre une offre de vente d'esclaves et un avis de recherche pour un esclave en fuite... Aux États-Unis, le piano au beau milieu du saloon devient l'emblème de la conquête de l'Ouest.

Le piano est une illustration de la mondialisation, car on le retrouve sur toute la planète, mais aussi parce que les matériaux qui servent à le fabriquer proviennent du monde entier : palissandre, noyer d'Amérique, acajou, cédrat, noyer français, poirier, érable, tulipier, charme, sycomore... Toutes les essences sont utilisées, certaines pour décorer des instruments devenus de véritables pièces de collection. Les touches noires sont recouvertes de bois d'ébène, importé d'Afrique et de l'océan Indien, tandis que les touches blanches sont plaquées avec de l'ivoire issu de défenses d'éléphants d'Afrique. Un piano recèle bien des matières premières exploitées dans les colonies.

L'instrument est aussi l'objet d'une véritable course à l'innovation engagée entre les différentes maisons, qui font évoluer le piano jusqu'à sa forme actuelle. Il faut, d'une part, répondre aux exigences d'interprètes qui souhaitent une finesse de jeu et des instruments plus puissants au

fur et à mesure que les salles de concerts s'agrandissent. « D'autre part, note Anaïs Fléchet, les dépôts de brevets se multiplient pour renforcer la résistance de l'instrument aux aléas du transport et aux variations climatiques. » Dans le sud des États-Unis et en Amérique latine, l'humidité attaque le bois. Au Canada, la chaleur sèche des poêles dans les salons durant l'hiver est dommageable. D'où la nécessité de fabriquer des pianos « tropicalisés », terme que l'on retrouve dans les archives des fabricants français.

Double échappement et marteaux feutrés

L'évolution des pianos profite des progrès techniques très rapides de certaines industries, comme la métallurgie ou le textile. Au départ, la maison Érard s'impose en inventant le piano à « double échappement² » entre 1820 et 1823. Le mécanisme permet à une note d'être aisément rejouée même si la touche n'est pas encore revenue à sa position initiale, autorisant une plus grande rapidité de jeu.

Dès 1826, Ignace Pleyel équipe ses instruments d'un cadre en fer, plus résistant que le bois à l'humidité, et d'un sommier à pointes de cuivre. Mais il demeure fidèle



L'espace inaugural du Musée de la musique, à Paris, met en avant la diversité des formes, des matériaux et des provenances géographiques des objets de la collection.

Une nouvelle vitrine pour la sono mondiale

Échapper à la vision statique des instruments et prendre en compte le caractère dynamique des cultures musicales : c'est l'objectif de la nouvelle présentation du Musée de la musique, à Paris, qui compte environ 9 000 instruments et œuvres d'art du monde entier. « La présentation de ces collections avec un espace dédié aux "musiques du monde" est aujourd'hui dépassée, observe

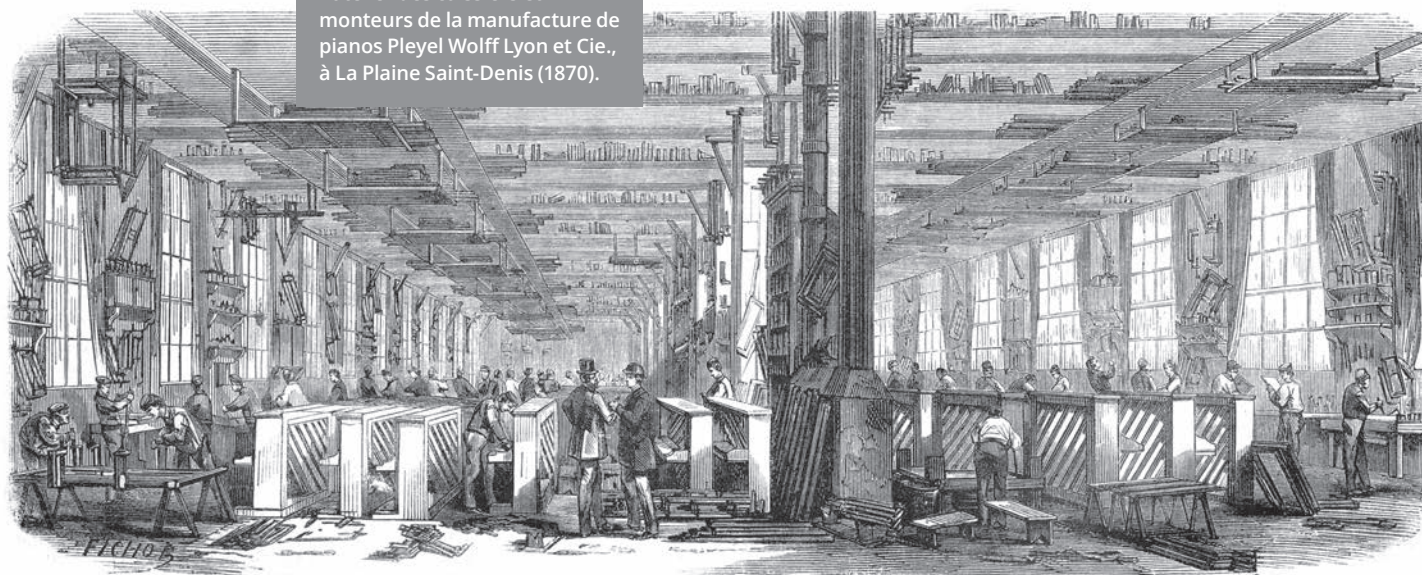
Alexandre Girard-Muscagorry, conservateur. On doit tenir compte des contextes historiques, artistiques, et des nombreuses circulations entre les cultures dans lesquelles s'inscrivent les instruments. » Le nouveau parcours présente ainsi les relations entre l'oud arabe (introduit en Europe à partir du IX^e siècle par l'Espagne musulmane et l'Italie) et le luth occidental qui en est issu. On peut voir

comment le violon, dérivé d'instruments à cordes d'origine diverses (viole du Moyen Âge, ravanaston indien, rebec d'origine arabe), s'est diffusé comme un instrument de rue populaire alors qu'il était aussi apprécié de la noblesse. Dans les pays nordiques, il apparaît avec les musiques à danser, mais est intégré au Maghreb aux ensembles takhts jouant la musique savante arabo-

andalouse dès le XIX^e siècle. Dans la musique indienne, il est tenu à l'envers, la tête reposant sur la cheville du musicien assis en tailleur ! Et l'accordéon, instrument « totem » de l'Europe, vient du sheng, un orgue à bouche chinois en bambou qui partage avec l'harmonica le principe de l'anche libre (fine lamelle métallique qui vibre lorsque l'air est soufflé ou aspiré à travers elle).

L'atelier des caissiers et monteurs de la manufacture de pianos Pleyel Wolff Lyon et Cie., à La Plaine Saint-Denis (1870).

© JEAN-PAUL DUMONTIER / LA COLLECTION



à la mécanique à « échappement simple ». « Dans les terres au-dessous du niveau du Mississippi, la durée d'un piano était estimée à trois ans, mais nous avons vu que Pleyel, par un nouveau système de ferrement, était parvenu à y envoyer des instruments qui tenaient l'accord comme dans la température d'un salon », rapporte ainsi un article du *Panorama de l'industrie française*, en 1839.

Jean-Henri Pape dépose 137 brevets dédiés au piano. Il troque la couverture en cuivre des marteaux pour du feutre (laine de mouton ou, parfois, de lapin), autorisant une harmonisation plus fine du timbre de l'instrument lors de la frappe. Et il modifie le croisement des cordes, tendues en diagonale, les cordes graves passant au-dessus du plan des autres cordes pour augmenter leur longueur.

John Broadwood, lui, invente la pédale forte du piano qui, en relevant les étouffoirs des cordes, permet aux notes de vibrer plus longtemps, même si les touches ne sont plus tenues. Une révolution dans l'histoire du piano ! Et, à partir de 1867, l'Américain Steinway conçoit des cadres en fonte très résistants à toute température.

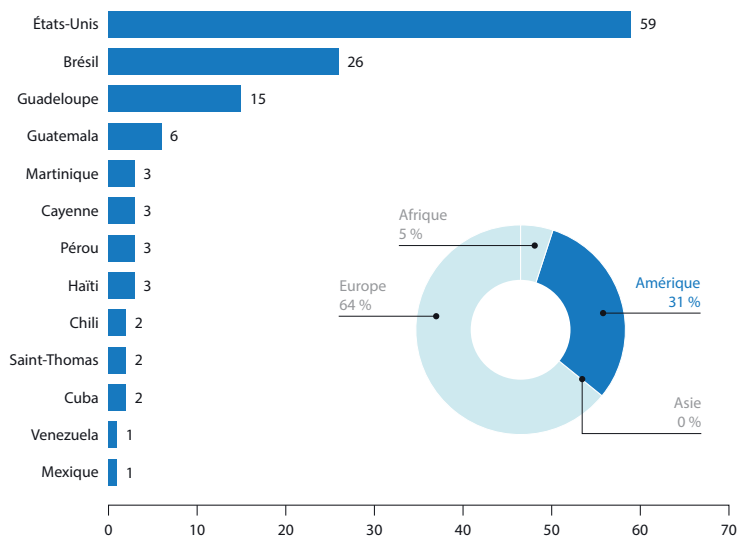
La diversification des musiques

Tous les facteurs n'ont cessé de perfectionner l'instrument – en augmentant l'étendue des notes (le clavier passe de 5 à 8 octaves), en facilitant le toucher, en homogénéisant le son. Mais il ne s'agit pas de le standardiser. Une grande variété de pianos coexiste. Chacun des facteurs a d'ailleurs ses interprètes « champions » qui en font la promotion : Chopin et Ravel pour Pleyel, Liszt, Haydn et Beethoven pour Érard, et Dussek pour Broadwood.

La circulation des pianos permet une diffusion des musiques européennes (valse, polka, opérette, etc.) à travers le monde. Mais elle se trouve aussi à l'origine

de nouvelles musiques, notamment afro-américaines, qui détournent et métamorphosent les usages de l'instrument. Par exemple, le cake-walk (une danse apparue dans les plantations de Floride dans les années 1850 et par laquelle les esclaves parodiaient la démarche altière des maîtres blancs) va donner lieu aux premiers ragtimes, précurseurs du jazz.

Les échanges ont lieu dans les deux sens. Des ragtimes figurent ensuite dans les œuvres de divers compositeurs occidentaux, dont Claude Debussy, qui écrit son *Golliwogg's cakewalk* pour piano en 1908, ou Igor Stravinsky, qui compose en 1917 un ragtime pour 11 instruments.



Dès le début du XIX^e siècle, les fabricants français de pianos exportent dans le monde entier. Ci-dessus, la part de l'Amérique dans ces exportations en 1837, ainsi que la répartition par pays, à gauche.

2. Échappement : mécanisme dans lequel, après que le joueur a frappé une touche, le marteau quitte rapidement la corde sans en arrêter la vibration.



Jean-Henri Pape (1789-1875) a remplacé la couverture en cuivre des marteaux par du feutre (à gauche), comme sur ce « piano table » de 1842 (à droite).

Au début du ^{xix}^e siècle, des facteurs inventent des pianos adaptés à la musique arabe³. Les intervalles n'y sont pas limités aux demi-tons et peuvent atteindre le quart de ton. L'Égyptien Naguib Nahas fabrique un piano qui, en plus des touches blanches, comporte trois rangs de touches noires superposées. Et George Samaan met au point un mécanisme permettant de déplacer le clavier en mode d'accordage occidental ou arabe, selon les besoins !

Le déclin des pianos européens

C'est surtout au ^{xx}^e siècle que se développe la pratique par des amateurs, grâce à la démocratisation des prix de vente et de location de l'instrument. « *L'âge d'or du piano français se prolonge jusqu'au premier conflit mondial*, décrit Thierry Maniguet, *mais la concurrence émerge dès la seconde moitié du ^{xix}^e siècle aux États-Unis, avec les pianos Steinway et Chickering, qui sonnent le début du déclin.* »

L'aventure de Steinway & Sons, facteur devenu culte chez les concertistes, démarre avec l'Allemand émigré aux États-Unis Heinrich Engelhard Steinweg (nom américanisé en 1864). « *C'est en secret qu'il fabrique en 1836, dans sa cuisine, son premier piano à queue* », écrit le site internet de l'entreprise. « *Une partie du succès de Steinway vient du fait que l'entreprise développera tout au long du ^{xx}^e siècle une politique commerciale particulièrement agressive* », selon Thierry Maniguet. Dès 1857, Steinway produit une très lucrative gamme de pianos de décoration (Art Case) conçus par des artistes de renom, qui devient populaire parmi les célébrités et les personnes aisées. Ses pianos de concert vont peu à peu envahir le monde. En 1900, les deux usines Steinway & Sons, à Manhattan et à Hambourg, produisent déjà plus de 3 500 pianos par an.

³. La musique arabe n'utilise pas la gamme tempérée, mais la gamme naturelle, qui permet une interprétation différente de l'échelle des sons au sein d'une octave et de leurs rapports (intervalles).

Steinway fabrique durant la Seconde Guerre mondiale un modèle de piano droit spécifique (le Victory Vertical) des plus légers, pour en envoyer des exemplaires (voire, en parachuter !) sur le front d'Europe, afin de remonter le moral des troupes.

La concurrence des pianos japonais Yamaha, puis de nombreuses marques asiatiques, notamment coréennes, achèvera les fabricants européens. Après la Seconde

Guerre mondiale, les trois grands facteurs français (Érard, Pleyel et Gaveau), un temps regroupés dans les Grandes Marques Réunies pour survivre, finissent par fermer leurs usines. Puis le marché des ventes de pianos acoustiques chute. L'essor des pianos numériques, moins encombrants et moins chers que les pianos acoustiques, prend le relais.

« *Si l'on prend un peu de distance, le piano n'est pas le seul instrument à s'être diffusé rapidement dans ce vaste espace qu'on appelait dans les manuels scolaires de la III^e République "le monde moins l'Europe", rappelle Anaïs Fléchet. Il suffit de penser au saxophone, à l'accordéon... Mais, pendant longtemps, les recherches se sont peu intéressées à l'histoire du monde dans l'instrument (d'où venaient les matériaux permettant sa fabrication) et de l'instrument dans le monde, c'est-à-dire sa contribution à la connexion des différents espaces culturels.* » En rétablissant le lien entre les patrimoines musicaux des divers continents, la nouvelle présentation des collections du Musée de la musique tient justement compte de cette nouvelle façon d'appréhender l'histoire des instruments. II

Piano Nahhâs muni d'un clavier Förster (exposé au musée de l'opéra du Caire) qui permet de jouer de la musique orientale. Les intervalles n'y sont pas limités aux demi-tons, mais peuvent atteindre le quart de ton.



EN ACTION

« Alors que, jusqu'à 500 millions d'années, la vie sur la Terre était limitée aux milieux aquatiques, la conquête de la terre ferme par les plantes a contribué à étendre les environnements dans lesquels la vie est possible. »



Quand le vivant était géant

VIVANT 

Voilà plusieurs millions d'années, de curieux géants foulaient la Terre vidée de ses titanesques dinosaures. Dans l'Asie de l'Oligocène, entre 34 et 23 millions d'années, *Paraceratherium*, un rhinocéros sans corne de 5 m au garrot pour 9 m de long et 17 tonnes (t), promenait sa silhouette à mi-chemin entre l'éléphant et l'okapi. Il y a 2 millions d'années, au Pléistocène, un cousin des orangs-outans de presque 400 kg, *Gigantopithecus blacki*, vivait dans les forêts tropicales de la Chine. Plus près de nous (de -400 000 à -8 000 ans), *Megatherium americanum*, un paresseux terrestre de 6 m de long et 4 t, déambulait à travers les savanes américaines.

Ces colosses méconnus sont à l'honneur de l'exposition « Géants », qui se tient jusqu'au 29 juin au Muséum d'histoire naturelle de Toulouse. Ils témoignent d'une ère, le Cénozoïque (celle que nous vivons actuellement), qui voit l'essor de mammifères géants après des millions d'années passées dans l'ombre des dinosaures.

BIOLOGIE La disparition des dinosaures non aviens n'a pas signé la fin du gigantisme au sein du vivant. Des mammifères, insectes et plantes XXL ont ensuite peuplé notre planète. Mais leur énormité masquait souvent de nombreuses faiblesses.

PAR MAXIME LEROLLE

Cette « foire aux géants » connaît son apogée de l'Éocène au Miocène (entre 56 et 20 millions d'années), précise Pierre-Olivier Antoine, paléontologue à l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier¹ et conseiller scientifique d'un film documentaire² à l'origine de la présente exposition : « Peu après la crise qui voit l'extinction des dinosaures, les niches écologiques qu'occupaient ces derniers sont rapidement occupées par les survivants. » S'engage alors une « course aux armements » entre proies et

▲ *Gastornis gigantea* pourchassant un petit mammifère (illustration). Cet oiseau incapable de voler pouvait atteindre 2 m de haut.

prédateurs. Pour se protéger des prédateurs, les proies ont tendance à grandir... avec pour conséquence une augmentation en miroir de la taille de leurs prédateurs.

Mais nourrir de telles masses suppose de bénéficier de ressources abondantes, et celles-ci se développent notamment sous des climats chauds. Ces conditions environnementales sont précisément celles d'une bonne partie du Cénozoïque.

Il y a 56 millions d'années, durant ce qu'on appelle le « maximum thermique Paléocène-Éocène », la Terre connaît une température moyenne de 8 °C supérieure à l'actuelle. En outre, les gradients thermiques liés aux latitudes sont moins marqués. On observe ainsi une continuité d'écosystèmes entre les forêts tropicales, à l'équateur, et celles tempérées, aux pôles – où ne se trouve alors aucune glace permanente. La végétation est luxuriante d'un pôle à l'autre, ce qui signifie « *pléthore de nourriture pour de très nombreux herbivores et pas de problème pour que les écosystèmes les supportent* », résume Pierre-Olivier Antoine. C'est d'autant plus vrai durant l'Oligocène, où les forêts tropicales laissent la place à des savanes ouvertes, propices aux grands herbivores.

Une structure interne consolidée

Mouvoir des masses de plus de 1 t requiert également des adaptations morphologiques, qui sont au cœur des recherches d'Alexandra Houssaye, directrice de recherche au CNRS au sein du laboratoire Mécanismes adaptatifs et évolution³. Avec son équipe, la scientifique a étudié la graviportalité, soit « *l'ensemble des adaptations des organismes pour supporter et mouvoir un poids corporel massif* », en comparant notamment les rhinocéros et hippopotames aux éléphants et dinosaures quadrupèdes.

Malgré leur poids, les premiers parviennent encore à galoper. Pour éviter les blessures liées au contact entre le sol et les pattes, lors du galop notamment, leurs os ont évolué en conséquence : « *Les os des membres ne sont pas alignés, mais restent encore inclinés les uns par rapport aux autres, si bien que leurs membres sont fléchis, ce qui permet la course ; ils sont nécessairement trapus, avec de larges articulations pour supporter les charges associées.* »

En parallèle, leur structure interne se consolide en augmentant l'épaisseur du tissu compact et en étendant les travées osseuses dans les zones occupées généralement par la moelle osseuse, ce qui renforce la masse pour accroître la résistance osseuse. Un tel mélange entre flexibilité et robustesse n'a pas cours chez les éléphants et

Le gigantisme n'est pas l'apanage des seuls dinosaures et mammifères.

les dinosaures sauropodes, nettement plus massifs. Renonçant au galop, ces espèces ont grandi en développant des os en colonne, qui ne plient pas. Cet arrangement permet de réduire fortement les contraintes appliquées à chaque os. « *À partir de 5 à 6 t, l'adaptation optimale, c'est le passage en colonne* », conclut Alexandra Houssaye.

Ces problématiques liées à la gravité terrestre n'ont pas cours dans l'eau, où les lourdes masses se meuvent sans souci. En témoigne le gigantisme des cétacés observé dès leur retour à la mer, il y a une cinquantaine de millions d'années. L'un d'eux, *Perucetus colossus* (il y a 39 à 37 millions d'années), avec ses 80 t au bas mot, aurait été l'un des animaux les plus lourds ayant jamais vécu sur la Terre.

Au-delà des mammifères

Le gigantisme n'est toutefois pas l'apanage des seuls dinosaures et mammifères. Pierre-Olivier Antoine s'insurge contre ce qu'il qualifie de « mammalocentrisme » : « *Au Cénozoïque, la très grande diversité des mammifères occulte celle des autres vertébrés. Comme les dinosaures non aviens ont disparu, on ne s'attend pas à ce que des formes qui leur sont apparentées reprennent le flambeau.* »

C'est pourtant le cas de *Titanoboa*, le plus grand serpent ayant jamais vécu, avec ses 15 m de long (la taille d'un autobus), ou encore de l'oiseau géant *Gastornis*, haut de 2 m, qui hantaient tous deux les forêts du Paléocène il y a près de 60 millions d'années. Mais persiste là encore un biais, qu'on pourrait nommer « vertébrocentrisme »...

▲ **Mâchoire de *Livyatan* (genre de cachalot éteint) présentée à l'exposition « Géants », au Muséum de Toulouse.**



1. Unité CNRS/IRD/Université de Montpellier.

2. *Le Mystère des géants disparus*, Paul-Aurélien et Éric Ellena, 1 h30, 2018.

3. Unité CNRS/Muséum national d'histoire naturelle (MNHN).

En effet, entre 350 et 250 millions d'années, des insectes et des arthropodes de grande taille dominaient les forêts du Carbonifère et du Permien. Ces créatures, dont les libellules carnivores *Meganeura* (jusqu'à 70 cm d'envergure) et d'autres herbivores, tels certains membres de l'ordre des *Palaeodictyoptera* (35 cm d'envergure), ont fait l'objet des travaux d'André Nel. Ce chercheur de l'Institut de systématique, évolution, biodiversité⁴ évoque les conditions favorables au gigantisme des invertébrés au Paléozoïque, l'ère qui précède celle dite des dinosaures.

Comme les mammifères 200 millions d'années plus tard, les insectes bénéficiaient alors d'une niche écologique inoccupée. Ils étaient les seuls animaux capables de voler (ou « volateurs »). Comme souvent, s'engage alors une course à la taille entre proies et prédateurs. Par ailleurs, ces insectes ailés pouvaient s'appuyer sur un air plus dense (2 bars et plus, soit l'équivalent actuel de 2 atmosphères) entre la fin du Carbonifère et le milieu du Permien. Or « les grands volateurs comme *Meganeura* se soutiennent mieux lorsque l'air est plus dense ».

De même, les forêts tropicales du Carbonifère débordaient d'oxygène (35 % de la composition de l'air, contre 20 % actuellement). Les arthropodes en tiraient profit. Leur système respiratoire par trachées amenant l'oxygène directement au centre de l'organisme, plus il y a d'oxygène dans l'air, plus ils peuvent grandir. C'est ainsi que l'on vit apparaître *Arthropleura*, un myriapode long de 2 m, à la fin du Carbonifère.

La palme du gigantisme

Toutes ces espèces déclinèrent, d'une part, en raison du changement des conditions environnementales, d'autre part, à cause de la concurrence de nouveaux groupes : des petits reptiles planeurs dès le Permien moyen, puis les ptérosaures, au Trias, et enfin les oiseaux, au Jurassique. Si l'on observe des libellules de grande taille jusqu'au Crétacé, « les dimensions de ces bêtes diminuent avec les groupes successifs », tempère le paléontologue – jusqu'à leur extinction, en même temps que les dinosaures non aviens.

Mais, sans conteste, la palme du gigantisme au sein du vivant revient aux végétaux. Une plante fossile haute de 130 m détient l'actuel record du plus grand être vivant jamais observé sur la terre ferme, quand certaines algues marines s'égrènent sur plusieurs centaines de mètres.

▲ Illustration d'une forêt au Carbonifère (359 à 299 millions d'années), avec un myriapode *Arthropleura* et une libellule *Meganeura*.



Encore aujourd'hui, eucalyptus et séquoias approchent régulièrement la centaine de mètres. Ceci tient à l'architecture particulière des plantes.

Tristan Charles-Dominique, botaniste au sein du laboratoire Botanique et modélisation de l'architecture des plantes et des végétations⁵, distingue les animaux, « à l'architecture unitaire », des végétaux, « qui avancent par répétition de structures ». Autrement dit, tant qu'elles ont les ressources pour alimenter leur croissance, les plantes continuent de grandir, le plus souvent dans une logique de compétition entre elles pour la lumière. En hauteur, elles finissent par rencontrer un plafond lorsque la pression se situe à -2 mégapascals. À ce niveau, la pression dans les tiges est trop négative pour que les tissus puissent se développer. Résultat, la croissance s'arrête.

De plus, on connaît très peu d'arbres dépassant de 30 ou 40 m la végétation avoisinante. Parce que, selon Tristan Charles-Dominique, « surcimer les voisins pour récupérer la lumière expose à la dessiccation, au gel et au vent ».

En revanche, les plantes ne rencontrent que peu d'obstacles dans leur croissance horizontale. Certaines tiges de palmiers-rotins, sous forme de lianes, peuvent atteindre 200 m de long. Une autre liane, enracinée, mesure jusqu'à 2 km de long.

Lorsque les végétaux fonctionnent de manière coloniale – c'est-à-dire par réplication d'un même individu –, les dimensions dépassent de très loin celles des géants animaux. Dans l'Utah, aux États-Unis, un arbre bat ainsi

« Être gros, c'est coûteux.
Il faut donc un avantage
évolutif à l'être. »

4. Unité CNRS/EPHE-PSL/MNHN/Sorbonne Université.

5. Unité CNRS/Cirad/Inrae/IRD/Université de Montpellier.



© RICHARD BIZLEY / SPL

tous les records. Âgé de 80 000 ans, il possède à lui seul 47 000 troncs de peuplier faux-tremble et s'étale sur 43 hectares, pour une masse totale d'environ 6 000 t. Un arbre-forêt, nommé Pando, qui continue vaillamment à croître. « Et, plaisante le botaniste, rien n'indique qu'il compte arrêter son expansion. »

Malgré leurs divergences, géants animaux et végétaux souffrent d'un même problème, qu'Alexandra Houssaye traduit en une formule : « Être gros, c'est coûteux. Il faut donc un avantage évolutif à l'être. » Au vu de toutes leurs contraintes biomécaniques, énergétiques et environnementales, les espèces géantes adoptent une stratégie singulière au sein du monde vivant : grandir plus longtemps, se reproduire tardivement et avoir moins d'enfants.

Cette stratégie s'observe chez les animaux dès 45 kg. Cette frontière, certes arbitraire, démarque néanmoins les espèces de petite taille – à la longévité plus courte et aux portées nombreuses, avec moins d'investissement parental – de ce qu'on appelle la « mégafaune ».

Des géants qui craignent le changement

Chez les végétaux, même si la frontière est moins nette, la logique est semblable. « Pour qu'une plante devienne très grande, elle doit maintenir sa phase d'exploration de son environnement le plus longtemps possible, explique Tristan Charles-Dominique. Rester grand signifie donc rester juvénile et ne pas se reproduire sur une longue période, ce qui n'est pas optimal dans des milieux perturbés. Dès lors, le gigantisme végétal ne prévaut que dans les milieux où la compétition pour la lumière est si intense que les plantes lui sacrifient toute autre fonctionnalité. » En d'autres termes, leur taille masque leur faiblesse.

« Les espèces géantes se révèlent très performantes dans un milieu stable, mais peu résilientes face aux crises et fluctuations environnementales, dont elles sont les premières victimes », relève Pierre-Olivier Antoine.

Le paléontologue en veut pour preuve que les derniers géants (arbres des savanes et des jungles, mammifères d'Afrique et d'Asie) se situent dans les zones tropicales, à l'écart des perturbations consécutives au réchauffement planétaire qui, il y a 20 000 ans, a succédé à la dernière glaciation. Or ces régions se trouvent précisément à l'avant-poste du réchauffement climatique actuel.

Quel sera leur avenir sous de nouvelles conditions environnementales ? À contempler la vie et la mort des géants du passé, on ne regarde qu'avec plus d'admiration les colosses aux pieds d'argile de notre époque. ■



© CHRIS BOURONCLE / AFP

► Les restes fossilisés de *Perucetus colossus*, un cétacé ayant vécu à l'Éocène moyen, sont exposés en 2023 au muséum de Lima, au Pérou, pays où le spécimen a été découvert.



Peut-on télécharger son esprit ?

VIVANT



NUMÉRIQUE



NEUROSCIENCES Dans *Mickey 17*, le dernier film du Sud-coréen Bong Joon-ho, le protagoniste est recruté comme « Remplaçable » lors d'une mission visant à coloniser une exoplanète. À chaque fois qu'il meurt, ses souvenirs sont réimprimés dans un nouveau corps. Cette technique peut-elle devenir réalité ?

PAR KHEIRABETTAYEB

Le film *Mickey 17* met en scène le téléchargement de l'esprit d'une personne dans d'autres corps. En théorie, comment cela pourrait être possible ?

Gregor Thut¹ Il faudrait reproduire les circuits neuronaux d'au moins trois grandes fonctions importantes pour recréer le sens de soi et l'identité de la personne : la mémoire, qui permet de stocker et de se souvenir de ce que l'on vit et de ce que l'on

apprend au cours de la vie ; la conscience, qui permet d'être conscient de soi-même et de notre environnement ; et la sensation de ne faire qu'un avec son corps, indispensable au sens de soi.

Que sait-on des supports matériels de la mémoire humaine ?

G. T. Comme pour toutes nos autres capacités cognitives, cette fonction naît de plusieurs réseaux neuronaux

étendus dans le cerveau. Précisons qu'il n'existe pas une mémoire... mais plusieurs. Certaines sont dites « à court terme », car elles permettent de retenir des informations sur de courtes périodes, allant de quelques secondes à plusieurs minutes. D'autres sont des mémoires « à long terme » : elles enregistrent des informations sur des périodes plus longues, courant sur toute une vie. Ce sont ces dernières qui seraient

1. Directeur de recherche au CNRS au sein du Centre de recherche cerveau et cognition (Cerco, unité CNRS/Université de Toulouse).

► Dans le film *Mickey 17*, à chaque fois que meurt le héros, joué par Robert Pattinson, un nouveau corps est produit, dans lequel sont réimplantés ses souvenirs et sa personnalité.

importantes pour recréer l'identité d'une personne. Parmi ces mémoires, on trouve notamment la mémoire épisodique (ou « autobiographique »), qui renferme les souvenirs personnels, et la mémoire procédurale (ou « motrice »), qui stocke des savoir-faire et des automatismes acquis au cours de la vie, comme conduire, faire du vélo ou jouer de la guitare.

Chacune de ces mémoires met en jeu des circuits de neurones et des régions cérébrales différentes. Au niveau neuronal, le stockage d'une information se fait grâce à la formation de nouvelles connexions entre neurones, dites « synapses », ou par renforcement de celles-ci.

Quid de la conscience ?

G. T. Selon une théorie majeure, dite de « l'espace de travail neuronal global », la conscience naît d'une connexion globale entre plusieurs aires du cerveau situées à l'avant et à l'arrière de celui-ci. Ce réseau permettrait à l'individu d'être conscient de lui-même et de son environnement en rendant les informations issues de ses sens – d'abord traitées de façon non consciente – disponibles pour l'ensemble de nos facultés mentales, dont l'attention, la mémoire et le raisonnement.

Et comment émerge la sensation de ne faire qu'un avec son corps ?

G. T. Elle provient de l'intégration cohérente de différents signaux sensoriels renseignant sur la position de notre corps dans l'espace. Ces informations proviennent de trois systèmes : le système visuel ; le système vestibulaire (l'organe de l'équilibre, situé dans l'oreille interne) ;

et le système proprioceptif (constitué par l'ensemble des récepteurs et de leur innervation au niveau des muscles et des articulations), qui régule la posture et les mouvements du corps. Si ces signaux sensoriels ne sont pas cohérents, comme lors d'une activité cérébrale désorganisée, le cerveau peut en conclure que nous avons quitté notre corps.

Que vous inspire l'idée de l'extension de l'esprit humain dans un nouveau corps « receveur » ?

G. T. Elle soulève une grande question éthique : est-il vraiment souhaitable de télécharger nos souvenirs dans un autre corps ou dans un support artificiel comme un robot ? De fait, cette perspective touche au transhumanisme, une idéologie

« La possibilité de générer une conscience à partir de réseaux de neurones artificiels reste controversée, tant la conscience est une faculté complexe. »

Selon vous, sera-t-il un jour possible, comme dans *Mickey 17*, d'imprimer ces trois fonctions et ainsi de transplanter l'esprit d'une personne dans un autre corps ?

G. T. Cela me paraît très compliqué... Cloner chacune de ces trois fonctions représente un énorme défi. D'autant que l'on est loin d'avoir décrypté finement tous les processus qui les sous-tendent. Par exemple, pour la mémoire à long terme, il faudrait connaître la signature neuronale et synaptique de chacun des souvenirs et apprentissages qui y sont stockés. Un vrai défi !

Concernant spécifiquement la capacité de faire émerger une conscience dans un réseau de neurones artificiels, c'est un débat important actuellement, en lien avec le développement de l'intelligence artificielle. De brillants spécialistes se penchent sur cette question. Mais cette éventualité reste controversée, tant la conscience est une faculté complexe... Bref, à ce jour, la possibilité de transplanter un esprit dans un autre corps reste de la pure science-fiction.

qui a comme idée de recourir aux sciences et aux nouvelles techniques pour améliorer ou augmenter nos capacités physiques et mentales, et ainsi allonger l'espérance de vie, voire nous rendre immortels.

Mais devenir immortel est-il si souhaitable que cela ? Après tout, une vie immortelle ne s'apprécierait peut-être pas autant qu'une vie destinée à se finir un jour...

Ensuite, arriver à complètement décoder et transplanter nos esprits sur d'autres supports pourrait présenter plusieurs dangers. Tout d'abord, cela pourrait exposer à un risque d'intrusion dans nos pensées et donc dans la sphère privée de notre vie mentale.

Enfin, une telle technologie pourrait mener à réimprimer l'esprit de l'individu alors qu'il est encore vivant et, ainsi, à créer plusieurs duplicatas de celui-ci, ce qui lui ferait perdre son identité. En effet, cela équivaldrait à un clonage de son identité. Laquelle serait alors l'originale ? Pour moi, mieux vaut que tout cela reste dans un bon film de science-fiction. Comme l'est *Mickey 17* !

Marie Tharp, pionnière omise de la tectonique des plaques



TERRE

GÉOSCIENCES Alfred Wegener est bien souvent LE nom associé à la tectonique des plaques. Mais un autre mérite la lumière : celui de Marie Tharp, cartographe qui contribua significativement à l'élaboration de cette théorie cruciale.

PAR MORGANE GILLARD

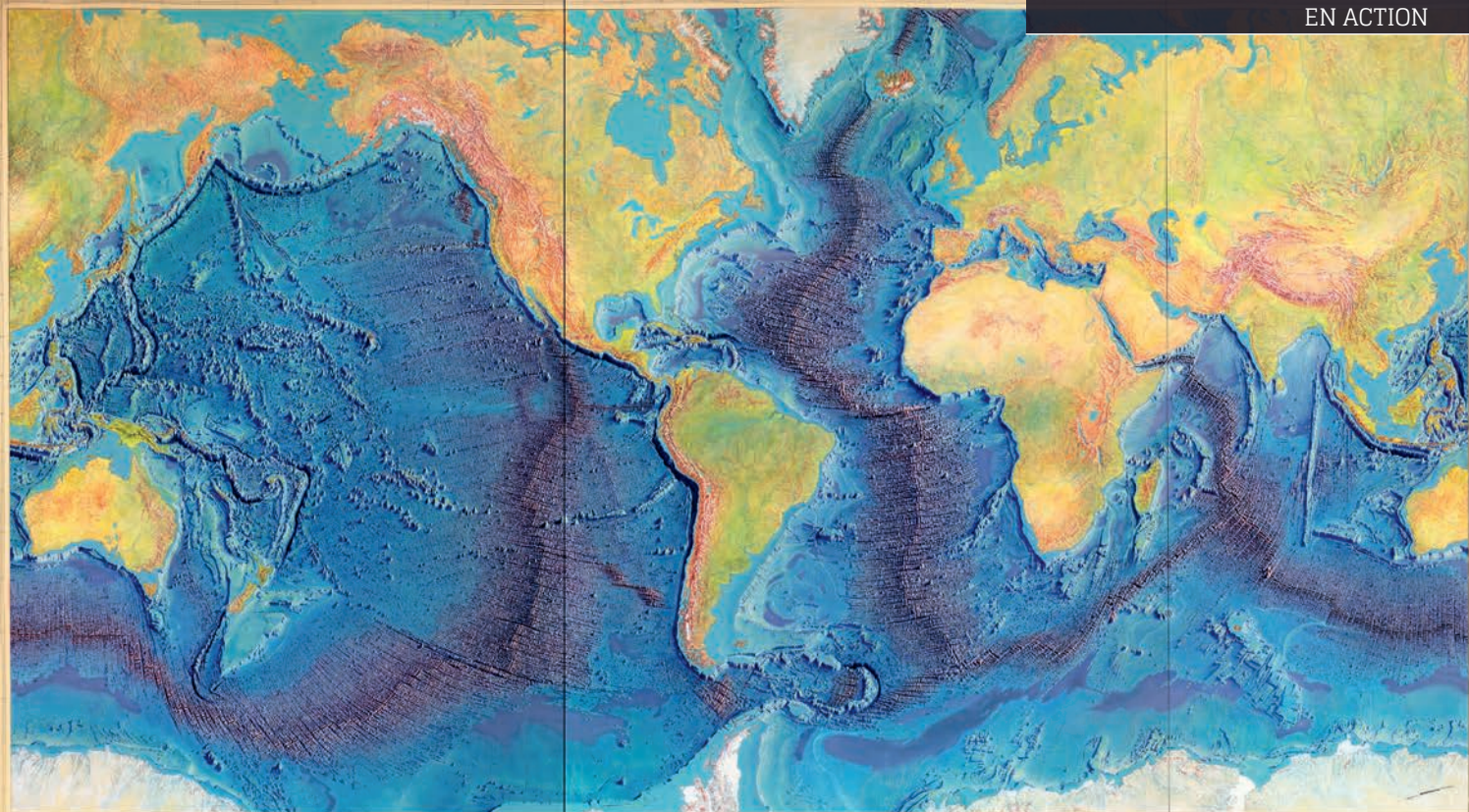
Voici une carte que tout étudiant en sciences de la Terre a contemplée au moins une fois dans sa vie. Contrairement aux représentations communes de la surface du globe, ce planisphère (page de droite) ne met pas en évidence le relief des continents, mais celui des fonds océaniques.

Si cette carte peut paraître anodine aujourd'hui, sa valeur scientifique est énorme. Achievée en 1977, elle est l'un des outils qui ont permis d'établir les principes de la dérive des continents et de la tectonique des plaques. Le message scientifique qu'elle véhicule sert désormais de fondement à l'ensemble des études menées en sciences de la Terre. Et, derrière son élaboration, se trouve le travail acharné d'une femme restée longtemps dans l'ombre : Marie Tharp.

Signée « *Heezen and Tharp* », cette carte marque la conclusion d'un vaste et ambitieux programme initié à la fin des années 1940 par le géophysicien américain Maurice Ewing et visant à cartographier le relief des fonds marins. Le développement des premiers échosondeurs, durant la Seconde Guerre mondiale, laisse en effet penser que les fonds océaniques sont loin d'être aussi plats

► Marie Tharp devant la carte du plancher atlantique, en 1968. Près d'une décennie plus tôt, la première carte bathymétrique de l'Atlantique a créé un séisme... scientifique.

© LAMONT-DOHERTY EARTH OBSERVATORY AND THE ESTATE OF MARIE THARP



© LIBRARY OF CONGRESS, GEOGRAPHY AND MAP DIVISION.

Due à Marie Tharp et Bruce Heezen, cette carte du relief du plancher océanique (mise en couleurs par Heinrich Berann en 1977) montre les dorsales qui expliquent la dérive des continents.

et monotones qu'on l'imaginait alors. Parmi les jeunes talents qui vont s'embarquer pour une série de campagnes océanographiques figure Bruce Heezen, un étudiant fraîchement recruté au sein du Lamont-Doherty Geological Observatory. C'est lui qui présentera pour la première fois les résultats de ce méticuleux travail de cartographie et l'idée d'une séparation de la croûte océanique au niveau des dorsales. Son nom restera ainsi dans les annales, occultant le fait qu'une grande partie du travail et des idées présentées proviennent de Marie Tharp, son assistante cartographe.

L'initiatrice d'une véritable révolution

Marie Tharp naît en 1920 d'une mère enseignante et d'un père géomètre qui, durant toute son enfance, va lui transmettre son intérêt pour la cartographie. Profitant de l'ouverture des formations scientifiques aux femmes (en raison de la guerre qui mobilise les hommes), elle s'inscrit à l'université pour suivre des cours de géologie et de mathématiques. Elle en sort doublement diplômée, ce qui ne lui vaut pas d'obtenir un poste permanent, mais des contrats successifs de technicienne au Lamont.

Là, Maurice Ewing lui demande de collaborer avec Bruce Heezen, étudiant en thèse. Alors que celui-ci se charge d'acquérir les données en mer, Marie Tharp compile celles obtenues par échosondage. Cela lui permet d'établir des profils bathymétriques à partir desquels elle va pouvoir produire les premiers diagrammes du fond de l'océan Atlantique. « Cette méthode qu'elle adapte est très intéressante, car, contrairement aux cartes classiques

présentant des lignes de niveau, elle force à une conceptualisation des reliefs », explique Mathilde Cannat, directrice de recherche CNRS émérite dans l'équipe de Géosciences marines de l'Institut de physique du globe de Paris¹. Nous sommes au début des années 1950 et les ordinateurs n'existent pas encore. Tout s'effectue à la main : conversion des données, compilation, dessins... Le travail est énorme, mais Marie Tharp possède la rigueur nécessaire et l'intuition qui vont lui permettre de réaliser une découverte majeure, qui changera l'histoire des géosciences.

Après le supercontinent unique

En ce milieu du xx^e siècle, la théorie de la tectonique des plaques telle qu'on l'enseigne aujourd'hui n'existe pas. Pourtant, dès 1912, Alfred Wegener, un météorologue allemand, a proposé la théorie de la dérive des continents. Très novatrice, elle reposait sur des observations principalement géographiques, géologiques et paléontologiques.

Wegener avait remarqué que la plupart des continents possèdent une forme qui, comme les pièces d'un puzzle, permet leur emboîtement. En jouant ainsi avec ces pièces d'échelle planétaire, Wegener a découvert qu'il était possible de regrouper tous les continents actuels sous la forme d'un unique supercontinent, qu'il a nommé Pangée. Qui plus est, ce regroupement permettait d'expliquer la continuité de certaines grandes structures géologiques de part et d'autre de l'Atlantique, ainsi que la concordance

1. IPGP-UMR, unité CNRS/IPGP/Université Paris Cité.



© AIP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES. GIFT OF BILL WOODWARD, USNS KANE COLLECTION

► Marie Tharp au travail avec Bruce Heezen à bord de l'*USNS Kane*, en 1968, lors de la première mission en mer à laquelle elle est autorisée à participer. Après le décès subit de Heezen, en 1977, Tharp achèvera la carte mondiale de la topographie des fonds océaniques.

Il faudra un an à Marie Tharp pour convaincre son collègue masculin, en montrant la corrélation entre ses cartes bathymétriques et celle des séismes enregistrés dans l'Atlantique – séismes dont les épicentres s'alignent le long de la ride sous-marine, révélant qu'il s'agit bien d'une zone où la croûte terrestre se « déchire ».

La première présentation des résultats de Tharp et Heezen sur les dorsales, en 1956, puis la publication de la première carte bathymétrique de l'océan Atlantique, en 1957, vont faire l'effet d'une bombe dans la communauté scientifique. Mais tout cela au crédit de Bruce Heezen, dont le nom est toujours mis en avant par rapport à celui de Marie Tharp.

« *L'effacement de Marie Tharp peut s'expliquer par des considérations institutionnelles : Heezen était thésard, et Tharp uniquement technicienne. C'est donc lui qui avait le statut pour défendre leurs résultats dans des conférences* », explique Mathilde Cannat. Mais, derrière cette situation, se trouve la question du sexisme : « *Étant une femme, elle ne pouvait pas embarquer sur les navires océanographiques, ni obtenir de doctorat dans la discipline à cette époque, ni par conséquent de poste académique. Elle était de toute façon bloquée dans sa condition.* »

Une reconnaissance tardive

Les résultats de Tharp et Heezen ouvriront la voie à de nouvelles études, notamment sur la symétrie des anomalies magnétiques enregistrées par les roches de la croûte océanique. Celles-ci vont permettre dans les années 1960 de valider définitivement la théorie de l'accrétion océanique (qui explique comment le magma « écarte » les plaques au niveau des dorsales océaniques en remontant à la surface), puis de quantifier les vitesses d'ouverture des océans. Le modèle géodynamique de la tectonique des plaques sera complété ensuite avec l'identification de dorsales dans tous les océans.

Malgré sa contribution à l'avènement de la théorie de la tectonique des plaques, Marie Tharp demeurera longtemps dans l'ombre. « *Elle va rester sous contrat précaire... toute sa carrière* », déplore Mathilde Cannat. Elle ne sera autorisée à participer à une expédition en mer qu'en 1968 et ne recevra la pleine reconnaissance de son travail que dans les années 1990, à l'âge de 70 ans, lors d'une cérémonie organisée au Lamont.

Les choses changent, malgré tout, se félicite Mathilde Cannat : « *La médaille de l'Union européenne des géosciences récompensant des travaux significatifs en tectonique et géologie structurale porte désormais le nom de Marie Tharp.* » **II**

des registres faunistiques fossiles. Des arguments assez forts, selon Wegener, pour affirmer que les continents s'étaient séparés il y a environ 200 millions d'années, suivant un très lent mouvement de divergence.

Cette théorie a toutefois suscité une vive levée de boucliers. Et pour cause. Si les observations de Wegener sont tout à fait pertinentes, rien dans sa théorie ne permet d'expliquer le phénomène physique qui pourrait mettre en mouvement des masses continentales. La théorie de Wegener paraissait donc bancal, car il y manquait finalement l'essentiel : le « moteur » de la divergence.

La découverte des dorsales océaniques

Jugée fantaisiste, la « dérive des continents » reste en sommeil pendant quarante ans. Jusqu'à ce qu'en traitant les données bathymétriques acquises par Bruce Heezen et ses collègues, Marie Tharp découvre une gigantesque chaîne de montagnes sous-marine (que l'on appelle aujourd'hui « dorsale océanique ») courant du nord au sud de l'océan Atlantique. Elle assimile le relief de cette immense « ride » à une zone de rift, c'est-à-dire un fossé marquant une déchirure de la croûte terrestre.

Elle a cependant bien du mal à faire accepter son idée à Bruce Heezen, qui va tout d'abord dénigrer ses arguments en les qualifiant de « *paroles de bonne femme* ».

La richesse des langues des signes à portée de clic



« **G**iovani mangia la pizza » ou « *Giovani la pizza mangia* » : sauriez-vous dire laquelle de ces locutions italiennes est traduite de la langue des signes et laquelle est en langue vocale ? Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les structures grammaticales des langues des signes ne sont pas calquées sur celles des langues orales qui leur correspondent. En clair, les personnes entendant et sourdes italiennes n'utilisent pas la même grammaire pour s'exprimer – les premières, en langue parlée, les secondes, en langue des signes. Dans l'exemple cité, c'est la structure sujet-verbe-complément qui s'applique en italien oral, mais, en italien signé, le verbe se place à la fin de la phrase.

« *Il n'existe pas une langue des signes. Les personnes sourdes italiennes, par exemple, ne signent pas comme les personnes sourdes d'autres nationalités* », explique Carlo Cecchetto, directeur de recherche au laboratoire Structures formelles du langage¹. En langue des signes espagnole, le lait est désigné par le mouvement de traire une vache. Mais un Français fera le geste de tirer le lait du sein de la mère. « *Chaque langue des signes est une langue à part entière, qui a le même potentiel expressif et le même niveau de complexité lexicale et grammaticale que les langues parlées.* »

Mais, alors que les langues parlées ne manquent ni de dictionnaires, ni de grammaires, ni d'études permettant de retracer leurs évolutions dans le temps, les personnes

SOCIÉTÉS

SCIENCES DU LANGAGE Les langues des signes sont des langues comme les autres. La nouvelle plateforme Sign-Hub en documente la diversité à travers le monde et montre l'importance de leur apprentissage dès le plus jeune âge, comme pour n'importe quelle autre langue orale.

PAR MARINA JULIENNE

sourdes n'ont que très peu d'outils linguistiques à leur disposition. Un programme de recherche développé par plusieurs équipes européennes, lancé en 2016, a permis d'aboutir à la mise en ligne de la plateforme Sign-Hub².

Des grammaires en sept langues

Sign-Hub comprend schématiquement trois parties. La première regroupe un « atlas » et des « grammaires ». Elle présente un éventail complet et inédit des caractéristiques et structures grammaticales dans une grande variété de langues des signes du monde, ainsi qu'une description précise des grammaires de sept langues des signes : allemande, catalane, espagnole (castillane), française, italienne, néerlandaise et turque.

L'objectif est que les usagers puissent enrichir eux-mêmes les grammaires. Mais ces informations seront aussi utiles aux chercheurs, car les langues des signes sont

1. SFL, unité CNRS/Université Vincennes-Saint-Denis. 2. thesignhub.eu/fr

une mine de connaissances pour qui étudie les propriétés fondamentales du langage humain. « *On pensait, par exemple, que des notions comme le phonème ou la syllabe étaient intrinsèquement liées à la dimension sonore de la langue*, souligne Carlo Cecchetto. *Or elles s'appliquent aussi à la modalité visuo-spatiale du langage. De nombreux signes sont caractérisés par deux mouvements et sont bisyllabiques, quand d'autres sont monosyllabiques.* »

Le linguiste a aussi montré que ces langues contiennent des propositions relatives, comme les langues parlées. Ce que l'on ignorait il y a encore quelques années ! Et, si elles ne possèdent pas de conjugaison, leurs locuteurs positionnent leurs récits dans l'espace pour parler de l'avenir ou du passé : en langue des signes française, la ligne du temps est perpendiculaire au corps du locuteur – le passé est dans son dos, le présent, au niveau de son corps, et le futur est devant lui.

Mais, dans certaines langues des signes parlées dans des villages où les gens vivent beaucoup à l'extérieur (comme à Kata Kolok, un village de Bali), le temps peut être représenté sur une ligne imaginaire fondée sur la position réelle du soleil le long de l'axe Est-Ouest.

Par ailleurs, la question de l'iconicité (la similitude entre la forme d'un signe et sa signification) fait toujours l'objet de recherches, pour savoir notamment de quelle façon ces icônes évoluent dans le temps.

Évaluer les compétences langagières des sourds

Mieux connaître le fonctionnement et les structures des différentes langues des signes doit aussi permettre d'évaluer les compétences langagières des sourds et malentendants. « *Aujourd'hui, les professionnels de santé ne disposent d'aucun outil permettant de diagnostiquer un enfant sourd qui a un retard de langage en langue des signes, ou un adulte malentendant qui perd des capacités langagières à la suite d'un AVC, par exemple* », observe Caterina Donati, professeure au Laboratoire de linguistique formelle³ et directrice de l'UFR de linguistique à l'université Paris Cité qui a également contribué à la plateforme.

Sign-Hub propose (pour l'heure en version test) les premiers outils de diagnostic d'évaluation du langage. Pour les concevoir, l'équipe de Caterina Donati a d'abord mené une étude sur trois catégories de personnes sourdes – la communauté des personnes sourdes étant très hétérogène.

« *La plupart des surdités ne sont pas héréditaires et interviennent à différents âges*, détaille la linguiste. *Une petite partie des sourds sont "natifs" et, pour certains, ont été très*

Le mot « coq » se signe de façon différente en français et en russe, mais aussi en langues des signes (LDS) anglaise et américaine. Celles-ci sont pourtant issues de la LDS conçue par l'abbé de l'Épée (1712-1789), qui inventa la langue gestuelle.



tôt exposés à la langue des signes ; d'autres ont d'abord tenté d'apprendre le langage parlé, soit par des techniques d'oralisme⁴, soit en bénéficiant d'implants cochléaires, et ne se tournent vers la langue des signes qu'après l'âge de 3 ans, notamment parce que l'apprentissage oral a échoué ou n'était pas satisfaisant. Enfin, un troisième groupe, les "apprenants tardifs", n'a été exposé à la langue des signes qu'après l'âge de 6 ans. En tout cas, la plupart des enfants nés sourds n'ont pas accès à la langue des signes dès la naissance à travers l'interaction avec leurs parents. »

Des différences d'apprentissage « spectaculaires »

Les chercheurs ont fait passer des tests (syntaxiques et lexicaux) aux personnes des trois catégories dans cinq langues des signes différentes : italien, castillan, catalan, français, israélien. Leur objectif était de savoir si l'âge de la première exposition à la langue des signes avait un impact sur les compétences langagières à l'âge adulte.

« *Les résultats ont été spectaculaires*, souligne Caterina Donati. *Ceux qui ont acquis la langue des signes tardivement ont d'importantes difficultés de compréhension, et nous montrons qu'il est vraiment essentiel d'être exposé à cette langue dès la première année de vie pour la maîtriser ensuite. Seul le retard lexical est rattrapé en cas d'apprentissage tardif.* »

Ces résultats sont très importants pour les parents d'enfants sourds qui hésitent entre langue des signes et oralisme, ou pour ceux qui enseignent d'abord l'oralisme puis passent à la langue des signes en cas d'échec. « *Nous pouvons désormais affirmer qu'un enfant peut sans problème apprendre l'oralisme – équivalent d'une seconde langue pour les personnes entendant – s'il maîtrise bien le langage des signes. Mais si, tout bébé, il n'acquiert pas les bases du langage, il sera très difficile de lui enseigner ensuite une quelconque autre langue*, pointe Caterina Donati. *Il faudrait donc que chaque enfant sourd ou malentendant puisse être exposé le plus précocement possible à une langue à laquelle il peut avoir un accès direct, c'est-à-dire à une langue des signes.* »

Troisième objectif de la plateforme : conserver une mémoire des langues des signes et une trace de leur évolution au fil du temps, à travers de nombreux témoignages

« Un enfant peut sans problème apprendre l'oralisme s'il maîtrise bien le langage des signes. »

 Lire l'intégralité de l'article
sur lejournal.cnrs.fr

signés de personnes âgées. Selon Caterina Donati, « *ces langues sont particulièrement en danger parce qu'elles ont la particularité de ne pas se transmettre au niveau territorial, comme peuvent l'être la plupart des langues parlées* ».

Certains de ces témoignages sont rassemblés dans un documentaire⁵, donnant un aperçu de ce que ces hommes et ces femmes, dont certaines ont connu la Seconde Guerre mondiale, ont vécu. Ils racontent les placements dans des institutions où, parfois, personnes aveugles et sourdes étaient réunies dans une même classe, et où les cours étaient dispensés par des enseignants qui n'avaient aucune compétence en langue des signes ! Ils parlent de leur vie professionnelle, sentimentale, s'émeuvent des « entendants » qui ont la manie de s'exprimer la bouche quasi fermée, si bien que toute tentative de lire sur leurs lèvres est vouée à l'échec ; ils évoquent comment les premiers sous-titres à la télévision leur ont permis de comprendre enfin le scénario de certains films, ou de quelle façon l'ère des SMS facilite leur quotidien.

Un débat éthique

Mais, comme l'explique Carlo Cecchetto, « *paradoxalement, alors que la France reconnaît enfin la langue des signes française comme langue à part entière depuis la loi du 11 février 2005 (qui accorde aux enfants sourds le droit à un enseignement de la langue des signes), l'implantation de plus en plus fréquente d'implants cochléaires n'est souvent pas accompagnée d'une exposition de l'enfant à une langue des signes. Ce qui constitue un danger dans le cas où l'implant ne fonctionne pas suffisamment pour permettre une bonne acquisition du langage oral.* »

Car, s'ils sont souvent très efficaces et peuvent changer la vie de certaines personnes sourdes, les implants ne conviennent pas techniquement à tous. Surtout, ils font l'objet d'un débat éthique, une partie de la communauté sourde y voyant une façon de s'attaquer à sa culture.

En France, environ 1 enfant sur 1 000 naît sourd profond. À 3 ans, 3 enfants sur 1 000 ont une surdité sévère ou profonde. On compterait environ 100 000 sourds signants, dont seulement 5 % ont un membre de la famille sourd, susceptible de leur enseigner la langue des signes. Autant de personnes déjà fragilisées du fait de leur handicap qui ont particulièrement besoin d'une plateforme telle que Sign-Hub – un lieu d'échanges, de partage d'expériences et de connaissances, estiment les deux chercheurs. **II**

3. LLF, unité CNRS/Université Paris Cité. 4. Oralisme : méthode pour enseigner la langue orale à des sourds grâce aux prothèses auditives et implants cochléaires, ainsi qu'en leur apprenant à utiliser la vision pour mieux décoder les sons de la parole sur les lèvres de l'interlocuteur. Des débats opposent les partisans de l'oralisme à ceux de la langue des signes. 5. thesignhub.eu/life-story/36

En bref

LANCEMENT DE CHOOSE CNRS

Dans un contexte international où la liberté académique recule, le CNRS réaffirme son engagement en faveur d'une science ouverte et libre. Aux côtés du ministère de la Recherche, il participe au lancement d'une plateforme nationale d'accueil des chercheurs en danger, avec l'appel Choose CNRS, décliné en quatre niveaux selon la séniorité. Consultez <https://bit.ly/choose-cnrs>

LA COUR DES COMPTES SALUE L'EXCELLENTE GESTION DU CNRS

Fin mars 2025, la Cour des comptes a publié un rapport sur le contrôle des comptes et la gestion du CNRS. La Cour salue l'excellente tenue financière de l'organisme et lui propose quelques recommandations pour l'optimiser davantage.

LE CNRS PUBLIE SON PREMIER SCHÉMA DD&RS

Fin février, le CNRS a publié son premier schéma directeur Développement durable et Responsabilité sociétale. Ce document stratégique manifeste l'engagement de l'organisme dans la transition environnementale et dans la politique sociale, en déclinant ses actions structurantes à toutes les échelles et dans toutes les activités de l'établissement.

LE CNRS À VIVATECH

Processeur quantique, cryptographie post-quantique, métaux amorphes, détection d'hydrogène par bruit sismique, organoïdes pour tester les traitements... Du 11 au 14 juin, le CNRS expose 10 start-up deeptech et ses grandes priorités scientifiques à Vivatech, le plus important salon européen sur l'innovation.

CONSULTATION NATIONALE SUR LES MATHS

Au printemps 2025, CNRS Mathématiques a organisé une vaste consultation nationale sur la place de la discipline dans notre société. Des panels de citoyennes et citoyens poursuivront ces discussions jusqu'en juillet prochain.

LES FRANÇAIS ET FRANÇAISES MONTRENT LEUR INTÉRÊT POUR LES SCIENCES

Avec plus de 620 000 votes et 3 200 propositions, la consultation nationale menée par le CNRS sur la plateforme Make.org affiche les priorités des Françaises et des Français : une diffusion large des connaissances et de la culture scientifique, une place plus importante pour les scientifiques dans la décision publique, une recherche publique ambitieuse, indépendante et mieux financée au service de la société.

« La science est indispensable pour comprendre l'océan »

Quelles sont les attentes de la communauté scientifique vis-à-vis de la troisième conférence des Nations unies sur l'océan (Unoc3) ?

Joachim Claudet¹ Plusieurs annonces sont attendues lors de l'Unoc3, à commencer par la question des grands fonds marins, qui sera centrale, et alors que plusieurs coalitions d'États sont en cours de constitution autour d'un objectif commun : une gouvernance responsable et fondée sur la connaissance. L'Unoc pourrait aussi jouer un rôle d'accélérateur de ratification du traité BBNJ (Biodiversity Beyond National Jurisdiction), catalyseur potentiel d'une nouvelle gouvernance de la haute mer.

Autre sujet sensible : les aires marines protégées (AMP). L'heure n'est plus à multiplier les annonces de nouvelles AMP, mais à garantir la qualité de leur gestion. L'objectif fixé par la Commission européenne – 10 % d'aires en protection stricte – suppose une reconnaissance commune de

VIVANT

TERRE



© C. FÉLIX / CNRS IMAGES

ÉVÈNEMENT L'Année de la mer, avec en ligne de mire la Conférence des Nations unies sur l'océan (9 au 13 juin, à Nice), place celui-ci au cœur du débat public. Joachim Claudet, conseiller Océan du CNRS, évoque les enjeux de cette mobilisation, les attentes portées par la recherche et le rôle de l'organisme dans cette dynamique mondiale.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURENCE STENVOT

standards internationaux robustes. Enfin, une prise de position claire sur la décarbonation du transport maritime, l'un des secteurs les plus émetteurs de gaz à effet de serre, est également attendue.

Un point de vigilance demeure, cependant : la multiplication des engagements sans suite concrète. La communauté scientifique, fortement mobilisée à l'interface entre science et décision, alerte sur les limites de cette dynamique. Si les engagements

restent sans traduction opérationnelle, si la redevabilité fait toujours défaut, ce sont les chercheurs eux-mêmes qui risquent de se désengager.

Le CNRS coorganise le One Ocean Science Congress (OOSC), pilier scientifique de l'Unoc3. Quelles en sont les ambitions ?

J. C. Le One Ocean Science Congress, organisé du 3 au 6 juin à Nice, en amont de l'Unoc3, a pour ambition de réaffirmer le rôle central de la science

► Un bateau guide le *Marion Dufresne* hors du port, lors du départ de la campagne SWINGS, dans l'océan Austral, en 2021. En surface, la couche turbide est due aux fortes pluies tropicales de la veille.

dans les processus de décision internationale, non seulement comme productrice de connaissances, mais comme moteur et accompagnatrice des politiques publiques. C'est la première fois qu'une conférence scientifique a lieu en amont d'une conférence onusienne.

En ce sens, l'OOSC devient bien plus qu'un congrès scientifique : c'est une plateforme de gouvernance informée par la méthode scientifique, dans laquelle le CNRS joue un rôle structurant. Et c'est dans ce cadre que l'OOSC dévoilera plusieurs recommandations pour l'océan, qui serviront de socle pour les discussions politiques de la conférence onusienne.

Le congrès se positionne donc comme un espace de transparence, capable d'identifier les lacunes de mise en œuvre, de pointer les zones grises et de proposer des stratégies de comblement de ces *gaps*. Et, en cartographiant ce qu'on sait (et ce qu'on ignore encore), le congrès vise à construire les futurs programmes de recherche, à orienter les financements internationaux et à faire émerger de nouveaux sujets structurants. La géo-ingénierie, par exemple, fait partie des thématiques émergentes qui y seront discutées, dans une perspective critique et documentée.

Pourquoi est-il crucial d'investir dans la recherche océanique ?

J. C. La science joue un rôle clé pour atteindre l'Objectif de développement durable 14 des Nations unies², en apportant les connaissances nécessaires à la protection des écosystèmes marins et à la définition

de compromis éclairés entre enjeux environnementaux, sociaux et économiques. L'océan, en particulier la haute mer, reste largement méconnu malgré son importance cruciale, ce qui rend indispensable un investissement soutenu dans la recherche.

Parmi les initiatives attendues pour combler ce déficit de connaissance figure une mission d'envergure inédite, conçue comme l'équivalent maritime des grandes explorations spatiales. Elle ambitionne de structurer une gouvernance scientifique internationale afin de mieux comprendre et préserver l'océan, en lien avec la mise en œuvre du traité BBNJ.

« L'océan, en particulier la haute mer, reste largement méconnu. »

Comment le CNRS s'empare-t-il de la thématique de l'océan ?

J. C. À la fois régulateur du climat, refuge pour la biodiversité et ressource essentielle pour des millions de personnes, l'océan fait aujourd'hui face à des pressions croissantes. Parmi celles-ci : surpêche, pollution plastique, exploitation des grands fonds et acidification. Le CNRS est largement impliqué dans sa sauvegarde et sa défense.

Avec plus de 1 000 scientifiques mobilisés dans une cinquantaine de laboratoires, le CNRS est l'un des tout premiers organismes de recherche au monde capables de composer de multiples alliances entre toutes

les disciplines – océanographie, physique, sociologie, biologie, écologie, géologie, mathématiques, chimie, économie, et même philosophie – pour étudier l'océan dans toutes ses dimensions.

Grâce à cette couverture disciplinaire unique, le CNRS est impliqué dans l'ensemble des grands thèmes abordés par l'Unoc3 et par son pilier scientifique, l'OOSC. D'ailleurs, le CNRS coorganise trois événements parallèles dans le cadre de l'Unoc3, dont deux à Villefranche-sur-Mer, le 10 juin, consacrés à l'observation océanique, un domaine où il possède une expertise interdisciplinaire rare à l'échelle internationale.

Le troisième *side event*, centré sur l'équité océanique, visera à intégrer la justice sociale dans les politiques marines, avec une attention particulière portée aux enjeux de l'économie bleue et au rôle croissant des sciences humaines et sociales.

Le CNRS copilote aujourd'hui quatre programmes nationaux de recherche France 2030 liés à l'océan (BRIDGES, Océan et Climat, Grands fonds marins et ATLASa), couvrant des enjeux allant de la gestion durable des ressources à la biodiversité marine. Il anime également le GdR OMER, un groupement de recherche interdisciplinaire qui fédère des laboratoires de plusieurs organismes et agit comme incubateur d'idées pour les futures politiques scientifiques.

Afin de structurer ses actions, le CNRS a aussi élaboré une stratégie océanique appuyée sur une *task force* regroupant ses 10 instituts. Dans le cadre de l'Année de la mer 2025, il développe des actions de médiation, avec notamment un *Carnets de science* dédié³, une série spéciale sur le site du CNRS, une exposition photo et des événements comme les journées OMER, en avril dernier. **II**

1. Directeur de recherche au Centre de recherches insulaires et observatoire de l'environnement (Criobe, unité CNRS/EPHE/Université Perpignan Via Domitia). 2. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/oceans/>
3. Revue *Carnets de science* n° 18 : <https://bit.ly/ocean-18>

Et les plantes colonisèrent la terre ferme...

© ROBERT HARDIN / HEMIS.FR

Les scientifiques appellent « terrestrialisation » le processus de conquête des continents par les plantes. Ce saut évolutif sans précédent se serait produit voilà environ 500 millions d'années. Pas si loin, à l'échelle des temps géologiques ! Les premiers végétaux à s'établir sur les terres émergées furent des plantes sans fleurs ni graines issues de l'évolution d'une lignée d'algues d'eau douce.

Cet assaut aurait eu lieu à partir des lacs, rivières et mares – et non de mers ou d'océans. « *En effet, les algues vertes "sœurs" des plantes terrestres sont retrouvées dans des milieux d'eau douce, mais pas en milieu marin* », souligne Pierre-Marc Delaux, au Laboratoire de recherche en sciences végétales¹, à Toulouse. Selon une hypothèse élaborée à partir de l'étude de fossiles dans les années 1980, c'est grâce à une association symbiotique avec des champignons microscopiques du sol que ces premières plantes – dépourvues de racines, et donc incapables de puiser des minéraux dans le sol – ont survécu.

Cette symbiose est appelée « mycorhize » (du grec ancien *μύκης*/*múkēs*, « champignon », et *ρίζα*/*rhíza*, « racine »). Elle a permis et permet encore aux champignons d'apporter aux plantes des nutriments et de l'eau, grâce à leurs fins filaments qui s'enfouissent dans la terre. Les plantes, elles, fournissent aux champignons des sucres produits par photosynthèse et des molécules carbonées, notamment des lipides. De nouvelles études phylogénétiques menées par Pierre-Marc Delaux et ses collègues ont

VIVANT

PALÉOÉCOLOGIE Il y a un demi-milliard d'années, les plantes, encore aquatiques, partaient à la conquête des continents. Cette transition a métamorphosé la planète, ouvrant la voie aux vertébrés terrestres.

PAR KHEIRA BETTAYEB

confirmé l'hypothèse en 2021. Ils ont démontré que les plantes vasculaires (dotées de racines et de tiges) actuelles possèdent des gènes symbiotiques, indiquant que l'ancêtre commun à ces plantes devait aussi en disposer.

Des gènes de « signalisation »

Les chercheurs ont ensuite inoculé un champignon à une espèce très divergente, non vasculaire, la mousse *Marchantia paleacea*, et analysé l'expression du génome de la plante au fil du temps. « *Nous avons observé que la symbiose déclenchait différents processus, dont la production de lipides*, explique Pierre-Marc Delaux. *Second élément de preuve, nous avons également montré que si on enlève ces gènes symbiotiques à Marchantia paleacea, elle perd son aptitude à s'associer efficacement aux champignons du sol.* »

► Des mousses et des lichens ont colonisé le champ de lave de Berserkjahraun, un paysage de la péninsule de Snæfellsnes, dans les régions polaires d'Islande.

La même équipe a identifié plusieurs gènes de « signalisation » que les plantes vasculaires et non vasculaires partagent depuis des millions d'années – « et qui sont là pour leur indiquer qu'elles doivent activer le réseau symbiotique au niveau de leurs cellules », précise Pierre-Marc Delaux. Ces différentes recherches indiquent que ces gènes ont été hérités chez toutes les plantes terrestres, de génération en génération, depuis leur ancêtre terrestre commun qui bénéficiait déjà de cette aptitude symbiotique, il y a 450 millions d'années. »

À nouveau milieu, nouvelles contraintes

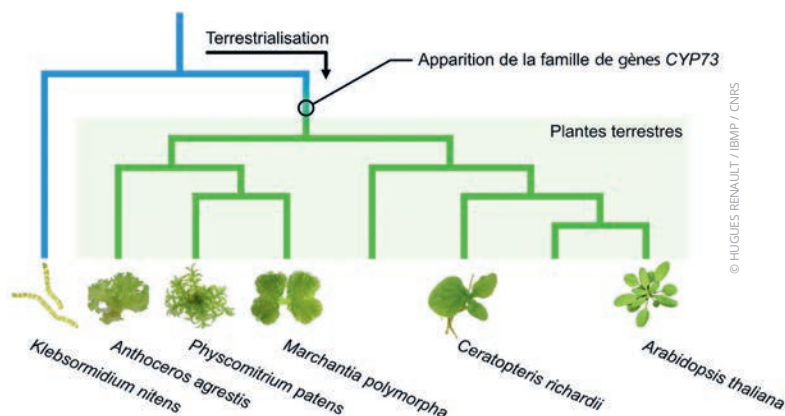
Pour prospérer dans ce nouvel environnement, les plantes pionnières ont dû s'adapter aux contraintes propres à la vie sur la terre ferme : « une faible disponibilité de l'eau, des variations importantes de températures, une exposition aux rayons ultraviolets du soleil et à des pathogènes, etc. », énumère Hugues Renault, chercheur en biologie végétale à l'Institut de biologie moléculaire des plantes², à Strasbourg.

Chez les plantes terrestres, les polymères hydrophobes déposés à la surface de différents tissus (comme la cuticule) sont ainsi connus pour contribuer à la limitation de la perte d'eau et à la résistance à des stress induits par des conditions environnementales extrêmes. Ce qui en fait des « innovations de terrestrialisation » potentielles.

En 2024, Hugues Renault et ses collègues ont étudié une famille de gènes (CYP73) qui permet de générer de telles molécules aux propriétés antioxydantes et anti-UV, et d'autres qui structurent des barrières extracellulaires protectrices comme la cuticule. En inactivant ces gènes chez plusieurs espèces de plantes terrestres, ils ont observé un développement anormal de ces végétaux et une plus grande sensibilité à la sécheresse. Ces résultats

► La famille des gènes CYP73 est apparue chez un ancêtre commun aux plantes terrestres, lors du processus de sortie des eaux.

► Vue d'un lichen *Caloplaca saxicola* au microscope. Deux espèces y vivent en symbiose : un champignon (en jaune) et des algues (en vert) ou des cyanobactéries.



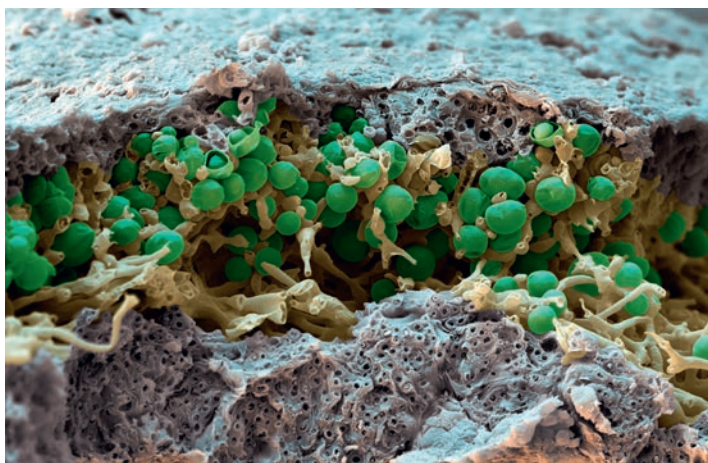
démontrent que la sortie des plantes de l'eau a été en partie possible grâce à l'émergence des gènes CYP73, apparus chez un ancêtre et strictement conservés depuis.

Vertébrés, sols, atmosphère : tout change

Cette migration hors des eaux a transformé le visage de notre planète. « Alors que, jusqu'à 500 millions d'années, la vie sur la Terre était limitée aux milieux aquatiques, la conquête de la terre ferme par les plantes a contribué à étendre les environnements dans lesquels la vie est possible », observe Christine Strullu-Derrien, paléobotaniste à l'Institut de systématique, évolution, biodiversité³, à Paris. Entre 419 et 358,9 millions d'années, les animaux vertébrés, qui se nourrissent des plantes, ont pu sortir de l'eau. »

La progression des végétaux sur les continents en a fortement modifié le sol. « La dégradation des tissus végétaux lorsqu'ils déperissent a permis la formation d'humus, la couche supérieure du sol, déterminante pour sa fertilité », explique Brigitte Meyer-Berthaud, paléobotaniste émérite au laboratoire Botanique et modélisation de l'architecture des plantes et des végétations, à Montpellier⁴. Les racines des plantes ont aussi contribué à la fragmentation des roches. Enfin, la sécrétion par ces racines d'une solution acide permet de dissoudre la roche mère et de produire des argiles qui contribuent à la fertilité. »

De plus, la prolifération des plantes sur la Terre a drastiquement modifié la composition de son atmosphère. « Grâce au processus de photosynthèse, qui permet aux plantes de fabriquer de la matière organique en captant le dioxyde de carbone (CO₂) de l'air, la teneur de l'atmosphère en CO₂ aurait été divisée par un facteur dix », note Brigitte Meyer-Berthaud. Et, grâce au processus d'évapotranspiration, par lequel une partie de l'eau qui circule dans les plantes est renvoyée sous forme gazeuse dans l'atmosphère, les plantes ont également contribué à rafraîchir celle-ci. ▮



1. Unité CNRS/Université Toulouse 3 - Paul Sabatier. 2. Unité propre du CNRS associée à l'université de Strasbourg. 3. Unité CNRS/Muséum national d'histoire naturelle/Sorbonne Université/École pratique des hautes études-PSL. 4. Unité CNRS/Cirad/Inrae/IRD/Université de Montpellier.

Une carte pour visualiser l'énergie dans le cerveau

VIVANT 

NEUROSCIENCES La toute première cartographie des mitochondries du cerveau vient d'être dévoilée. Un pas de plus dans la compréhension de ces structures qui fournissent leur énergie aux cellules cérébrales et sont impliquées dans diverses pathologies, dont les maladies mitochondriales, diagnostiquées depuis une dizaine d'années.

PAR LAURE CAILLOCE

La publication aurait pu facilement passer sous les radars du commun des mortels. Mais elle se trouve être publiée dans la prestigieuse revue *Nature*¹. La première cartographie des mitochondries du cerveau vient d'être dévoilée par une équipe de chercheurs franco-américaine. Et c'est un petit bouleversement.

Les mitochondries, mal connues du grand public, sont à la base de toute vie. Ces organites, de minuscules bactéries qui vivent en symbiose avec nos cellules, à l'intérieur de celles-ci, leur fournissent l'énergie dont elles ont besoin pour fonctionner. « *L'oxygène que nous respirons leur sert à dégrader les nutriments que nous ingérons. Grâce à ce processus, appelé "phosphorylation oxydative", elles fournissent leur carburant à tous nos tissus et organes*, détaille Michel Thiebaut de Schotten, coauteur de l'article de *Nature* et neuroscientifique à l'Institut des maladies neuro-dégénératives² de Bordeaux. *Sans mitochondries, il n'y aurait pas de vie pluricellulaire.* »

Les mitochondries des cellules cérébrales sont tout particulièrement scrutées par les scientifiques, et pour cause : les besoins énergétiques de notre cerveau sont absolument considérables. « *On estime que le cerveau consomme 20 % de l'énergie totale produite par le corps.*



▼ Cartographie des mitochondries dans le cerveau : en jaune, les zones moins denses en mitochondries, en rouge, les plus denses.

Pourtant, on n'avait aucune idée de la façon dont les mitochondries se répartissaient dans cet organe, et si cette distribution pouvait mieux éclairer son fonctionnement », raconte Michel Thiebaut de Schotten, spécialiste d'imagerie cérébrale.

Une méthode inédite

C'est sa rencontre avec Martin Picard et Eugene Mosharov, des confrères issus de la biologie cellulaire, spécialistes des mitochondries à l'université Columbia (New York), qui a fait naître leur projet un peu fou : allier leurs deux

© MICHEL THIEBAUT DE SCHOTTEN

disciplines pour quantifier avec précision les mitochondries des cellules cérébrales dans chaque région du cerveau. Pour ce faire, ils ont mis au point une méthode inédite : mesurer avec précision la quantité de mitochondries présentes dans une tranche de cerveau humain (prélevée post mortem) et la recombinaison avec l'image d'un cerveau standard obtenue par IRM fonctionnelle.

Concrètement, la tranche de cerveau a été découpée en petits cubes de 3 millimètres de côté, et la quantité et les spécificités des mitochondries ont été analysées pour chacun de ces cubes. Toutes ces données ont ensuite été représentées en 3D sur une image du cerveau. « *Pour chaque petit cube, j'ai un cube correspondant d'imagerie cérébrale* », explique Michel Thiebaut de Schotten, qui a pu construire un véritable modèle mathématique prédictif et extrapoler ces résultats à l'ensemble de l'encéphale.

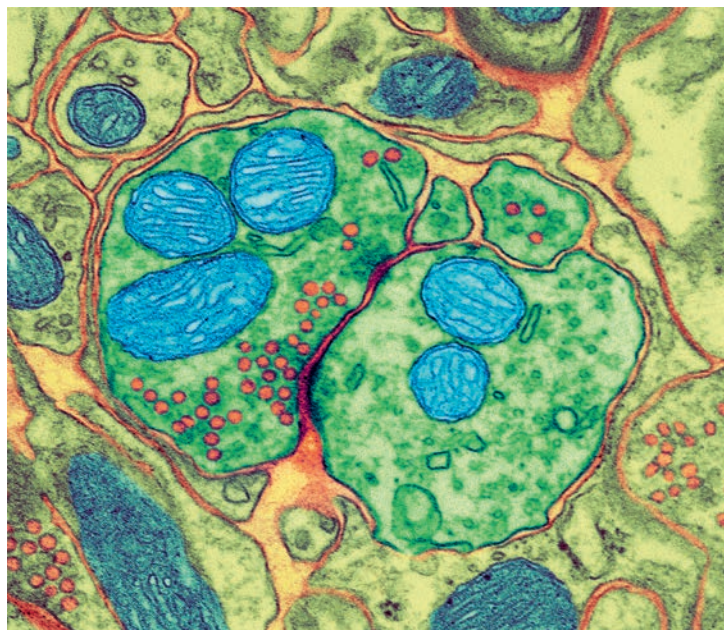
« *On a obtenu une carte à très haute résolution de la répartition des mitochondries dans le cerveau*, se félicite le chercheur. *Car, si les petits cubes initiaux faisaient chacun 3 millimètres de côté, l'imagerie cérébrale descend, elle, jusqu'à une résolution de 1 millimètre cube.* »

Des disparités marquées entre régions du cerveau

Cette cartographie, jamais vue auparavant, est un choc pour les deux chercheurs. S'ils soupçonnaient des différences entre régions cérébrales, ils n'avaient pas anticipé une telle hétérogénéité. Première surprise : la matière grise, la partie centrale des neurones, concentre deux fois plus de mitochondries que la matière blanche, qui constitue toute la connectique entre les neurones.

« *On ne s'attendait pas à une différence aussi marquée* », commente Michel Thiebaut de Schotten. Pour autant, la matière blanche est tout sauf un ensemble de câbles passifs. « *La densité en mitochondries y est tout de même étonnamment élevée*, tient à souligner Martin Picard. *Cela montre combien les connexions dans le cerveau suscitent de besoins énergétiques.* »

Deuxième surprise de taille pour les scientifiques : à l'intérieur de la matière grise, des disparités marquées apparaissent entre les régions du cerveau. « *Ce sont les régions du cerveau qui sont apparues le plus récemment sur l'arbre de notre évolution, notamment le lobe frontal et le lobe pariétal, très développés chez l'être humain, qui sont les plus riches en mitochondries. Les régions les plus anciennes, comme le système olfactif et l'hippocampe, que nous partageons avec les crocodiles, ont une demande moins importante en énergie*, explique Michel Thiebaut de Schotten. Avec



▼ Mitochondries (en bleu) à l'intérieur de cellules cérébrales. Les mitochondries fournissent l'énergie nécessaire à l'activité cellulaire.

l'évolution et l'apparition de fonctions comme le langage, la spatialisation, ou encore la conscience, il semble que le cerveau a besoin de plus d'énergie pour fonctionner. »

Quand les mitochondries dysfonctionnent

Cette cartographie énergétique d'un cerveau en bonne santé n'est qu'une première étape pour les chercheurs. Ceux-ci veulent désormais se pencher sur les pathologies liées aux dysfonctionnements des mitochondries. À commencer par les maladies dites « mitochondriales ». « *Diagnostiquées en clinique depuis une dizaine d'années, ces maladies génétiques rares, aux symptômes variés, sont liées à une mutation sur les gènes de la production d'énergie* », explique Martin Picard.

Les chercheurs soupçonnent également une détérioration de l'activité mitochondriale d'avoir un lien avec les pathologies neurodégénératives telles que Parkinson et Alzheimer, mais aussi avec les accidents vasculaires cérébraux. « *À terme, l'idée serait de disposer de cartographies type du cerveau pour toutes ces affections, et de pouvoir comparer cette "signature cérébrale" aux IRM réalisées chez les patients* », annonce Michel Thiebaut de Schotten.

« *C'est aussi un formidable outil pour réaliser des bilans énergétiques personnalisés*, se projette Martin Picard. *Chacun d'entre nous dispose d'un budget d'énergie donné, que le corps utilise au mieux, en priorisant les fonctions – digestive après un repas, musculaire pendant un effort physique... À terme, cette carte pourrait permettre de dire "Voici l'état de santé mitochondrial de ce patient", et de trouver des moyens de l'améliorer.* » Et de conclure : « *On a beaucoup focalisé sur l'importance des gènes, ces trente dernières années, mais, sans les mitochondries, rien ne pourrait fonctionner dans le corps. L'énergie, c'est la vie.* » II



L'optimisation

face aux questions éthiques

L'optimisation, outil mathématique d'aide à la décision, se trouve au cœur des algorithmes de notre quotidien. Lorsqu'on utilise un GPS, sa réponse dépend non seulement de ce qu'on y cherche, mais également de critères plus ou moins apparents.

« Chercher le "meilleur chemin" avec un GPS sous-entend de choisir entre le plus rapide, le plus court, le moins cher, etc. C'est pareil pour n'importe quel problème avec des approches mathématiques : il faut choisir la ou les dimensions à mesurer, et comparer pour élire une solution préférable, explique Odile Bellenguez, professeure à l'IMT Atlantique et membre du Laboratoire des sciences du numérique à Nantes¹. Développer des outils d'optimisation, c'est automatiser les recommandations qui seront produites par la suite dans bien des situations différentes. Il faut donc prêter attention à la façon dont ces recommandations seront reçues et, par conséquent, former et informer sur leurs limites, et permettre à la personne qui les reçoit de questionner leur pertinence et leur sens dans son contexte. »

Puisque optimiser dépend du contexte, la dimension éthique – à savoir, se demander si cette solution est bien la meilleure pour tout le monde – est centrale. « Chercher le "meilleur chemin" sous-entend de choisir ce que nous considérons comme bien-fondé et juste pour nous, mais aussi

NUMÉRIQUE

ALGORITHMES Les outils automatiques d'aide à la décision n'échappent pas aux biais éthiques. Mais les spécialistes en recherche opérationnelle sur les processus de décision n'ont pas attendu le tsunami de l'intelligence artificielle générative pour s'interroger.

PAR LYDIA BEN YTZHAK

pour tous, et dans le temps long, précise Odile Bellenguez. Par exemple, l'algorithme peut m'interdire de rouler près des écoles ou des hôpitaux, même si cela me ferait gagner du temps, au nom de valeurs supérieures. »

L'enjeu de la formulation

Ainsi, fournir des modèles, des méthodes et des outils pour améliorer la prise de décision a des impacts qui peuvent aller bien au-delà du problème posé, impliquer d'autres parties prenantes ou soulever des problématiques ignorées avant leur application.

Cette recherche dépend donc de manière cruciale de la façon de formuler la question. Même lorsque les enjeux d'une prise de décision semblent clairement identifiés, des surprises peuvent encore émerger.



Lire l'intégralité de l'article
sur lejournel.cnrs.fr

« Un exemple connu d'optimisation aux conséquences moralement dommageables est celui d'un vendeur d'agrafeuses à qui l'on reprochait d'avoir des prix de vente bien plus élevés dans des quartiers défavorisés que dans des zones plus aisées. L'entreprise ayant confié à un algorithme la fixation des prix fut la première surprise de ce résultat. Il s'est avéré que ce tarif était corrélé aux produits concurrents présents dans les mêmes boutiques. Cette concurrence étant inexistante dans des quartiers moins aisés, mécaniquement, l'algorithme fixait le prix maximal, explique Alexis Tsoukias, directeur de recherche au CNRS au Laboratoire d'analyse et modélisation de systèmes pour l'aide à la décision², qui a longtemps travaillé sur l'aide à la décision dans le domaine public. C'est là un cas typique de biais involontaire. »

Un problème avant tout politique

On arrive ainsi à un paradoxe. Certains cas d'optimisation aboutissent à « des effets souhaitables et délétères dans le même mouvement, observe Odile Bellenguez. Par exemple, optimiser l'organisation du travail peut avoir du sens pour soulager les équipes des tâches inutiles ou chronophages, mais faire également disparaître des temps de respiration, de coordination et de partage de connaissances entre professionnels. »

D'autres conséquences involontaires surgissent lorsque l'optimisation est utilisée hors de son contexte d'origine. Ainsi, transposer à des déplacements individuels des trajets optimisés pour le transport de marchandises conduit à l'engorgement de certaines villes.

« La notion d'éthique dépend aussi de l'appréciation du contexte et des attentes, une subtilité qu'aucun algorithme ne peut pleinement saisir, souligne Odile Bellenguez. Ce qui relève de l'éthique est difficile à formaliser et à répercuter sur le modèle de décision. »

« Il faut prendre conscience que, dans la majorité des cas, le problème n'est pas seulement technique : il est purement politique, affirme Alexis Tsoukias. Aucun outil n'est neutre. Imaginons une tâche consistant à répartir les nouveaux étudiants en fonction de leur filière universitaire de préférence et du nombre de places dont dispose chacune de ces filières. Privilégier tel ou tel critère de sélection des étudiants dans le calcul du résultat produit un biais qu'on peut qualifier de politique. Cette décision ne dépend pas de la machine, mais bien de celui qui la programme. »

Du temps et de l'argent

« La contribution algorithmique reste assujettie à ce que collectivement, politiquement, nous choisissons d'en faire, confirme Odile Bellenguez. Par exemple, la plateforme nationale française d'admission en première année des formations de l'enseignement supérieur, Parcoursup, a été paramétrée pour maintenir un certain taux de boursiers dans les formations, ce qui est souvent bien perçu, mais aussi sur d'autres

aspects qui ne sont pas unanimement acceptés – par filière ou localisation, par exemple. Les résultats ne sont ainsi pas seulement critiqués pour leur composante algorithmique, mais bien pour ce qui est véhiculé par l'algorithme. »

Il arrive aussi que l'outil conçu pour automatiser les recommandations ne résolve pas entièrement le problème... à moins de choisir de consacrer du temps et de l'argent aux cas exceptionnels. Ce qui peut réduire l'optimisation de l'ensemble, mais lui faire gagner en éthique. Imaginons une administration optimisée dans le traitement des dossiers des salariés en CDI pour gagner en temps et en coûts, mais qui va engendrer un usage problématique pour tous les usagers en situation précaire...

Optimiser un processus pour un acteur se fait parfois au détriment d'autres. Ainsi, l'optimisation du prix du transport aérien afin de minimiser le tarif offert au consommateur a eu pour effet rebond la modification du comportement des voyageurs, qui ont eu de plus en plus recours au transport aérien au détriment d'autres modes de déplacement écologiquement moins destructeurs. Dans ce cas, la société doit arbitrer entre plusieurs enjeux majeurs relevant de l'environnement, de la sobriété ou de la justice sociale, parfois complexes à modéliser.

En somme, les problèmes de décision sont construits, et non simplement identifiés. Il faut savoir ce que l'on veut et, peut-être encore plus, ce que l'on souhaite éviter. ■

▲ Les processus d'optimisation à l'œuvre derrière la plateforme Parcoursup ont généré quantité de contestations – comme ici, lors d'une manifestation à Paris, en mai 2024.



1. LS2N, unité CNRS/Centrale Nantes/Nantes Université.
2. Lamsade, unité CNRS/Université Paris-Dauphine-PSL.

Roses: sur la piste des molécules au parfum enivrant

© TUUL ET BRUNO MORANDI / HÉMIS.FR

Plante ornementale la plus cultivée du monde, prisée depuis l'Antiquité pour sa beauté et son parfum, la rose n'a pourtant pas encore livré tous ses secrets. Les composants de ses effluves sont analysés depuis plusieurs décennies par les chimistes. Mais leurs liens avec la perception de l'odeur de rose par les humains n'avaient été que très peu étudiés.

Pourquoi certaines fleurs exhalent-elles une fragrance plus typique de la rose que d'autres ? Quelles molécules rendent leurs parfums agréables ? attractifs ? floraux ? fruités ? La collaboration scientifique française interdisciplinaire qui s'est attelée à ces questions épineuses vient de publier ses résultats dans la revue *iScience*¹.

Premier défi : identifier le nombre de composés émis par les roses. « *C'est un problème extrêmement complexe, car il s'agit d'un mélange très riche de molécules* », souligne Sylvie Baudino, coautrice principale de l'article et professeure émérite à l'université Jean Monnet Saint-Étienne, dans le laboratoire Biotechnologies végétales appliquées aux plantes aromatiques et médicinales² (BVpam). Des centaines de composés ont été référencés, précise-t-elle.

Ces travaux représentent « *une première étape pour démêler les composés du mélange, afin d'identifier ceux qui provoquent l'attraction et ceux qui sont vraiment liés à la perception du parfum de rose, mais aussi en quelles proportion et quantité ils sont présents* », ajoute Nathalie Mandairon, coautrice principale et directrice de recherche CNRS au Centre de recherche en neurosciences de Lyon³. Des roses fraîchement coupées de dix variétés distinctes ont ainsi

VIVANT



BIOCHIMIE Pourquoi une fleur de rose sent-elle... la rose ? Des scientifiques ont analysé la composition chimique de parfums de fleurs, dont les composés volatils servent à plaire, mais aussi à se défendre.

PAR JULIE DEGEN

▲ **Triage des roses dans la ville de Kannauj, dans l'Uttar Pradesh (Inde), qui s'est fait une spécialité de la distillation des fleurs pour l'industrie du parfum.**

été soumises aux participants, qui en ont noté les odeurs à l'aveugle. En parallèle, les fleurs de chaque variété ont été isolées sous une cloche en verre, et les molécules émises ont été recueillies grâce à un matériau absorbant présent dans la cloche, puis analysées.

Le mystère de la rose parfaite

Résultat : dans les composés associés à l'odeur typique de rose, précise Nathalie Mandairon, « *nous avons retrouvé des molécules attendues, comme les phénylpropanoïdes, mais également d'autres que nous n'attendions pas, comme les ionones et les oxylipines* ». Les parfumeurs connaissent ces deux dernières familles, mais, plutôt qu'un parfum de rose, leur attribuent en général une odeur boisée ou de violette pour les ionones et une odeur fraîche pour les oxylipines.

L'étude révèle aussi que « *plus l'odeur est typique des roses, plus il y a d'ionones et d'oxylipines, plus les gens l'apprécient, la trouvent plaisante* », complète Nathalie Mandairon. Les scientifiques n'ont pas encore déniché la recette de la

En bref

rose parfaite, mais montrent qu'un parfum agréable résulte d'un subtil équilibre entre ionones, oxylipines et 2-phényléthanol, tandis que les terpènes sont associés à des effluves fruités. Les oxylipines, elles, sont déjà connues pour leurs effets anxiolytiques chez l'humain et l'animal.

Une vertu qui s'ajoute à la symbolique flatteuse dont jouit la fleur dans l'imaginaire collectif. « *En question préliminaire*, rapporte Nathalie Mandairon, nous avons demandé aux participants de l'étude à quoi leur faisait penser l'odeur de rose. Ils l'ont associée positivement à la cosmétique, à la nature et, en dernier lieu, à l'alimentation. »

Les deux autrices expriment leur souhait de répéter ces tests après avoir retiré sélectivement certains composés du parfum pour comprendre plus finement le lien entre sa chimie et sa perception. Mais les premières conclusions intéressent d'ores et déjà sélectionneurs et parfumeurs.

Des odeurs qui attirent... ou repoussent

Les humains ne sont pas la seule espèce que l'odeur de rose ne laisse pas indifférente. Le parfum des fleurs participe en général à l'attraction des pollinisateurs – et, ainsi, à la reproduction –, ce qui est crucial pour les roses sauvages.

Les odeurs émises par les plantes ont de multiples fonctions écologiques. « *Les composés organiques volatils peuvent être utilisés à des fins de communication pour attirer les pollinisateurs, mais aussi les prédateurs de certains parasites, favoriser les défenses des plantes alentour et attirer des micro-organismes mutualistes*, détaille Benoît Boachon, ingénieur de recherche CNRS au BVPam qui a participé à l'étude sus-citée. Ils peuvent également servir à la défense contre les facteurs de stress environnementaux, les pathogènes, les ravageurs et les plantes compétitrices. »

La lavande et la menthe présentent ainsi des petits poils (trichomes) au sommet desquels se trouvent des glandes stockant des molécules odorantes. Lorsqu'un prédateur s'approche, l'ingénieux piège s'active, libère son contenu et repousse l'envahisseur. Toutefois, de récents travaux ont montré que ces composés émis dans l'air par un végétal servent aux échanges avec d'autres organismes, mais aussi à la communication entre ses propres organes !

« *Nous nous sommes aperçus que des composés volatils étaient émis à l'intérieur même du bouton floral en développement chez le pétunia*, annonce Benoît Boachon. Cela permet, d'une part, de protéger la plante contre les proliférations bactériennes, mais, surtout, cela induit un signal hormonal favorisant la croissance du pistil et la production de graines. Or ce signal ne repose pas sur une molécule soluble, mais sur un composé volatil qui va pouvoir communiquer à distance. »

Ce phénomène est dénommé « fumigation naturelle ». La découverte de son mécanisme a fait l'objet d'une publication dans la revue *Science*⁴ l'année dernière. Reste à le rechercher chez d'autres espèces... II

LE CNRS PARMi LES 100 MEILLEURS INNOVATEURS MONDIAUX EN 2025

Le CNRS figure à nouveau dans le prestigieux classement « Top 100 Global Innovators » publié par Clarivate. Il fait partie des 7 acteurs français à se distinguer parmi les 100 organismes publics et privés les plus innovants au monde dans cette édition 2025.

LE SUPERCALCULATEUR JEAN ZAY MONTE (ENCORE) EN PUISSANCE

Le 13 mai 2025, le CNRS et le Grand équipement national de calcul intensif (Genci) ont inauguré la quatrième extension de Jean Zay, marquant une nouvelle étape pour ce supercalculateur national. Jean Zay vient par ailleurs d'obtenir le label européen AI Factories, un nouveau signe de reconnaissance à l'échelle du continent.

NEUF NOUVEAUX FELLOW AMBASSADEURS

Avec ses fellow ambassadeurs, le CNRS s'allie à des figures scientifiques de tout premier plan. Parmi les neuf nouveaux venus : Emmanuelle Charpentier, prix Nobel pour Crispr-Cas9 (une découverte qui a ouvert la voie à la médecine génomique) ou Yifang Wang, pionnier de la physique des neutrinos, dont les expériences sont à la pointe de la physique fondamentale mondiale.

MOUV' EN SANTÉ, UNE RECHERCHE PARTICIPATIVE SUR LA CONDITION PHYSIQUE

Le 17 mars 2025, dans l'héritage des Jeux olympiques et paralympiques, le CNRS a lancé la plateforme de recherche participative Mouv' en Santé pour mieux connaître l'état de la condition physique de la population française en lien avec les modes de vie. Consultez <https://bit.ly/mouv-sante>

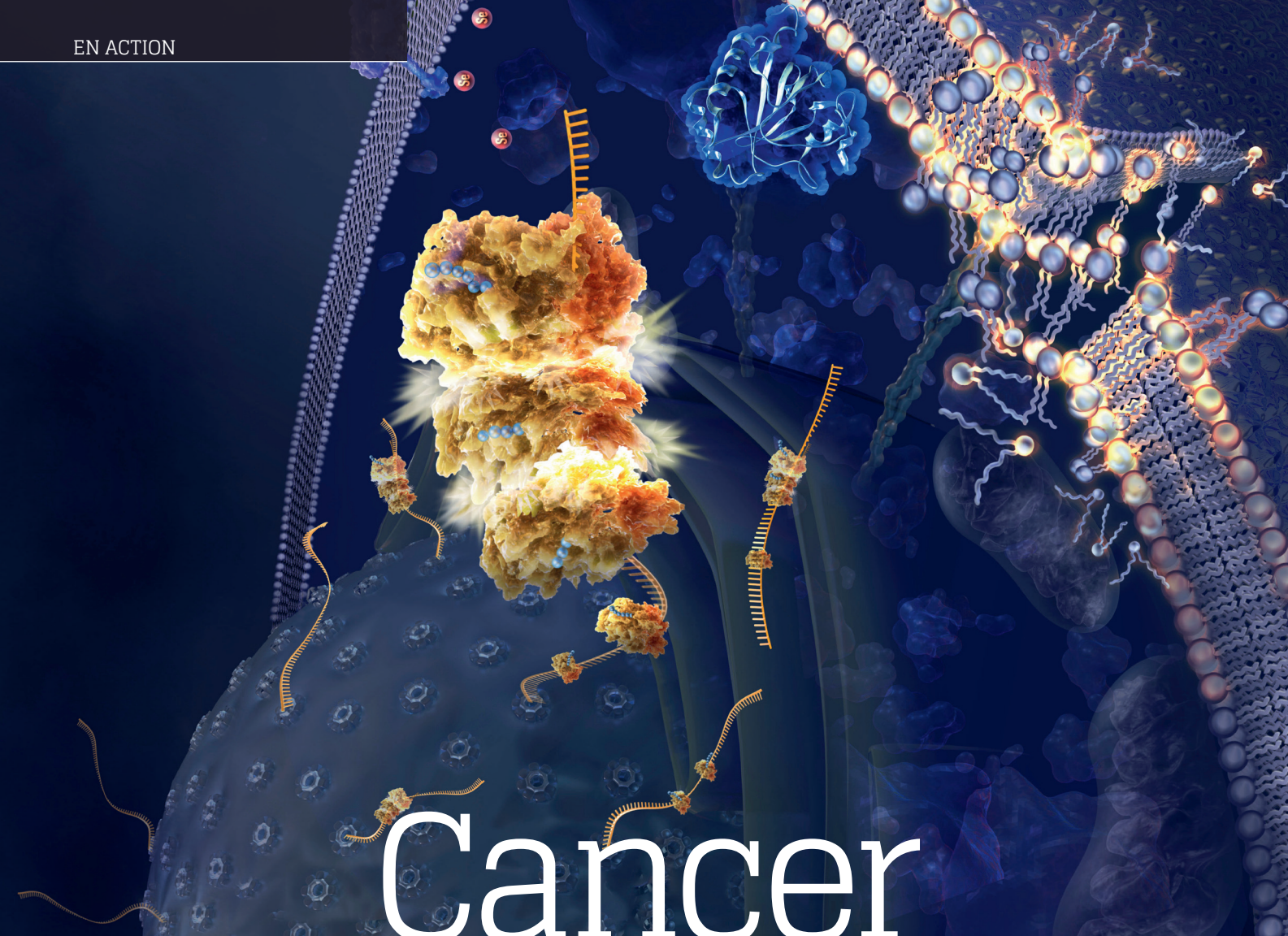
LE CNRS AU SALON INTERNATIONAL CHANGENOW

Seul établissement de recherche public français partenaire du salon international ChangeNOW, qui a eu lieu du 24 au 26 avril à Paris, le CNRS y a réaffirmé son engagement pour un avenir durable à travers plusieurs conférences et la tenue d'un stand à l'Impact Job Fair.

UNE EXPERTISE COLLECTIVE SUR LE PLASTIQUE

Le 23 mai 2025, le CNRS et l'Inrae ont restitué une expertise scientifique collective, commandée par deux ministères et l'Ademe, sur les plastiques utilisés dans l'agriculture et l'alimentation.

1. doi.org/10.1016/j.jisci.2024.111635 2. Unité CNRS/Université Jean Monnet Saint-Étienne.
3. Unité CNRS/Inserm/Université Claude Bernard Lyon 1. 4. doi.org/10.1126/science.adl4685



Cancer

le double jeu du fer

VIVANT 

MÉDECINE Les approches telles que la chimiothérapie ont tendance à n'être efficaces que contre les cellules cancéreuses qui prolifèrent le plus. À l'Institut Curie, Raphaël Rodriguez et son équipe ont opté pour une démarche unique. Ils ciblent les cellules à fort potentiel métastatique grâce à une molécule capable d'induire une mort cellulaire particulière, médiée par le fer : la ferroptose.

PAR MEHDI HARMİ

Le cancer, le mal du siècle, continue de résister à l'arsenal thérapeutique développé au fil des ans par les scientifiques du monde entier. Le fait est que le cancer est retors. Aujourd'hui, la plupart des thérapies ciblent préférentiellement les cellules cancéreuses en prolifération. Ces divisions rapides, en plus de permettre à la tumeur de croître, induisent une pression de sélection sur leur propre communauté. Ainsi, au sein de la tumeur, certaines cellules s'adaptent et arrêtent de se diviser pour entrer dans une sorte de dormance leur permettant d'échapper aux traitements.

Plus encore, cet état non prolifératif est associé dans certains cas à d'autres propriétés, à savoir la capacité à migrer, à envahir d'autres tissus – bref, à métastaser. Ces cellules métastatiques ont, de surcroît, une plus forte résistance aux chimiothérapies actuelles et un fort potentiel de colonisation. Elles sont l'objet des travaux de scientifiques

▲ Lors de la ferroptose, les membranes lipidiques sont dégradées (en haut à droite sur cette image de synthèse).

du CNRS, de l'Institut Curie et de l'Inserm dirigés par le chimiste Raphaël Rodriguez¹. « *La thématique majeure de mon laboratoire est de comprendre qu'elle est la nature de cette adaptation et quelles en sont les bases chimiques et moléculaires sous-jacentes*, précise le chercheur. *Sachant que si on comprend comment ces cellules s'adaptent, on peut identifier de nouvelles cibles et, par conséquent, inventer de nouveaux médicaments qui cibleront et entraveront ces adaptations.* »

Cette approche, aussi novatrice qu'unique, a vu ses résultats publiés dans la revue *Nature*². Elle tire parti à la fois d'une petite molécule mise au point au laboratoire et d'un processus de mort cellulaire médiée par le fer et récemment mis en évidence : la ferroptose.

Le fer, indispensable à la transformation cellulaire...

Métal présent en grande quantité dans la croûte terrestre, le fer joue aussi un rôle essentiel dans le monde du vivant – notamment comme transporteur d'oxygène via l'hémoglobine (ce qui lui confère sa couleur rouge caractéristique). Plus récemment, le fer a été identifié comme facteur majeur d'un type de mort cellulaire appelé « ferroptose ».

« *La ferroptose, c'est une vulnérabilité de la cellule à la chimie du fer*, décrit le chercheur. *En réaction à une forte concentration interne de fer, la cellule invente des mécanismes pour en neutraliser les effets délétères. Pour une cellule cancéreuse, si les mécanismes neutralisants sont toujours efficaces, alors la cellule vit, s'adapte et peut métastaser. En revanche, si la cellule n'est pas capable de s'accommoder aux effets secondaires d'une concentration élevée en fer (en l'occurrence, la production de radicaux libres d'oxygène), eh bien, elle meurt.* »

Plus précisément, une fois le fer internalisé dans la cellule au sein d'un compartiment cellulaire, il va réagir au peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée) qui y est présent et produire des radicaux libres d'oxygène. Ce sont ces derniers qui sont à l'origine de la dégradation des lipides constituant la membrane du compartiment. Dégradation qui se propagera de proche en proche à l'ensemble des compartiments cellulaires (noyau, mitochondrie...), menant in fine à la mort de la cellule par ferroptose.

En somme, le fer joue ici un double jeu : indispensable à la transformation des cellules tumorales primaires en cellules métastatiques, le fer, en trop grande quantité, induit leur autodestruction par ferroptose.

« *En 2020, nous avons découvert une nouvelle voie d'internalisation des métaux dans les cellules par l'intervention d'un récepteur membranaire appelé CD44*, explique le chimiste. *Nous avons démontré que ce récepteur permet d'absorber les métaux présents dans l'environnement direct de la cellule, en particulier le fer et le cuivre. Or on sait que les cellules*

cancéreuses en cours de transformation surexpriment CD44. » Mais quel rôle le fer joue-t-il dans ce mécanisme ? « *Pour devenir métastatique, la cellule cancéreuse primaire doit changer de profil d'expression de ses gènes. Il faut savoir que les cellules de notre organisme n'expriment pas toutes les mêmes gènes. Leur expression est, entre autres, régulée par l'accessibilité de certains gènes aux facteurs de transcription qui définit l'identité et la nature du tissu.* »

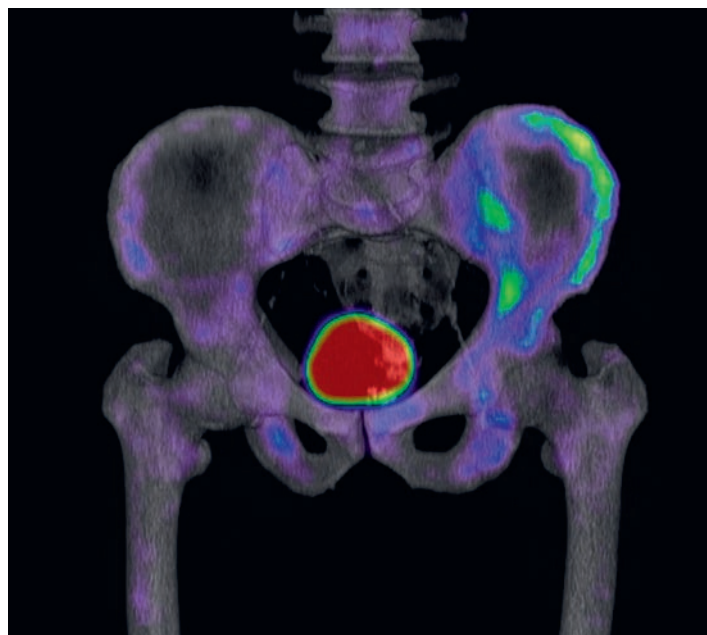
Or le fer permet de catalyser l'accessibilité de certains gènes – et donc leur expression –, notamment de ceux impliqués dans l'acquisition de résistances aux traitements classiques. Les cellules cancéreuses ont donc besoin de fer pour devenir métastatiques. C'est ce phénomène que le scientifique du CNRS cherche à exploiter pour se débarrasser des cellules métastatiques.

... et médiateur de la ferroptose

En effet, lors de leur transformation, les cellules cancéreuses se trouvent sur une ligne de crête. Pour échapper à la mort par ferroptose, elles doivent développer des mécanismes limitant l'apport de fer dans la cellule.

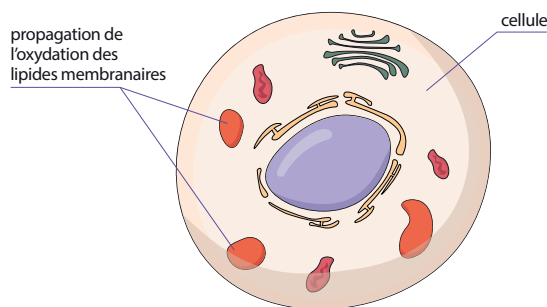
« *Notre objectif est clair : c'est de faire pencher la balance vers la mort plutôt que vers la dissémination. Pour cela, il existe une fenêtre de tir pour exploiter cette abondance de fer, s'enthousiasme Raphaël Rodriguez. Notre idée, c'est*

▲ En rouge, tumeur de la prostate. En bleu et vert, métastases au niveau du bassin.



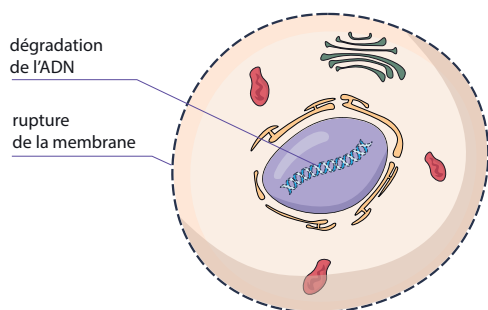
1. Directeur de recherche CNRS au laboratoire Chimie et biologie du cancer (CBC, unité CNRS/Inserm/Institut Curie). 2. [nature.com/articles/s41586-025-08974-4](https://www.nature.com/articles/s41586-025-08974-4)

Ferroptose

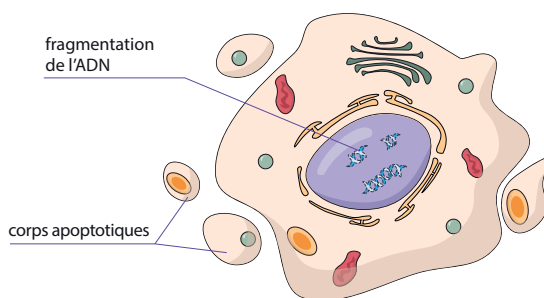


► Les trois grands types de mort cellulaire, dont la ferroptose, une mort cellulaire régulée.

Nécrose



Apoptose



© OLHA POHREBNYAK / SHUTTERSTOCK.COM

« On appuie clairement sur de nouvelles vulnérabilités des cellules cancéreuses. »

de saturer les systèmes de protection de la cellule, en exacerbant la réactivité du fer, afin d'initier la propagation de l'altération des lipides. »

Fort de leurs découvertes antérieures sur l'implication du fer dans la ferroptose, ainsi que de l'identification du compartiment cellulaire au sein duquel le fer intracellulaire se retrouve, les chercheurs ont développé une molécule bifonctionnelle appelée fentomycine-1 (ou Fento-1), « inspirée des dégradeurs de protéines comme le protéasome³ ».

Cette molécule a une particularité : elle possède deux substrats différents. « Une partie de la Fento-1 a une forte affinité pour les membranes lipidiques, notamment la plus importante, celle qui constitue l'enveloppe externe de toutes les cellules animales. Membrane dont on sait qu'elle sera internalisée tôt ou tard, puisque son turnover est de l'ordre de deux heures – c'est-à-dire qu'environ toutes les deux heures,

l'intégralité de la membrane est entièrement renouvelée, révèle Raphaël Rodriguez. La seconde partie de la molécule est un ligand⁴ ayant une forte affinité pour le fer, avec une géométrie et une densité électronique telle qu'elle favorise la chimie du fer. Le tout nous donne une molécule capable d'induire la dégradation des lipides membranaires via la production de radicaux libres de l'oxygène et, à terme, de déclencher la ferroptose. »

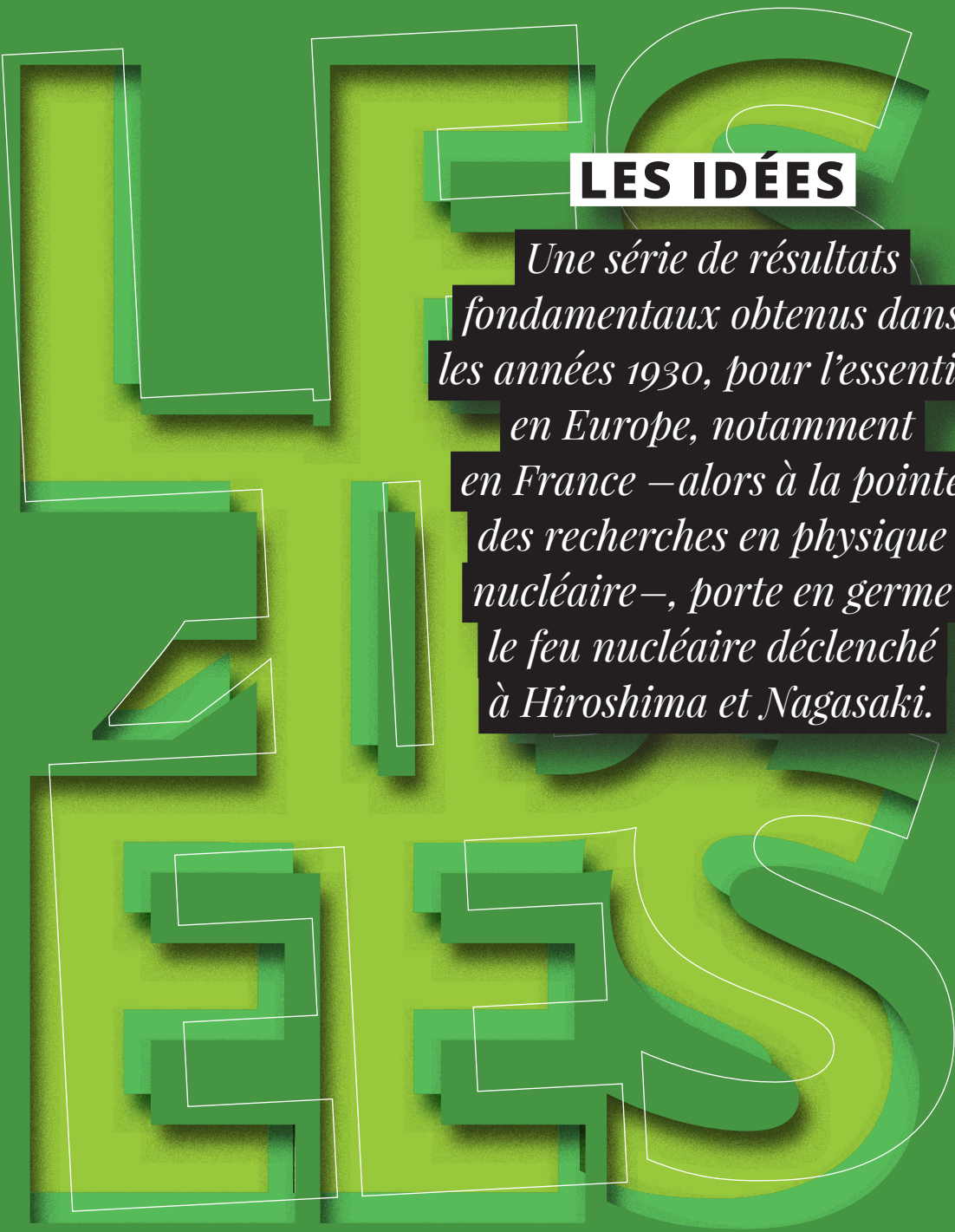
Aussi efficace sur des modèles murins de cancer métastatique que sur des cellules primaires de patients, des organoïdes ou encore des biopsies de tumeurs humaines obtenues juste après chirurgie, la Fento-1 semble très prometteuse dans le traitement des sarcomes et des cancers du pancréas. Plus encore, selon Raphaël Rodriguez, ces résultats sont le fruit d'un changement de paradigme.

« Ce changement, souligne-t-il, ne s'appuie pas sur l'utilisation d'une molécule anticancéreuse ou d'une molécule ayant un mécanisme particulier, mais plutôt sur le fait d'avoir compris que c'est l'état d'une cellule qui lui confère une vulnérabilité particulière et, par conséquent, définit le type de molécules à utiliser pour la combattre. »

Ainsi, à terme, la stratégie serait d'utiliser une combinaison de molécules antimétastatiques et antiprolifératives pour obtenir de meilleures réponses thérapeutiques. « On appuie clairement sur de nouvelles vulnérabilités des cellules cancéreuses, conclut Raphaël Rodriguez. Ce qui nous permet de comprendre d'autant mieux la biologie des cancers, qui mérite évidemment d'être davantage approfondi, avant de possibles applications cliniques. » II

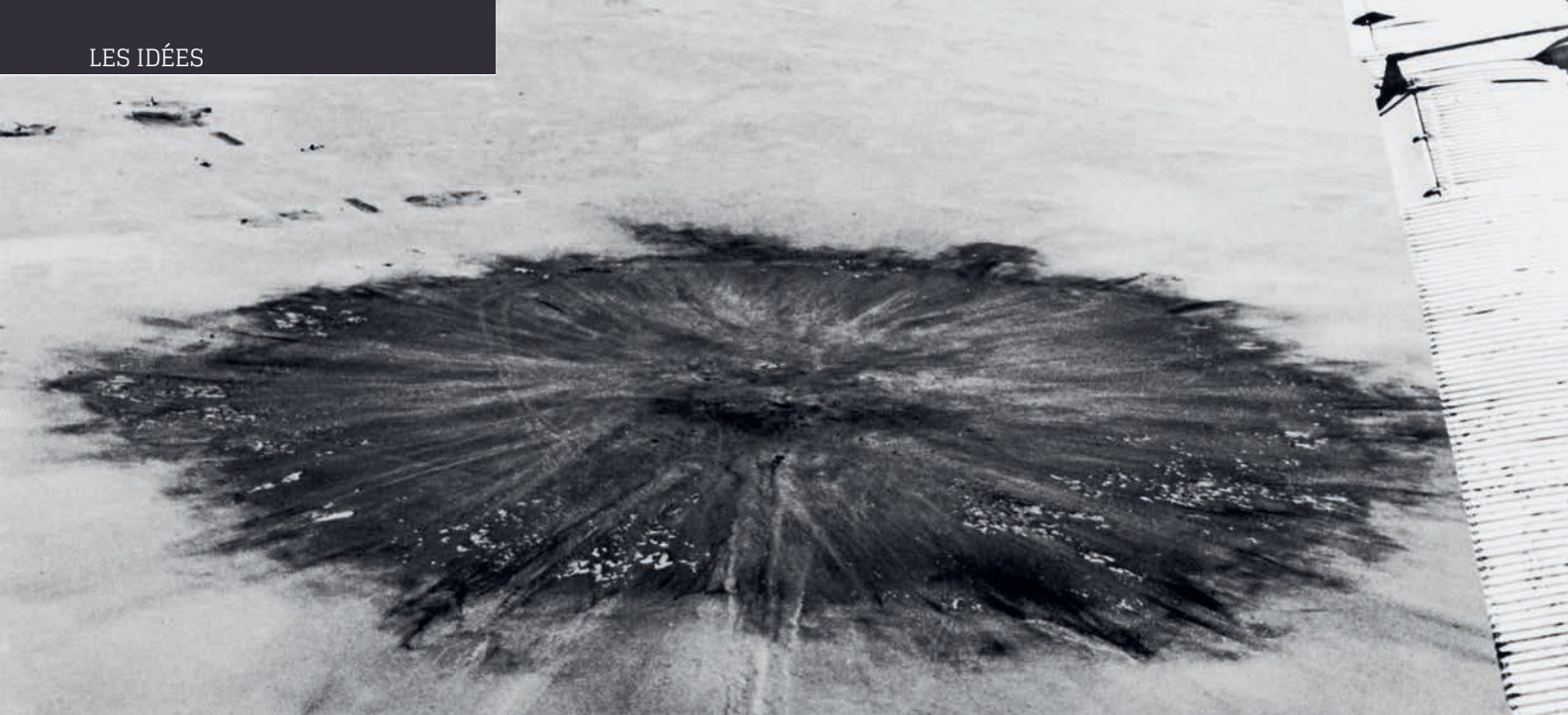
3. Complexe enzymatique multiprotéique présent dans le cytoplasme et impliqué dans la dégradation spécifique des protéines mal repliées, dénaturées ou obsolètes.

4. Molécule pouvant se lier de façon réversible à une cible (protéine, acide aminé...).

The background features large, stylized letters 'LES IDÉES' in a light green color. The letters have a 3D effect with multiple overlapping layers and white outlines, creating a complex, maze-like structure. The text 'LES IDÉES' is positioned in the upper right quadrant of the image.

LES IDÉES

Une série de résultats fondamentaux obtenus dans les années 1930, pour l'essentiel en Europe, notamment en France – alors à la pointe des recherches en physique nucléaire –, porte en germe le feu nucléaire déclenché à Hiroshima et Nagasaki.



Les origines françaises de la bombe atomique

Les 6 et 9 août 1945 : pour toujours, ces deux dates signent dramatiquement l'entrée de l'humanité dans l'ère nucléaire. En une fraction de seconde, deux villes sont rayées de la carte par les bombes états-uniennes conçues dans le cadre du projet Manhattan. Officiellement lancé en août 1942, ce projet scientifique, technique et industriel a mobilisé les plus grands savants des nations alliées, alors en guerre.

Ce que l'on sait moins, c'est qu'il s'est appuyé sur une série de résultats fondamentaux obtenus dans les années 1930, pour l'essentiel en Europe, notamment en France, alors à la pointe des recherches en physique nucléaire. Interrompus en 1940, ces travaux, conduits par le groupe réuni autour de Frédéric et Irène Joliot-Curie, portent en germe le feu nucléaire déclenché à Hiroshima et Nagasaki. Plus prosaïquement, ils ont permis à la France de relancer son programme nucléaire dès 1945. Et, rapidement, de compter dans le club fermé des pays maîtrisant l'atome dans ses dimensions civile et militaire.

Sur le plan fondamental, l'aventure nucléaire débute en Europe au tournant du xx^e siècle. Les travaux d'Henri Becquerel et des Curie sur la radioactivité, entamés dans le sillage d'Albert Einstein, ainsi que la découverte du noyau atomique par l'anglais Ernest Rutherford, aboutissent au développement de la mécanique quantique

SOCIÉTÉS



HISTOIRE Le développement de la bombe et de l'énergie atomiques, souvent associé à la Seconde Guerre mondiale et au projet Manhattan, n'aurait jamais pu advenir sans les travaux réalisés en Europe avant le début du conflit – notamment ceux portés en France par Irène et Frédéric Joliot-Curie.

PAR MATHIEU GROUSSON

par l'Allemand Erwin Schrödinger et le Danois Niels Bohr – sans oublier les Italiens, réunis autour d'Enrico Fermi. Pour ces esprits brillants, parmi lesquels nombre de prix Nobel, il est alors question d'explorer l'intimité de la matière qui, peu à peu, livre ses secrets.

Reste que, symboliquement, on retient 1932 comme origine des travaux ayant conduit à « la bombe ». Car, cette année-là, à Cambridge, James Chadwick découvre le neutron. C'est sur cette particule électriquement neutre, qui entre dans la composition du noyau, que reposera la réaction en chaîne à l'origine de l'énergie nucléaire.

► Cratère vu d'avion de l'épicentre de l'explosion de la première bombe atomique française, dans le désert du Tanérouft, région du Sahara algérien, le 13 février 1960.

Deux ans plus tôt, Walter Bothe et Herbert Becker ont décelé un rayonnement inconnu, qu'ils ont interprété non pas comme une nouvelle particule, mais comme un rayonnement électromagnétique de très haute énergie. À l'instar de leurs collègues allemands, Frédéric et Irène Joliot-Curie observent un signal similaire à l'Institut du radium, à Paris, mais passent de peu à côté de la découverte.

Toujours est-il qu'en 1935, dans son discours de réception du prix Nobel de chimie, décerné conjointement à son épouse pour la découverte de la radioactivité artificielle, Frédéric Joliot-Curie évoque l'énorme libération d'énergie que l'on est en droit d'attendre d'un contrôle de ces transmutations. L'histoire est en marche.

Prolongeant les travaux des Français, Enrico Fermi, à Rome, bombarde systématiquement avec des neutrons tous les éléments de la classification périodique. Parvenu à l'uranium, il pense avoir formé des éléments encore plus lourds. Mais l'interprétation souffre de contradictions. Dans les années qui suivent, à Berlin, Otto Hahn et Lise Meitner complètent ces expériences, de même que, à Paris, Irène Curie et Pavel Savitch.

La fission nucléaire devient réalité

C'est finalement en décembre 1938, grâce à une observation de Hahn et de son assistant Fritz Strassmann, ainsi qu'à l'interprétation de Meitner (d'origine juive et réfugiée en Suède) et de son neveu Otto Frisch, que les physiciens comprennent ce qu'ils voient. Sous l'effet des neutrons, les noyaux d'uranium se brisent, formant des noyaux moyens qui emportent avec eux une énergie considérable. La fission nucléaire est une réalité.

Le 26 janvier 1939, Niels Bohr communique le résultat à New York, lors d'un colloque. La fièvre s'empare du monde de la physique, qui entrevoit dès lors la possibilité d'une réaction en chaîne.

Quelques semaines plus tard, au Collège de France, à Paris, l'équipe de Joliot, avec Hans Halban et Lew Kowarski, montre que chaque fission d'un noyau d'uranium produit bien de nouveaux neutrons – trois, selon les Français – susceptibles de briser de nouveaux noyaux et ainsi de suite. De son côté, Fermi, qui a fui l'Italie fasciste et travaille désormais à New York, penche pour moins que deux. Quoi qu'il en soit, l'idée que la libération de l'énergie colossale contenue au sein des noyaux atomiques est à portée de main fait son chemin.

Cette potentialité, alors que la perspective d'un conflit mondial se profile, commence à inquiéter. Le 2 février 1939, avant même la publication de l'équipe française, Leo Szilard, un physicien hongrois émigré aux États-Unis, s'interroge avec d'autres sur l'opportunité de ne pas publier les résultats les plus sensibles.

À ce moment de l'histoire, il est difficile de savoir quel est précisément le degré de certitude, de crainte ou de prudence des uns et des autres quant à la possibilité de créer une arme destructrice sur la base des connaissances acquises. « *Si la possibilité théorique existe*, avance Delphine Blanchard, doctorante au Centre Alexandre-Koyré-Histoire des sciences et des techniques¹ et au Comité pour l'histoire du CNRS, *il est probable qu'au milieu de l'année 1939, le sentiment d'urgence n'est pas encore si prégnant, tant les défis scientifiques et techniques à relever pour la maîtrise de l'énergie atomique paraissent innombrables, ce que démontrera rétrospectivement l'envergure du projet Manhattan.* »

En 1939, l'équipe de Joliot montre que chaque fission d'un noyau d'uranium produit bien de nouveaux neutrons.

© MUSÉE CURIE (COLL. AGO)



► Frédéric et Irène Joliot-Curie, au début des années 1930, à l'Institut du radium, à Paris.

1. Unité CNRS/EHESS/MNHN.

Il n'empêche, début mai, Halban, Joliot, Francis Perrin et Kowarski déposent trois brevets au nom de la Caisse nationale de la recherche scientifique (qui allait devenir le CNRS, le 19 octobre 1939) : le premier brevet, sur un dispositif de production d'énergie ; le deuxième, sur sa régulation ; le troisième, sur la charge explosive envisageable avec des matériaux fissibles.

« Joliot a été formé à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles, commente l'historien Denis Guthleben², directeur délégué au Comité pour l'histoire du CNRS. C'est un chercheur en science fondamentale, mais il a également pleinement conscience de l'importance des questions de propriété intellectuelle et de la nécessité des liens entre les laboratoires et l'industrie, sans lesquels les applications d'une découverte sont impossibles. »

Cela dit, un brevet n'est pas un mode d'emploi. Avant même de penser à une bombe, la première étape à franchir est l'entretien d'une réaction en chaîne. Or les mesures effectuées à Paris comme ailleurs courant 1939 montrent

que les neutrons émis lors de la fission d'un noyau d'uranium sont trop rapides pour provoquer suffisamment d'autres réactions. En un mot, il faut les ralentir. Du reste, Bohr comprend que seul l'isotope 235 de l'uranium, ultra minoritaire dans le minerai d'uranium, est fissible. Autrement dit, il sera nécessaire de l'enrichir, si tant est que l'on souhaite développer la voie militaire.

Provoquer de nouvelles fissions pour entretenir la réaction

Pour ralentir les neutrons dans un réacteur, l'idée est la suivante : une fois émis, les neutrons sortent aisément de l'oxyde d'uranium, traversent un matériau dit « modérateur », où ils seront ralentis afin de pouvoir provoquer de nouvelles fissions au sein du combustible et entretenir la réaction. L'empilement de matériaux fissibles et modérateurs dans des proportions et avec la géométrie adéquates permettrait ainsi de construire une pile nucléaire.

À l'été 1939, l'équipe française prend ses quartiers au Laboratoire de synthèse atomique, à Ivry, plus spacieux que les locaux du Collège de France. Là, Joliot et ses

▲ *Little Boy* (« petit garçon »), nom de code de la bombe A larguée du bombardier *Enola Gay* sur la ville japonaise d'Hiroshima, le 6 août 1945.



2. Archives de l'Institut du radium Pierre et Marie Curie, Frédéric et Irène Joliot (Musée Curie, unité CNRS/Institut Curie).

▲ En décembre 1942, le premier réacteur nucléaire à contrôler la puissance de l'atome voit le jour, notamment grâce à Enrico Fermi et à son équipe.

collègues construisent différentes sphères de cuivre, dans lesquelles un mélange d'oxyde d'uranium et d'eau donne lieu à un début de réaction en chaîne.

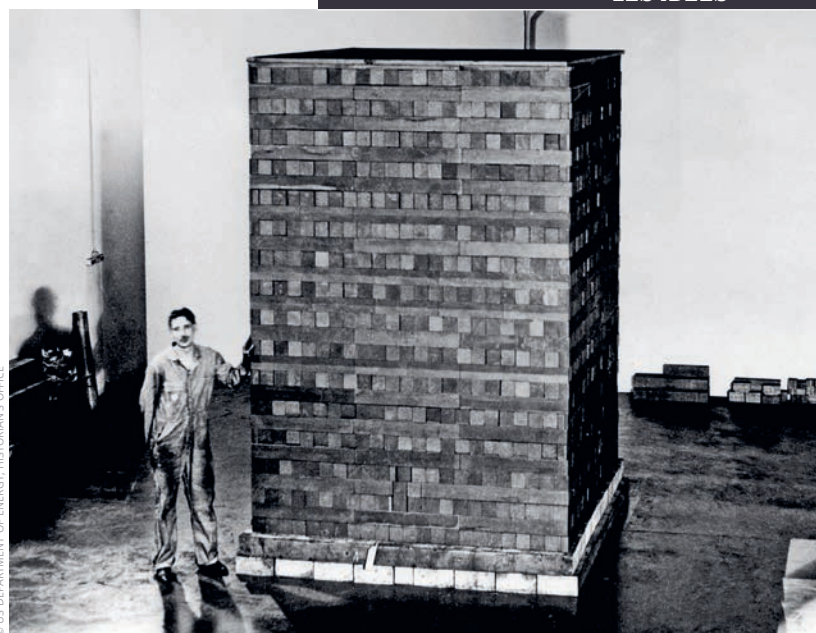
En parallèle de ces questions purement scientifiques, en ces mois qui coïncident avec le début des hostilités, se joue l'aspect le plus romanesque de cette aventure, celui de l'approvisionnement en matériaux. Pour constituer une pile nucléaire, il faut d'importantes quantités d'oxyde d'uranium. Aussi, en mars, Joliot contacte l'Union minière du Haut-Katanga, à Bruxelles, propriétaire des plus importants gisements d'uranium connus à l'époque, au Congo belge (aujourd'hui, en République démocratique du Congo). Les liens entre la société belge et les chercheurs nucléaires français remontent à Marie Curie, et l'équipe parisienne fait rapidement l'acquisition de plusieurs tonnes de minerai.

La question du modérateur est encore plus cruciale. On compte sur les doigts d'une main les éléments possibles pour cette application. Sur le papier, l'eau est un candidat, mais elle se révèle absorber trop fortement les neutrons. Le graphite figure également sur la liste. Mais les expériences réalisées notamment par Kowarski, entre fin 1939 et début 1940, à l'usine d'électrochimie et d'électrometallurgie de Jarrie (Isère), ne sont pas probantes. La faute aux impuretés... Ce que comprendront bientôt Fermi et Szilard, qui utiliseront du graphite ultra pur pour la réalisation du premier réacteur états-unien qui divergera (moment où la réaction en chaîne de fission commence), en décembre 1942.

Dernière possibilité : l'eau lourde, un composé où le deutérium, isotope rare de l'hydrogène, remplace ce dernier et peut jouer le rôle de modérateur. Ce dont l'équipe de Joliot, mobilisée dans son laboratoire depuis le début de la guerre, se rend compte fin 1939.

Une opération secrète en Norvège

Si l'eau lourde est encore moins absorbante que le graphite, elle offre, en revanche, une probabilité de diffusion (donc de ralentissement) des neutrons proche de celui-ci. Il en faut donc d'importantes quantités pour qu'elle joue son rôle. Or, à la veille de la guerre, seule



© US DEPARTMENT OF ENERGY, HISTORIANS' OFFICE

une usine électrochimique appartenant à la société Norsk Hydro, en Norvège, produit des quantités substantielles d'eau lourde pour des applications confidentielles.

En pleine « drôle de guerre », Raoul Dautry, ministre de l'Armement, comprend le caractère stratégique de ces réserves – d'autant plus que l'Allemagne nazie entend également faire main basse sur le précieux liquide. Une mission digne d'un film d'espionnage est montée à la hâte, qui voit l'officier Jacques Allier se rendre à Oslo sous un nom d'emprunt afin d'obtenir du directeur de Norsk Hydro que la France fasse l'acquisition de ce qui représente alors le stock mondial d'eau lourde. 167 litres répartis dans 26 bidons sont transportés jusqu'au Collège de France par avion via l'Écosse, en même temps qu'un autre avion leurre les espions allemands.

La crainte d'une bombe nazie

L'usine de la Norsk Hydro est si importante que, après l'invasion de la Norvège par les nazis, le 9 avril 1940, un commando allié la sabotera en février 1943. Et, un an plus tard, un ferry transportant un chargement d'eau lourde à destination de l'Allemagne sera coulé sur le lac Tinnsjø par des résistants norvégiens, provoquant la mort de 14 civils.

Ces actions reflètent les craintes des Alliés durant la guerre quant à la progression du programme nucléaire allemand mené par Werner Heisenberg, un autre père fondateur de la mécanique quantique et prix Nobel de physique en 1933. En 1945, il s'avérera que les nazis étaient loin de disposer d'une bombe atomique.

Mais, comme le signale Denis Guthleben, « c'est rétrospectif. Les découvreurs de la fission avant-guerre étaient allemands et, jusqu'à la fin du conflit, le III^e Reich avait montré ses capacités scientifiques et techniques, avec notamment le développement des missiles V1 et, surtout, des V2. Le risque semblait donc réel. »

En revanche, une chose est sûre : après la capitulation de juin 1940, les recherches nucléaires sont stoppées net en France. En pleine débâcle, Joliot, Halban et Kowarski

En pleine « drôle de guerre », une mission digne d'un film d'espionnage est montée à la hâte.



© US NATIONAL ARCHIVES (ID 623446)

▼ Champignon atomique après l'explosion Baker, dans le cadre de l'opération Crossroads de l'armée des États-Unis, sur l'atoll de Bikini, en Micronésie, le 25 juillet 1946. Cette opération marque l'aboutissement et la fin du projet Manhattan, avant sa dissolution.

partent pour Bordeaux. Les réserves d'oxyde d'uranium sont cachées dans différents endroits, notamment des wagons de la SNCF stationnés sur des voies de garage. Quant à l'eau lourde, elle est embarquée sur un navire anglais et rejoint Londres avec Halban et Kowarski.

Frédéric Joliot, lui, demeure en France durant toute la guerre, s'engageant dans la résistance et participant à la libération de Paris. Mais ses deux collègues poursuivent leurs travaux sur les réactions en chaîne au sein d'un réacteur, d'abord à Cambridge, puis au Canada, où l'effort nucléaire britannique prend place à partir de 1942, au départ sous la direction de Halban.

La relance fulgurante du programme nucléaire français

Avec le programme Manhattan menant la danse, il ne fait aucun doute que la physique nucléaire est désormais une science nord-américaine. Il n'empêche : sans la guerre, le premier réacteur nucléaire aurait pu être français. Il ne s'agit pas ici de tomber dans l'histoire-fiction, mais de souligner que la relance fulgurante du programme nucléaire français, au sortir de cinq années d'Occupation et de destructions sans précédent, ne doit rien au hasard.

« S'il adopte ensuite une posture en faveur du seul nucléaire civil, dans les dernières heures de la guerre, Joliot promet à de Gaulle que la France aura sa bombe », rappelle Denis Guthleben. Bref, le nucléaire français doit tout autant à une compétence scientifique préservée, malgré la pause forcée entre 1940 et 1945, qu'à une volonté politique farouche. Ainsi, le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) est créé dès le 18 octobre 1945 afin de coordonner et de développer la recherche nucléaire pour des applications

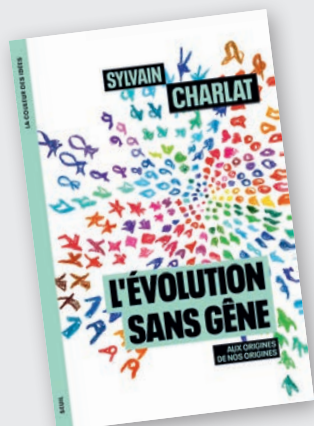
civiles et militaires – « un monstre institutionnel qui a formidablement bien marché », plaisante l'historien. Frédéric Joliot en est nommé haut-commissaire, vite rejoint par Lew Kowarski, mais aussi par Pierre Auger, Bertrand Goldschmidt, Jules Guéron ou encore Francis Perrin, qui tous ont participé au programme nucléaire anglo-canadien pendant la guerre.

« Ces physiciens, rappelle Denis Guthleben, ont donné des cauchemars au général Groves, en charge du projet Manhattan, de peur qu'ils transmettent à la France des secrets jalousement gardés par les États-Unis. »

De plus, dès 1945, diverses missions scientifiques, organisées notamment par le CNRS, visent à rassembler et à exploiter les connaissances et savoir-faire développés en Allemagne depuis les années 1930. Cette mobilisation scientifique permettra à la première pile nucléaire française de diverger dès 1948 – « un an après le premier réacteur britannique, c'est remarquable », souligne Delphine Blanchard.

La suite, c'est le programme électronucléaire qui fait aujourd'hui de la France le troisième producteur d'énergie nucléaire dans le monde. À quoi s'ajoute son pendant militaire – avec le premier essai nucléaire, en Algérie, dans le désert du Sahara, en 1960. Un héritage issu d'une tradition scientifique centenaire qui, quatre-vingts ans après le largage des deux bombes états-uniennes sur le Japon et dans le contexte géopolitique actuel, continue de placer la France dans une position singulière vis-à-vis de l'atome. II

À lire

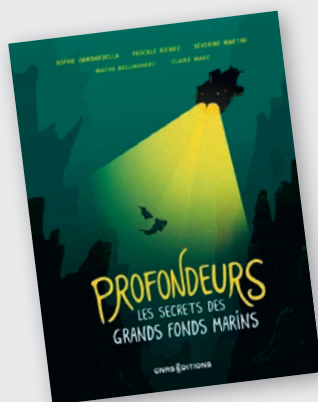


Génétique

Édictée par Darwin en 1859, la théorie de l'évolution semble parfaitement décrire la façon dont les organismes évoluent selon leur environnement. Mais a-t-elle été toujours valable ?

Quid des premières entités « vivantes » ? Comment sont-elles apparues ? Selon Sylvain Charlat, « l'évolution première n'a pu émerger sous la forme que nous lui connaissons, reposant sur une hérédité déjà génétique. Il faut donc envisager la possibilité [...] d'une formulation plus générale du principe de sélection naturelle : un pont à bâtir entre la physique et la biologie [...] »

L'Évolution sans gène
– Aux origines de nos origines
Sylvain Charlat, Seuil,
208 p., 22 €, mars 2025



Grands fonds

Les grands fonds marins, situés en deçà de 200 m sous la surface, couvrent plus des deux tiers de la surface terrestre, mais restent méconnus – alors qu'ils foisonnent de vie et représentent l'un des principaux puits de carbone de notre planète. Fruit de la collaboration entre scientifiques de diverses disciplines (biologistes, océanographes, juristes, anthropologues...), cette BD a été pensée afin que les lecteurs et

lectrices saisissent mieux les enjeux environnementaux, sociaux et économiques de ces vastes étendues vallonnées, volcaniques, et parfois même lardées de crevasses profondes de plusieurs kilomètres.

Profondeurs – Les Secrets des grands fonds marins
Sous la direction de Sophie Gambardella, Pascale Ricard et Séverine Martini,
CNRS Éditions, 72 p., 16 €, mars 2025



Interview
des auteurs

Géographie

Dans *Geographia*, l'historienne Emmanuelle Vagnon et le dessinateur et géographe Jean Leveugle retracent en BD l'histoire de la cartographie, de l'Antiquité à nos jours. En faisant

revivre Ptolémée, fondateur de la cartographie moderne, ils nous invitent à une épopée fantastique dans l'espace et le temps, en mêlant humour et science.

Geographia – L'Odyssée cartographique de Ptolémée
Jean Leveugle, avec Emmanuelle Vagnon, Futuropolis-BNF Éditions, 160 p., 23 €, novembre 2024



L'IA

Que ce soit dans le milieu médical ou scolaire, dans l'ingénierie, pour coder, ou même dans le but d'illustrer, l'intelligence artificielle prend de plus en plus de place et, à en croire certains, devient indispensable, voire essentielle. Mais l'IA a aussi sa part d'ombre, et c'est dans le but de la dissiper que deux scientifiques du CNRS ont souhaité partager leurs connaissances et répondre à des questions simples que nous nous posons : quelles sont les méthodes utilisées et les ressources nécessaires pour faire fonctionner l'IA ? Quelles sont ses utilisations ? Et quelles sont ses limites ?

Tout comprendre (ou presque) sur l'intelligence artificielle
Olivier Cappé et Claire Marc,
CNRS Éditions, 136 p., 19 €, avril 2025



Cosmologie Amateurs et amatrices d'histoires de galaxies, de matière noire ou encore du fond diffus cosmologique, voilà un livre à ne pas manquer. À grand renfort de graphiques et de photos, Françoise Combes, médaille d'or 2020 du CNRS, retrace l'histoire de la cosmologie, qui commence il y a plusieurs millénaires. Elle explique comment les scientifiques ont peu à peu saisi que la Terre n'est pas le centre de l'Univers, puis que l'Univers compte bien plus de galaxies que la seule Voie lactée, pour enfin comprendre que tout a commencé par un Big Bang.

Petite Histoire de la cosmologie
Françoise Combes, CNRS Éditions, coll. Biblis Inédit, 300 p., 11 €, mai 2025



Portrait
de l'autrice



de Denis Guthleben,
historien au CNRS

CNRS Terre et Univers: 40 bougies!

“ 13 février 1985. Un décret établit l'« Institut national des sciences de l'Univers du Centre national de la recherche scientifique ». L'initiative n'est pas seulement ambitieuse – elle est aussi inédite. En vain scruterait-on le paysage de la recherche en France et à l'international pour dénicher une autre institution dont les objets d'étude s'étendent du centre de la Terre aux confins de ces espaces infinis dont le silence effrayait Pascal. Mais, au CNRS, on n'a peur de rien... même s'il a fallu déployer quelques efforts pour en arriver là !

L'Univers avant l'Univers

Tel Monsieur Jourdain avec la prose, le CNRS a commencé à explorer les sciences de l'Univers bien avant de leur offrir une structure éponyme. Il suffit de rappeler que, parmi ses premiers laboratoires, figuraient l'Institut d'astrophysique de Paris et l'Observatoire de Haute-Provence (OHP), qui traversent son histoire jusqu'à nos jours avec des résultats fameux – c'est à l'OHP, par exemple, qu'a été détectée la première exoplanète.

Dès l'origine également, le CNRS a ouvert grand sa porte à la géologie ainsi qu'aux études atmosphériques. Avec l'Université, il a aussi stimulé un renouveau de l'océanographie française au tournant des années 1950 et 1960 – renouveau que celles et ceux qui s'acharnent à opposer les deux institutions devraient regarder de près pour voir à quel point leur association fait merveille.

*« Une alchimie se produit,
qui soude des communautés
autour d'un enjeu crucial. »*

Au même moment, l'année géophysique internationale, qui réunit 67 pays du Nord comme du Sud et de l'Est comme de l'Ouest, révèle le besoin de créer une organisation charpentée pour participer à de telles opérations et gérer la construction et l'exploitation des instruments qu'elles mobilisent. Un Institut national d'astronomie et de géophysique (Inag) voit ainsi le jour en 1967 pour « développer et coordonner les recherches en astronomie et en géophysique menées par les organismes français ». Sa première réalisation,

en partenariat avec le Canada et l'université de Hawaï, est un télescope implanté dans les années 1970 au sommet du Mauna Kea, un volcan endormi du Pacifique, où le savoir-faire des équipes françaises a été salué par la communauté scientifique internationale.

Et enfin, l'Insu !

L'opportunité d'étendre cette initiative à tous les champs d'exploration du système Terre est examinée à partir de 1981. Jean-Pierre Chevènement, ministre de la Recherche, demande à Hubert Curien, ancien directeur général du CNRS et président du Centre national d'études spatiales, de définir les contours d'un institut national formant le bras armé du département TOAE (pour « Terre, océan, atmosphère et espace ») que le CNRS vient d'inaugurer.

Plusieurs pistes sont explorées, à commencer par la fusion dans un même creuset des sciences de l'Univers et de la physique nucléaire et corpusculaire, qui dispose depuis 1971 de l'IN2P3... Un regroupement qui fait débat et conduit le ministère à temporiser, selon une note interne du 2 décembre 1982, en des termes dont il a le secret : « Il convient sans doute d'adopter une position d'attente ouvrant la possibilité d'une évolution non figée ».

Comme toute évolution qui se respecte, celle-ci est en effet tout sauf figée ! Elle passe par des mois de négociations. Avec les géologues, d'abord – dont l'intégration de « l'énorme communauté » est vue comme un enjeu de taille par le directeur de l'Inag, Michel Petit. Puis, avec les océanographes, qui privilégiaient au préalable l'option d'un institut national centré sur leurs propres recherches (un Inro), avant de s'accorder sur les bénéfices d'une association élargie... qui finit par prévaloir après l'arrivée d'Hubert Curien à la tête du ministère de la Recherche, en juillet 1984.

Et, si les discussions ont été animées jusqu'alors, une alchimie se produit bel et bien, qui soude des communautés aux objets, aux pratiques et aux mentalités diverses, autour d'un enjeu crucial : comprendre, grâce à la coordination des communautés autour des grands instruments nécessaires, ce firmament vers lequel nos regards sont tournés aussi bien que cette bonne vieille planète à laquelle nos pieds sont rivés, en se frottant à des défis majeurs tels que la découverte de nos origines ou la compréhension d'un changement climatique qui commençait déjà à être décelé. Quarante ans plus tard, ces défis n'ont rien perdu de leur acuité, et l'éclairage que peut apporter la science apparaît plus crucial que jamais. II



FONDATION

cnrs

Donnons à la recherche
les moyens de ses ambitions.

SOUTENEZ-NOUS

Site web : fondation-cnrs.org

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

CONTACTS

Téléphone : 01 44 96 44 49

E-mail : contact@fondation-cnrs.org

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS

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



Entrez dans
les coulisses
de la recherche



CNRS ÉDITIONS

www.carnetsdescience-larevue.fr