



**DÉPRESSION**  
Les nouvelles  
pistes de la  
recherche

**À l'assaut**  
des grandes  
conjectures  
mathématiques

**Patrick Michel,**  
l'homme qui  
voulait dévier  
les astéroïdes

**Au large de  
la Guyane,**  
l'étonnant récif  
de l'Amazone



# Cahiers français

Comprendre l'économie et décrypter la société

Tous les 2 mois, un dossier **complet** sur un sujet de **société** ou d'**économie** pour **8€ seulement**

- #Articles
- #Dossiers
- #Fiches pédagogiques
- #Infographies

Ouvrages disponibles en librairie et sur [www.vie-publique.fr](http://www.vie-publique.fr)

La documentation Française

## LES GRANDES VOIX DE LA RECHERCHE

Les médailles d'or du CNRS explorent tous les domaines de la connaissance et présentent de manière claire et synthétique les grands défis de la science



CNRS EDITIONS

Retrouvez-nous sur [f](https://www.facebook.com/cnrseditions) [t](https://www.twitter.com/cnrseditions) [i](https://www.instagram.com/cnrseditions) et sur [www.cnrseditions.fr](http://www.cnrseditions.fr)

**Rédaction :**  
3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16  
**Téléphone :** 01 44 96 40 00  
**E-mail :** lejournald@cnrs.fr  
**Le site Internet :** <https://lejournald.cnrs.fr>  
**Anciens numéros :**  
<https://lejournald.cnrs.fr/numeros-papiers>

**Directeur de la publication :**

Antoine Petit

**Directrice de la rédaction :**

Brigitte Perucca

**Directeur adjoint de la rédaction :**

Fabrice Impériali

**Rédacteur en chef :**

Matthieu Ravaut

**Rédactrice en chef adjointe :**

Charline Zeitoun

**Chefs de rubrique :**

Laure Cailloce, Yaroslav Pigenet

**Rédactrices :**

Laurence Stenvot, Sophie Félix

**Assistante de la rédaction**

et fabrication :

Laurence Winter

**Ont participé à ce numéro :**

Anne-Sophie Boutaud, Anais Culot,  
Grégory Fléchet, Denis Guthleben,  
Sandrine Hagège, Martin Koppe, Francis Lecompte,  
Louise Mussat, Vahé Ter Minassian

**Secrétaire de rédaction :**

Émilie Silvoz

**Conception graphique :**

Vincent Guyon

**Iconographies :**

Anne-Emmanuelle Héry, Marie Mabrouk

**Illustrations :**

Marie-Anne Bezon, Alice Des

**Impression :**

Groupe Morault, Imprimerie de Compiègne  
2, avenue Berthelot – Zac de Mercières  
BP 60524 – 60205 Compiègne Cedex  
ISSN 2261-6446

Dépôt légal : à parution



Photos CNRS disponibles à : [phototheque@cnrs.fr](mailto:phototheque@cnrs.fr) ;  
<http://phototheque.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 :**

ILLUSTRATION : MARIE-ANNE BEZON

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

Abonnez-vous gratuitement sur :  
» [lejournald.cnrs.fr/abojournal](https://lejournald.cnrs.fr/abojournal)

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



# 2

Une chercheuse en mathématiques travaille dans un train, elle aura de fortes chances d'entendre son voisin lui expliquer la perception qu'il avait des mathématiques au lycée... Pourquoi tant d'abstraction, ne sommes-nous pas à l'âge du concret ? C'est que, lui répondra-t-elle peut-être, l'abstraction offre une appréhension globale du concret.

Ainsi, le nombre 0 est un objet familier pour nous, mais il a fallu des siècles pour que le concept devienne indispensable. Les idées mathématiques peuvent mettre énormément de temps à émerger, partir de questions concrètes, arriver à des applications concrètes, parfois inattendues, en faisant de longs détours par des sommets d'abstraction (comme les conjectures décrites dans ce numéro de

*“La recherche  
mathématique en  
France est au premier  
plan international.  
Mais le recrutement  
d'enseignants-chercheurs  
décroît dangereusement.”*

*CNRS Le journal*) qu'il est aisé de rejeter comme inutiles. Ces détours permettent de saisir la quintessence d'un problème ! Ils font des mathématiques une science à la fois vivante et non programmable, science qu'il faut pétrir puis laisser reposer pour que d'autres s'en saisissent. Vos téléphones, votre GPS, sans parler d'Internet, sont des fruits de ce processus, dans lequel nos mathématiciennes et mathématiciens s'illustrent depuis toujours.

La recherche mathématique en France, organisée dans les laboratoires adossés aux départements d'enseignement universitaires, est en effet au premier plan international sur tous les sujets. Cependant, le

recrutement d'enseignantes-chercheuses et enseignants-chercheurs en mathématiques – qui constituent la plus grande part des forces en recherche – à l'Université et dans les écoles, décroît dangereusement depuis une dizaine d'années : plus d'un poste sur deux en moins. Cela va engendrer un trou générationnel de jeunes talents. La diversité insuffisante des profils de recherche affichés est inquiétante. L'influence française en mathématiques peut décliner très vite si ces tendances ne sont pas rectifiées.

Ceci serait paradoxal quand d'importants efforts, auxquels les laboratoires de recherche et départements universitaires participent de multiples façons à travers la formation initiale et continue des enseignantes et enseignants et la médiation scientifique, sont faits pour régénérer l'enseignement des mathématiques.

*Pascal Auscher,*  
directeur de l'Institut national des sciences  
mathématiques et de leurs interactions (Insmi)



© CNRS-PMA



## GRAND FORMAT

13

Nouveaux regards sur la dépression .....	14
Vis ma vie de chevalier du XVI <sup>e</sup> siècle .....	26
À l'assaut des grandes conjectures mathématiques .....	32



Patrick Michel,  
l'homme qui voulait  
dévier les astéroïdes

6

## EN PERSONNE 5

Signature du Contrat d'objectifs et de performance .....	9
Carole Chrétien : « développer de nouveaux liens avec les entreprises » .....	10
Actualités .....	12



L'étonnant récif  
de l'Amazone

42

## EN ACTION 37

Cheops, le profileur d'exoplanètes .....	38
À la recherche des musées de demain .....	40
L'Internet des objets grappille de l'énergie .....	44
SideROS croise le fer contre le cancer .....	45
Peut-on voir dans le noir ? .....	46
Depuis quand parlons-nous ? .....	48
Les experts du CNRS .....	49
Le génome des Papous, mémoire de l'humanité .....	50



150 ans de Suez :  
l'histoire d'un  
canal très disputé

54

## LES IDÉES 53

Profession <i>conlanger</i> , créer des langues pour la science-fiction .....	58
« <i>Innovater, c'est aussi chercher à améliorer nos conditions de vie</i> » .....	60
La ménopause est-elle une construction sociale ? .....	62

## CARNET DE BORD

Hervé Fritz nous raconte un souvenir de recherche ..... 64

## LA CHRONIQUE

Lumière sur Becquerel ..... 66



# EN PERSONNE

*Un chercheur à l'assaut des astéroïdes,  
une experte qui rapproche laboratoires  
et entreprises, et des scientifiques  
très européens.*

ILLUSTRATION : ALICE DES WWW.ALICEDES.COM POUR CNRS LE JOURNAL



# Patrick Michel, l'homme qui voulait dévier les astéroïdes

PROPOS RECUEILLIS PAR GRÉGORIE FLÉCHET

UNIVERS

**Astrophysique.** Patrick Michel, astrophysicien internationalement reconnu, vient de prendre les commandes de la mission spatiale Hera, qui analysera les effets de la collision de l'impacteur Dart, tout premier test de déviation d'un astéroïde.



**En novembre dernier, le conseil ministériel de l'Agence spatiale européenne (ESA) a donné son feu vert au lancement de la mission Hera, dont vous êtes le coordinateur scientifique. Pouvez-vous retracer l'historique de ce projet de recherche européen maintes fois reporté ?**

**Patrick Michel :** L'idée d'un tel projet a germé en 2004 lorsque l'ESA a sollicité un groupe de six scientifiques, dont je faisais partie, pour établir un panel de missions destinées à prendre en considération le risque d'impact d'astéroïdes. Parmi les six propositions envisagées, une de ces missions, initialement intitulée Don Quijote, proposait un test de déviation d'astéroïde. Faute de financement, elle a été mise de côté pendant plusieurs années avant de renaître sous la forme d'une collaboration entre la Nasa et l'ESA, rebaptisée Aida. Bien qu'en 2016 le volet européen du projet n'ait pu obtenir le budget nécessaire, il a toutefois été salué par la communauté internationale s'intéressant aux petits corps et à la défense planétaire. Nous avons donc refait une étude permettant d'optimiser le projet, rebaptisé Hera, avant de le soumettre à nouveau au conseil ministériel de l'ESA, en 2019, avec succès. Il aura donc fallu se battre quinze ans pour que cette mission spatiale se concrétise enfin.

**Alors qu'Aida est désormais confirmé dans sa totalité, quel est l'objectif principal de ce programme de recherche international ?**

**P.M. :** Dans sa configuration actuelle, le projet Aida associe l'impacteur Dart, conçu par les Américains et l'orbiteur Hera, chargé de mesurer la déviation de l'astéroïde à

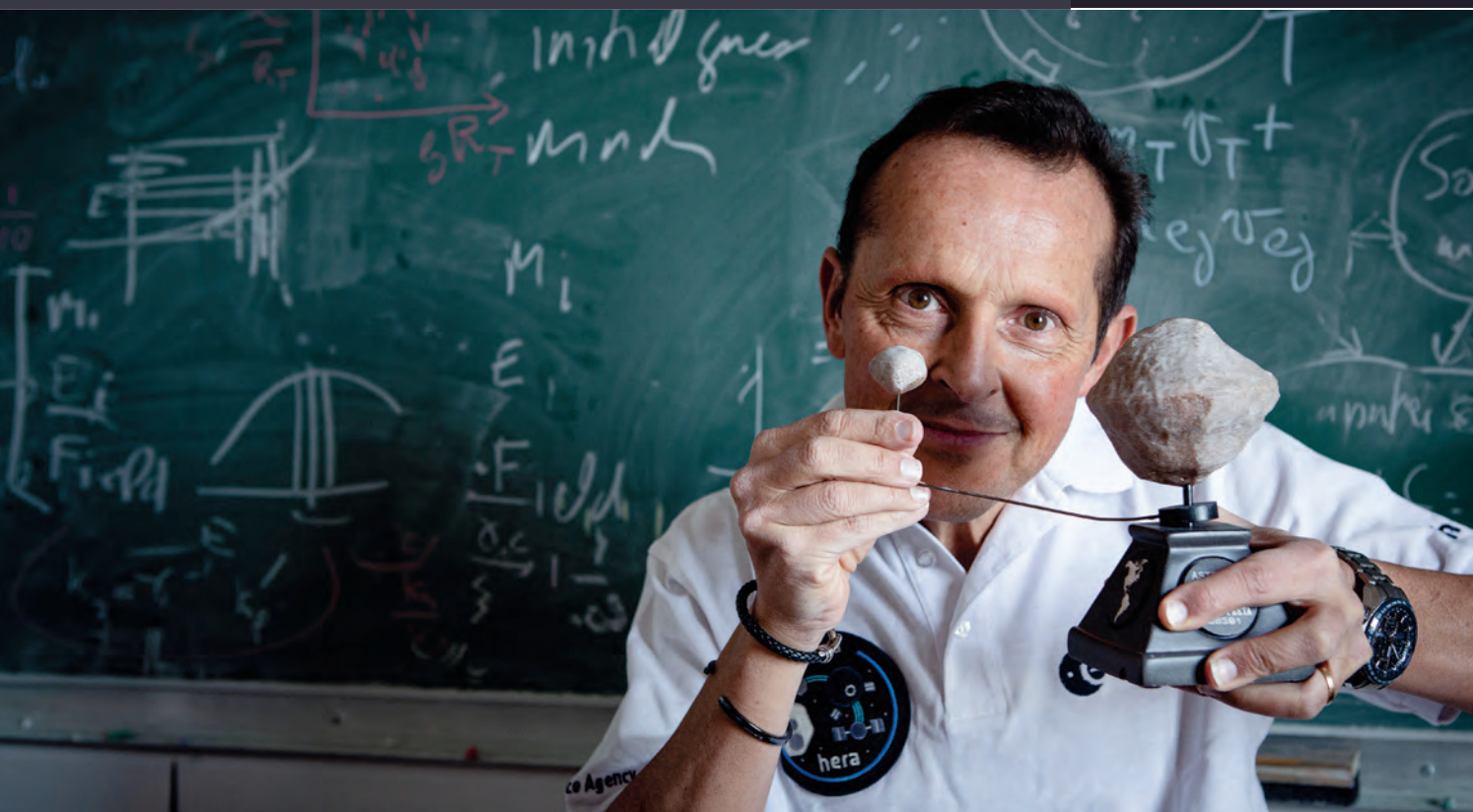
l'issue de l'impact. La mission va se focaliser sur l'astéroïde double Didymos, qui se compose d'un astéroïde principal autour duquel orbite un objet plus petit qui sera la cible de Dart. Didymos va passer relativement près de la Terre au moment de l'impact ce qui offre la possibilité de mesurer, à partir d'observatoires terrestres, le changement de période orbitale de la petite lune autour de l'astéroïde principal. Bien que l'objectif du test Dart/Hera soit centré sur les stratégies de défense planétaire, les données collectées nourriront également la communauté scientifique.

Le satellite américain quittera la Californie en juillet 2021 et atteindra Didymos en octobre 2022. Avant que Dart frappe le plus petit astéroïde, la mission déploiera le CubeSat Licia. Ce mini-satellite développé par l'Agence spatiale italienne permettra de visualiser les premières secondes de l'impact. Il ne pourra toutefois pas observer la formation du cratère en raison du nuage de poussière généré par la collision. Au même moment, une campagne d'observation internationale menée depuis la Terre à l'aide de radars et de télescopes optiques mesurera la variation de période orbitale de la lune de Didymos provoquée par la collision. Hera décollera à son tour de Guyane en 2024 pour atteindre l'astéroïde en janvier 2027. La sonde analysera alors en détail les conséquences de l'impact.

## Ses dates clés

- 1970** Naissance à Saint-Tropez
- 1997** Doctorat en sciences physiques à l'Université de Nice Sophia-Antipolis
- 1999** Recruté au CNRS au laboratoire Cassini (Unité CNRS/OCA)
- 2006** Prix jeune chercheur de la Société française d'astronomie et d'astrophysique (SF2A)
- 2012** Médaille Carl-Sagan du Département des sciences planétaires de l'Union américaine d'astronomie
- 2015-** Président du Groupe de travail Géocroiseurs de l'Union astronomique internationale
- 2019-** Responsable scientifique de la mission spatiale Hera (ESA)





© FRÉDÉRIQUE PLUS

**Vous vous intéressez plus particulièrement à l'origine des géocroiseurs. Quelles furent vos contributions scientifiques dans ce domaine ?**

**P.M. :** Mes travaux ont contribué à démontrer que la plupart de ces objets, dont la taille est inférieure à quelques dizaines de kilomètres, résultent de l'agrégation de fragments issus de collisions entre les astéroïdes de la ceinture principale, située entre les orbites de Mars et Jupiter<sup>2</sup>. Ces agrégats de roches évoluent parfois dans des zones instables qui les font passer d'une trajectoire circulaire à une trajectoire plus allongée où ils sont susceptibles de croiser la Terre. En analysant les cratères d'impacts présents sur la Lune et des modèles théoriques de population de géocroiseurs, élaborés notamment au sein de notre laboratoire, nous avons pu estimer qu'il existait environ un millier de géocroiseurs d'un diamètre supérieur à 1 kilomètre, 90 % de ces objets étant déjà répertoriés, ce qui était l'objectif donné à la Nasa par le Congrès américain en 1998. Une étude publiée en début d'année dans la revue *Icarus*<sup>3</sup> dresse désormais une cartographie quasi complète de ces objets.

**Comment en est-on venu à prendre conscience que la chute de corps célestes pouvait constituer un danger pour la vie sur Terre ?**

**P.M. :** Jusqu'à la fin des années 1960 et les premières missions d'exploration lunaire du programme Apollo, la communauté scientifique était convaincue que les cratères visibles à la surface de notre satellite étaient d'origine volcanique. L'analyse des échantillons collectés dans le

cadre d'Apollo révéla finalement qu'ils étaient la conséquence d'impacts de météorites. L'un des tout premiers actes politiques prenant en compte le risque associé à la chute d'un astéroïde est une résolution européenne votée en 1996. Celle-ci découle de l'impact de la comète Shoemaker-Levy sur Jupiter en juillet 1994, le premier du genre dont l'humanité fut directement témoin. À Turin, en 1999, la communauté des experts des petits corps a ensuite créé l'échelle du risque de Turin, afin de fournir

► Patrick Michel, ici dans son laboratoire à Nice, nous présente une maquette de l'astéroïde double Didymos (27 janvier 2020).

*“Nous avons pu estimer qu'il existait environ un millier de géocroiseurs d'un diamètre supérieur à 1 kilomètre.”*

une mesure du risque de collision associé à chacun des astéroïdes qui nous menacent, compréhensible par le grand public et les médias.

En décembre 2004, la découverte du géocroiseur Apophis a constitué un autre tournant important dans cette prise de conscience. Des calculs de trajectoire réalisés à l'appui des premières observations de cet astéroïde de 325 mètres de diamètre ont abouti à un risque très élevé de collision avec la Terre en 2029. Bien que de nouvelles observations radar effectuées en 2013 aient ensuite démontré que l'astéroïde ne ferait que frôler la Terre ...

1. Directeur de recherche au CNRS, responsable du groupe Planétologie au laboratoire Lagrange de Nice (Unité CNRS/Université Nice Sophia-Antipolis/Observatoire de la Côte d'Azur).

2. « Collision and gravitational reaccumulation: forming asteroid families and satellites », P. Michel *et al.*, *Science*, 2001, vol. 294 :1696-1700. 3. « Debaised albedo distribution for Near Earth Objects », A. Morbidelli, M. Delbo *et al.*, *Icarus*, vol. 340 : 113631, avril 2020.

en 2029 puis en 2036, nous avons soudain réalisé qu'aucun protocole n'avait été prévu pour faire face à une telle catastrophe. Dans l'optique de mettre en œuvre une chaîne de décision internationale sur ces questions, j'ai participé au travail d'une équipe mandatée par l'ONU. Celle-ci a abouti à la création de deux groupes de travail : le premier, constitué de spécialistes des astéroïdes, est chargé de prédire le risque d'impact avec l'un de ces objets ; le second réunit les différentes agences spatiales afin d'organiser la réponse éventuelle à ce risque.

Depuis 2009, les agences spatiales internationales et les experts scientifiques se réunissent tous les deux ans lors de la Planetary Defense Conference. À cette occasion, un exercice « virtuel » basé sur un scénario élaboré par des collègues du Jet Propulsion Laboratory (États-Unis) permet en outre de vérifier notre capacité à répondre à ce risque. Depuis 2012, la Commission européenne finance aussi des consortiums dédiés à l'étude de cette problématique, à l'image de NEO-MAPP, dont je suis le coordinateur.

**Vous êtes aussi très impliqué dans les programmes Hayabusa2, supervisé par l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise et Osiris-Rex, financé par la Nasa. Chacun vise à rapporter sur Terre un échantillon prélevé respectivement Ryugu et Bennu, deux géocroiseurs. Quelles informations ont-ils récoltées ?**

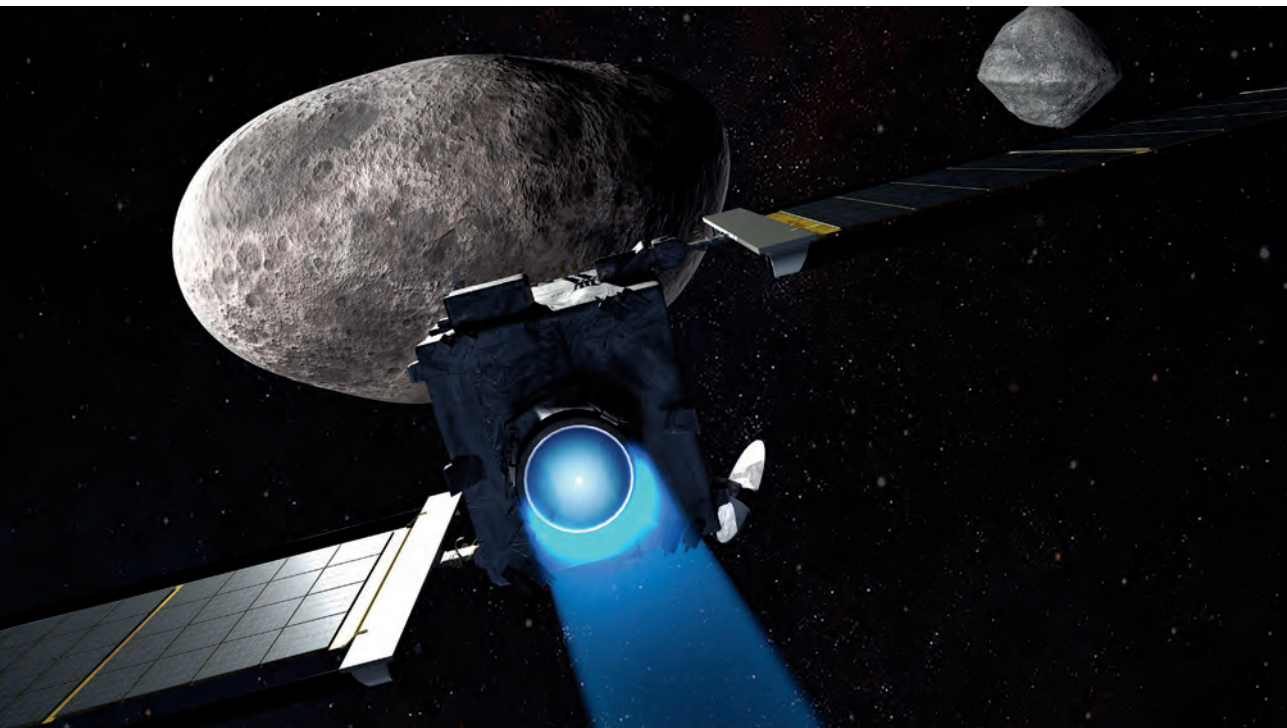
**P.M. :** Au-delà d'informations telles que la forme et la taille, nous ne disposons jusqu'ici d'aucun élément sur la structure et la composition de ces objets ni sur les

caractéristiques de leur surface. Tous les scientifiques qui, comme moi, ont eu la chance de prendre part à ces deux missions, ont ainsi eu la sensation extraordinaire d'explorer, pour chacun des deux astéroïdes, une véritable *terra incognita* située à plusieurs centaines de millions de kilomètres de la Terre. Parmi les découvertes les plus surprenantes figurent l'abondance de blocs rocheux et l'absence de zones de plus de cinq mètres de diamètre libres de roches. Sur un même objet, nous observons également des morphologies de roches très variées là où nous pensions trouver un environnement plutôt homogène. En étudiant la diversité des astéroïdes géocroiseurs, ces missions contribuent à mieux connaître ces ennemis potentiels, même si pour ma part je les considère davantage comme des amis. Grâce à Hayabusa2 et Osiris-Rex, nous savons par exemple qu'un astéroïde dont le diamètre dépasse 400 mètres peut comporter un grand nombre de roches de taille conséquente distribuées de façon homogène à sa surface. Or cette caractéristique est désormais prise en compte dans l'élaboration des stratégies de déviation.

Au-delà des avancées scientifiques, ces missions vers les petits corps célestes ont la capacité de séduire un large public à travers le suspense qui les accompagne. Les conférences que je donne à ce sujet dans le but de transmettre le goût de ces grands défis à la jeune génération rencontrent d'ailleurs un grand succès. **||**



Lire l'intégralité de l'entretien sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)



► Vue d'artiste de l'impacteur Dart en train de s'approcher de l'astéroïde double Didymos.

© NASA/JOHNS HOPKINS APL



## Signature du Contrat d'objectifs et de performance

Le 27 janvier, Frédérique Vidal, ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, et Antoine Petit, président-directeur général du CNRS, ont signé le Contrat d'objectifs et de performance de l'organisme pour la période 2019-2023. Ce contrat, qui rappelle que « chacun des dix instituts du CNRS conduit, dans son domaine, des recherches fondamentales principalement guidées par la curiosité avec la vocation de repousser les limites de la connaissance », identifie six grands défis sociétaux – changement climatique, inégalités éducatives, intelligence artificielle, santé et environnement, territoires du futur, transition énergétique – ainsi qu'une quarantaine de priorités thématiques. Outre les aspects scientifiques, il énonce également différents axes et objectifs pour les partenariats avec les universités et les politiques de sites, l'innovation, l'international, la science dans la société, les ressources humaines, les grandes infrastructures et l'appui à la recherche.



► La ministre Frédérique Vidal et Antoine Petit ont signé le COP 2019-2023, le 27 janvier, au ministère de la Recherche.



Pour consulter le COP :

► <https://bit.ly/327hHTS>



► Lire l'entretien avec Antoine Petit paru sur CNRS Info <https://bit.ly/2ua0kWa>

© MESR/NICOLAS TAVERNIER



### Eric Humler nommé aux grands instruments

Jusqu'ici directeur adjoint scientifique de l'Institut national des sciences de l'Univers, Eric Humler a été nommé président du Comité des très grands équipements scientifiques et grandes infrastructures (TGIR) du CNRS à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2020.

Le CNRS gère, en collaboration avec ses partenaires quelque 80 infrastructures et très grandes infrastructures de recherche (télescopes, synchrotrons, plateformes numériques, etc.) pour l'ensemble de la communauté scientifique. Professeur des universités, Eric Humler succède au physicien Gabriel Chardin.

© JULIE SANSOULET/CNRS



### Martina Knoop à la tête de la Miti

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier, Martina Knoop, physicienne et directrice de recherche au CNRS, est la nouvelle directrice de la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (Miti) du CNRS. La Miti conduit une réflexion

coordonnée et transversale à l'organisme afin d'assurer la mise en œuvre d'une politique de soutien et de renforcement de l'interdisciplinarité. Martina Knoop, qui était jusqu'alors chargée de mission à l'Institut de physique, prend la suite de Stéphane Blanc.

© ROMAIN BERNAY/CNRS

# Carole Chrétien : « développer de nouveaux liens avec les entreprises »

Nommée à la tête de la Direction des relations avec les entreprises du CNRS en novembre 2019, Carole Chrétien nous parle de son parcours et de sa vision des interactions entre la recherche et le monde économique.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURENCE STENVOT



© CYRIL FRÉSILLON / CNRS PHOTOTHÈQUE

**Vous avez pris récemment vos fonctions en tant que directrice des relations avec les entreprises au CNRS. Quelle est votre vision de l'organisme et de ses liens avec le tissu industriel ?**

**Carole Chrétien :** Près de 32 000 personnes se consacrent au CNRS à une recherche interdisciplinaire d'excellence mondiale, mais cette richesse nationale est encore trop méconnue par le monde industriel.

Si le métier premier du CNRS est la recherche fondamentale, ses découvertes, inventions et innovations trouvent des applications dans et pour notre société. Et dans plusieurs cas, ces recherches sont réalisées avec ou pour le monde industriel.

De plus, le CNRS propose une palette interdisciplinaire qui intéresse beaucoup les entreprises. Par exemple, les collaborations avec Thales concernent plusieurs

domaines scientifiques allant de la physique aux logiciels, en passant par les sciences humaines et sociales. Ces collaborations fortes sont ancrées dans la durée ; cela fait ainsi plus de 45 ans que nous travaillons avec le groupe Solvay.

Mais il ne s'agit pas seulement de grands groupes et ETI. Près de 1 500 PME françaises ont noué des relations avec le CNRS ces trois dernières années. Et ces relations prennent des formes très diverses : collaborations de recherche, laboratoires communs, formations en entreprise, brevets, licences, etc. Ces collaborations irriguent par ailleurs l'ensemble du territoire français et bénéficient de tous les partenariats académiques du CNRS.

**Et c'est pour lancer et soutenir toutes ces collaborations que la Direction des relations avec les entreprises (DRE) entre en jeu...**

**C.C. :** En premier lieu, elles sont initiées dans les laboratoires par les chercheurs et chercheuses et sont mises en place par les personnels des instituts et des délégations régionales du CNRS. Un vaste réseau de professionnels au sein des instituts et des services partenariat et valorisation des délégations régionales prépare, organise et entretient les relations avec les entreprises.

La DRE n'est qu'un facilitateur et un accélérateur, comme l'illustre le service Trouver un expert, que nous



avons lancé récemment (lire p. 49). Elle a pour vocation de faciliter l'ensemble des relations et d'avoir un poids de négociation face aux industriels pour garantir l'intéressement du chercheur, mais également le respect de la juste frontière entre les activités d'intérêt général et les activités à caractère économique.

La DRE défend les intérêts du chercheur auprès des industriels et traduit également le besoin des entreprises vers les chercheurs. C'est une interface, qui a pour mission de faciliter et de valoriser le rôle de partenaire scientifique d'excellence du CNRS.

Aujourd'hui les nouveaux défis sociaux et environnementaux posés aux gouvernements et aux entreprises imposent de repenser les liens entre un organisme comme le CNRS et le monde économique. C'est le bon moment pour développer de nouveaux liens, pour déployer de nouveaux projets. Le CNRS a toute sa place pour éclairer la décision publique et peut contribuer avec les entreprises à relever ces défis essentiels pour les générations futures. Pour cela, et plus largement, il faut que le monde de la recherche et le monde industriel se connaissent encore mieux.

#### Pouvez-vous nous en dire plus sur votre parcours ?

**C. C. :** Il s'est façonné à l'interface entre le monde économique et le monde public... en alliant idéalisme et pragmatisme. Je sais que cela peut surprendre mais j'ai commencé mes études par une licence de philosophie à la Sorbonne ! Une étape importante, car pour moi la philosophie est la meilleure discipline pour s'interroger sur le monde et voir comment l'améliorer...

Après un DEA de sciences politiques et un cursus de management à l'Essec, j'ai débuté ma carrière chez Arthur Andersen, un cabinet international de conseil aux entreprises. Puis j'ai dirigé des collectivités locales et dans ce cadre, accompagné des projets d'entreprises et d'entrepreneurs sur le terrain, mais aussi par exemple les projets de développement de l'Université de technologie de Compiègne et sa filiale de valorisation. Par la suite, j'ai intégré des cabinets ministériels au sein desquels je gérais les activités de développement économique et d'accompagnement des entreprises. Cette expérience m'a permis de voir les entreprises dans des contextes favorables mais aussi dans des contextes plus difficiles (restructuration, désindustrialisation...).

J'ai ensuite été nommée directrice générale au Commissariat général à l'internationalisation des PME et ETI. Nous aidions les entreprises à aller chercher des développements et des parts de marché à l'étranger. Puis j'ai travaillé avec l'ensemble des fédérations professionnelles et des réseaux patronaux locaux. Entre 2014 et 2018 j'ai été secrétaire générale et directrice générale déléguée du Medef. Ce parcours me permet d'avoir aujourd'hui une vision globale du monde économique et de ses dirigeants. **II**



Pour en savoir plus  
» [www.entreprises.cnrs.fr](http://www.entreprises.cnrs.fr)

## En bref

### Frédérique Vidal devant les nouveaux directeurs d'unité

Le 4 février, le séminaire d'accompagnement des nouveaux directeurs et directrices d'unité, organisé par le CNRS et la Conférence des présidents d'Université, a réuni plus d'une centaine de participants. Il a donné l'occasion à Frédérique Vidal, ministre de l'Enseignement supérieur de la Recherche et de l'Innovation, de répondre à de nombreuses questions soulevées par la future loi de programmation pluriannuelle de la recherche. La transcription de cette rencontre est en ligne sur [cnrs.fr](http://cnrs.fr).

### Les lauréats de 80 Prime

Le CNRS a dévoilé les lauréats de la deuxième édition de son appel à projets 80 Prime. Cet appel promeut des « projets de recherche inter-instituts multi-équipes » (Prime) et a notamment pour objectif de soutenir l'interdisciplinarité au sein de l'organisme. Ces projets doivent faire émerger de nouvelles questions scientifiques et méthodologiques sur des thématiques stratégiques pour le CNRS, et impliquer des collaborations inédites entre laboratoires. Les 80 projets sélectionnés bénéficient d'un budget annuel maximal par projet de 30 000 euros sur deux ans, auquel s'ajoute un contrat doctoral sur trois ans.

[www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/80-prime-les-projets-laureats-2020-devoiles](http://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/80-prime-les-projets-laureats-2020-devoiles)

### Les médailles de bronze et d'argent

Le CNRS a attribué cette année la médaille d'argent à 22 chercheurs et chercheuses, pour l'originalité, la qualité et l'importance de leurs travaux et la médaille de bronze à 46 chercheurs et chercheuses, pour les encourager à poursuivre leurs recherches engagées et déjà fécondes.

[www.cnrs.fr/talent/index](http://www.cnrs.fr/talent/index)

## Un colloque historique

Le 4 novembre 2019, le colloque Histoire et mémoire, organisé par l'association Rayonnement du CNRS, l'association des anciens et amis du CNRS, dans le cadre des 80 ans du CNRS, a fait salle comble au siège de l'organisme. Plusieurs tables rondes sont revenues sur les débats qui ont marqué l'histoire du CNRS et les évolutions de l'organisation de la recherche. À cette occasion, le Prix national A3 a été décerné à Nicolas Minc de l'Institut Jacques-Monod (CNRS/Université de Paris).



© MARYVONNE SANCHEZ

▼ Table ronde Présence du CNRS...Recherche et Université, avec (de g. à d.) Daniel Charnay, Michèle Leduc, Elisabeth Giacobino, Alain Aspect et Giuseppe Baldacci.



Revivez la journée sur : <https://webcast.in2p3.fr/container/histoire-et-memoire>



© MESRI/AR PICTURES

► Cérémonie de remise des Étoiles de l'Europe, le 10 décembre 2019, au musée du quai Branly-Jacques Chirac.

Elisabeth Blanc, aujourd'hui conseillère scientifique du CEA, est récompensée pour le projet Arise qu'elle a dirigé pendant de nombreuses années et dont le CNRS est partenaire, autour de l'étude de l'atmosphère à partir de technologies, notamment infrasons et lidar. Paolo Samori, de l'Institut de science et d'ingénierie supramoléculaires, a été quant à lui récompensé pour le réseau de formation iSwitch qui a offert à 15 jeunes chercheurs et chercheuses de talent un programme de formation innovant à l'interface entre la chimie, la physique et l'ingénierie, dans les domaines émergents de la science des matériaux et des nanosciences.

## Les Étoiles de l'Europe

Le 10 décembre a eu lieu la remise des Étoiles de l'Europe, récompense qui valorise chaque année les coordinatrices et coordinateurs de projets ayant choisi l'Union européenne pour développer leurs recherches et s'ouvrir à l'innovation. Au palmarès, Bernard Kloreg, professeur à Sorbonne Université, est ainsi mis en valeur pour sa coordination du cluster EMBRIC, qui réunit 6 infrastructures de 10 pays pour développer la bio-économie bleue, en particulier la création de nouveaux produits et composés aux propriétés innovantes issus d'organismes biologiques marins. De son côté,

## Les inventions s'exposent en Chine

L'exposition La Saga des Inventions, qui met en scène les images d'archives du CNRS (lire *CNRS le Journal* n° 297), a connu, après les Rencontres d'Arles de l'été 2019, un nouveau succès... en Chine cette fois. Du 22 novembre au 5 janvier dernier, elle était en effet à l'affiche de la 5<sup>e</sup> édition du Jimei x Arles International Photo Festival, à Xiamen. Le festival, qui programme chaque hiver huit expositions des Rencontres d'Arles et une vingtaine d'expositions de photographie autour de la Chine et de l'Asie, a accueilli cette année plus de 70 000 visiteurs.



© THREE SHADOWS

## La France bénéficie de l'EIC


La France est la première bénéficiaire de financements mixtes au dernier appel EIC Accelerator d'octobre 2019, dont les résultats ont été dévoilés en décembre. Ce programme a pour but d'accélérer la croissance des entreprises européennes proposant des innovations de rupture. Outre un soutien financier important (jusqu'à 17 millions d'euros par entreprise), les start-up et les PME lauréates auront accès à des services de coaching, de mise en réseau et d'accélération des entreprises pour les aider à se développer. Sur les 75 petites entreprises (issues de 15 pays différents) sélectionnées, la France dénombre 7 lauréates, et le CNRS est à l'origine ou partenaire de 4 d'entre elles. Lors de la vague précédente dévoilée en septembre, la France comptait déjà 4 lauréates dont 3 impliquant le CNRS.

## 20 lauréats CNRS pour les Consolidator Grants

En décembre, le Conseil européen de la recherche a dévoilé les noms des 301 lauréats de ses bourses Consolidator Grant 2019, qui bénéficieront d'une enveloppe de 600 millions d'euros. Cet appel s'adresse à des scientifiques confirmés qui ont obtenu leur thèse entre 8 et 12 ans avant sa date de lancement. Avec 20 lauréats, le CNRS reste l'établissement de recherche européen accueillant le plus grand nombre de chercheurs et chercheuses récompensés. La France se classe en troisième position en accueillant 43 projets lauréats.



# GRAND FORMAT



*On s'attaque à la dépression,  
à la traversée des Alpes  
en armure et à des conjectures  
qui résistent au temps.*

ILLUSTRATION : ALICE DES WWW.ALICEDES.COM POUR CNRS LE JOURNAL





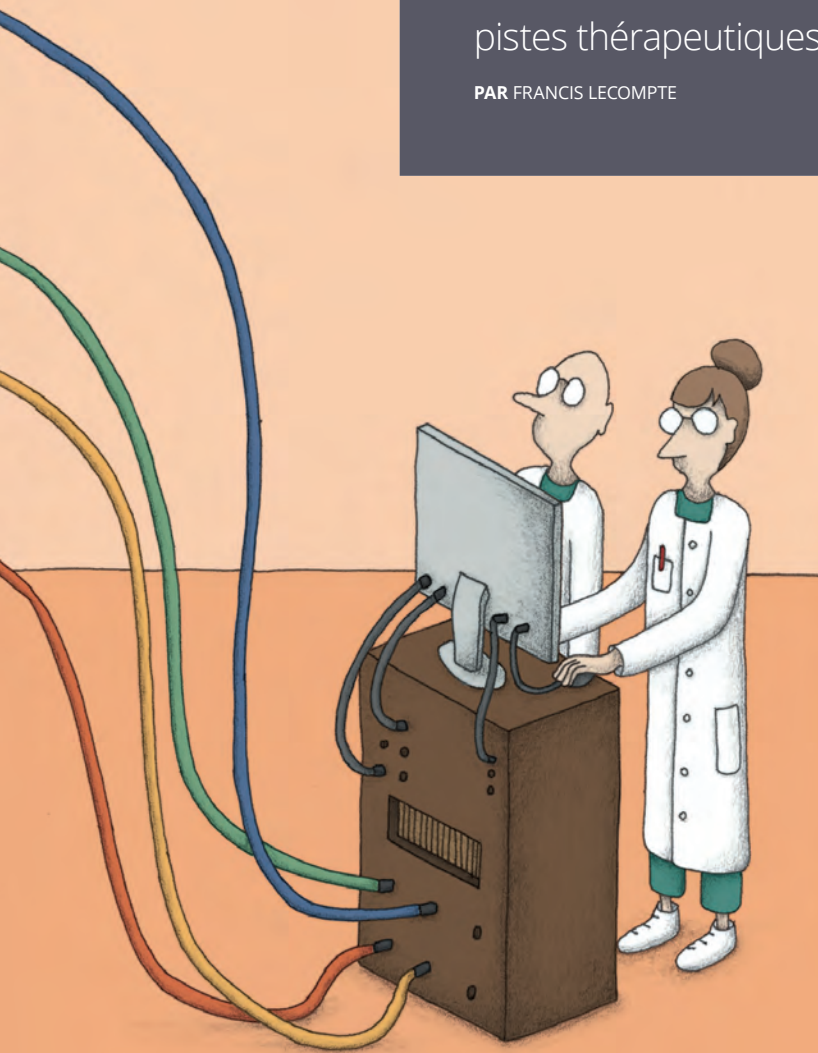


# Nouveaux regards sur la *dépression*

VIVANT 

**Enquête.** Une personne sur cinq fera une dépression au cours de son existence. S'il ne fait plus de doute aujourd'hui que la dépression est une maladie organique, les chercheurs continuent d'en explorer les mécanismes. Face aux limites des antidépresseurs actuels, de nouvelles pistes thérapeutiques voient le jour.

PAR FRANCIS LECOMPTE



**V**ous souvenez-vous de ce que vous faisiez mercredi dernier, à 19 heures ? Seriez-vous capable de décrire les émotions exactes qui vous ont traversé à ce moment-là ? Et la veille à 13 heures ? Probablement pas... Ces informations de la vie quotidienne sont pourtant tout sauf anodines pour les chercheurs qui travaillent sur la dépression, une maladie qui touche quelque 15 % de la population mondiale et se manifeste notamment par une fatigue extrême, la dévalorisation de soi, une perte de motivation... et dans les cas les plus sévères, une potentialité suicidaire avérée. Grâce au développement des technologies mobiles, et à la généralisation des smartphones, c'est tout un nouveau pan de recherche qui s'ouvre à eux.

## Psychiatrie 3.0

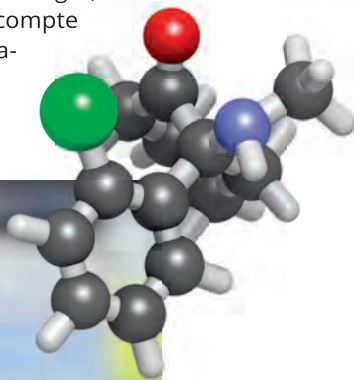
« Cinq à six fois par jour, explique Joel Swendsen, psychologue, clinicien à l'Institut de neurosciences cognitives et intégratives d'Aquitaine<sup>1</sup> (Incia) à Bordeaux, l'application que nous avons développée va poser une série de questions précises aux patients dépressifs que nous suivons : où êtes-vous ? avec qui ? qu'êtes-vous en train de faire ? éprouvez-vous du stress... ? C'est très bref, une minute ou deux au maximum, mais cela permet de récolter des informations qu'on ne peut pas obtenir dans le cabinet ...

1. Unité CNRS/Université de Bordeaux.

... d'un médecin ou en laboratoire. » Des informations contextuelles, mais surtout longitudinales, c'est-à-dire sur les états successifs de la personne, qui permettent de comprendre comment tel paramètre observé à tel moment de la journée – elle est entourée d'inconnus, par exemple – va influencer une autre variable trois heures plus tard – un niveau de stress plus élevé ou une phase dépressive plus intense.

Après les progrès spectaculaires des techniques de neuroimagerie, qui permettent de voir fonctionner le cerveau avec toujours plus de précision, l'avènement de cette « psychiatrie 3.0 », ainsi que l'a baptisée Xavier Briffault, chercheur en sciences sociales et épistémologie de la santé mentale au Centre de recherche médecine, science, santé et société<sup>2</sup>, est crucial parce qu'il n'arrive pas seul. « Pour la première fois dans l'histoire de la psychiatrie, avance-t-il, il y a une conjonction entre la mise au point de nouveaux outils, un changement dans la classification des maladies et de nouvelles approches de traitement adaptées à celles-ci. » Le chercheur y voit un souffle salutaire pour une discipline qu'il estime « en état de crise aiguë », compte tenu de l'insuffisante efficacité des traitements qu'elle propose aux patients. Si tous les cliniciens et scientifiques ne partagent pas la sévérité de ce jugement, tous reconnaissent que les antidépresseurs ont leurs limites : 30 à 50 % des patients y restent, en effet, insensibles. La priorité est donc de mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre dans la dépression en identifiant ce qu'il se passe au niveau biologique, dans le cerveau, afin de pouvoir, ensuite, mettre en œuvre les traitements les mieux adaptés.

Les premières connaissances en la matière sont arrivées par hasard, au sortir de la Seconde guerre mondiale. Alors que la tuberculose faisait des ravages, les médecins se sont, en effet, rendu compte qu'un antibiotique utilisé pour tuer le bacille, l'isoniazide, améliorait aussi l'humeur des patients. L'un de ses dérivés,



► L'eskétamine, un nouvel antidépresseur en spray nasal, agit en quelques heures à peine.

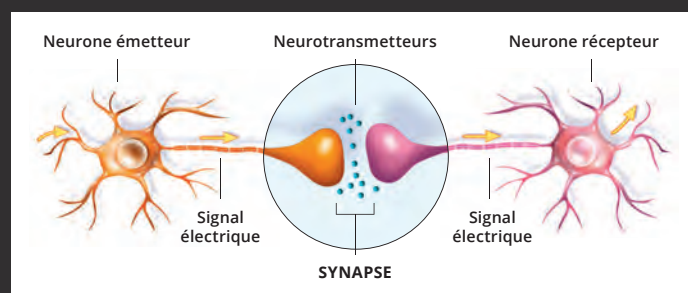






## Synapse, mode d'emploi

L'information ne circule pas uniquement sous forme de signaux électriques dans le système nerveux. Entre la terminaison d'un neurone et le neurone suivant, il y a un espace vide, la synapse, qu'un courant électrique ne peut traverser. Ce sont des messagers chimiques, les neurotransmetteurs, qui jouent les intermédiaires. Sous l'effet d'une impulsion électrique, le neurone émetteur libère un neurotransmetteur – les plus connus sont les monoamines, telles que la sérotonine ou la dopamine, toutes deux impliquées dans la dépression. Ce neurotransmetteur va interagir avec le neurone récepteur, qui produit alors un courant électrique.



© JACOBIN/VESEP

l'iproniazide, est ainsi devenu le premier médicament antidépresseur. « À la même époque, des chercheurs aux États-Unis ont mis au point les premières techniques pour quantifier les neurotransmetteurs dans le cerveau, ces messagers chimiques qui permettent le passage de l'influx nerveux d'un neurone à l'autre, raconte Michel Hamon, neuropharmacologue à l'Institut de psychiatrie et neuroscience. Ils ont très vite observé que les médicaments antidépresseurs, dont on n'avait d'abord vu que les effets sur les symptômes de la dépression, modifiaient l'activité d'une catégorie de neurotransmetteurs dans le cerveau, les monoamines. » Certaines de ces monoamines sont devenues par la suite très populaires : la sérotonine, la dopamine ou encore la noradrénaline... Ainsi a-t-on mis en lumière les mécanismes biologiques de la dépression : un taux anormalement bas de sérotonine se traduit généralement par un état dépressif, un taux de dopamine trop faible par une perte de motivation. En jouant sur la quantité de neurotransmetteurs présents au niveau de la connexion entre deux neurones (ou synapse), les antidépresseurs permettent de rétablir leur équilibre (voir encadré).

### De nouveaux antidépresseurs

« La majorité des antidépresseurs prescrits aujourd'hui fonctionnent à peu près de la même manière, explique ...

... Sophie Gautron, neurobiologiste au laboratoire Neurosciences Paris-Seine<sup>3</sup>. *Les neurotransmetteurs, après avoir délivré leur message au neurone récepteur, sont évacués de la synapse et recapturés par le neurone émetteur. Les antidépresseurs empêchent cette recapture et permettent de maintenir un taux suffisant de monoamines dans le cerveau.* » Testé dans les années 1970, le plus célèbre de ces inhibiteurs de recapture, la fluoxétine, autrement dit le Prozac®, est apparu au début des années 1980 comme la pilule miracle, parce qu'il parvenait pour la première fois à agir presque exclusivement sur la sérotonine et moins sur les autres monoamines. Par rapport à ses prédécesseurs, il réduisait ainsi considérablement le nombre d'effets indésirables.

Le Prozac® est toujours prescrit aujourd'hui, mais la recherche sur les antidépresseurs ne s'est pas arrêtée avec lui. La vortioxétine, par exemple, est apparue il y a une dizaine d'années comme une alternative intéressante, dans la mesure où elle semble stimuler aussi les capacités cognitives. Entre-temps, les chercheurs ont continué d'explorer le cerveau avec des outils d'imagerie moléculaire toujours plus performants et se sont aperçus que les monoamines, bien que très importantes dans la régulation de l'humeur, sont des neurotransmetteurs très marginaux en termes de quantité. *« Les synapses qui utilisent d'autres neurotransmetteurs comme le glutamate ou le GABA sont en réalité infiniment plus nombreuses, précise Michel Hamon, et on soupçonne aujourd'hui que ces derniers pourraient eux aussi jouer un rôle dans la dépression. »* Un bloquant de récepteur du glutamate, l'eskétamine, vient d'ailleurs d'être autorisé par les autorités sanitaires européennes comme médicament antidépresseur. Dérivé de la kétamine, un anesthésique, il a le double avantage d'être efficace sur les patients résistants aux antidépresseurs classiques et d'agir, via un spray nasal, en quelques heures, contre plusieurs semaines avec les traitements traditionnels. Reste à évaluer ses effets à plus long terme.

### L'essor de la neuromodulation

Parallèlement à ces recherches sur les antidépresseurs, des alternatives non médicamenteuses font également leurs preuves pour les malades touchés par des dépressions sévères et résistantes, mais aussi pour ceux chez qui le risque suicidaire est important et ne peut attendre de longues semaines les effets d'un traitement

*“L'électroconvulsivothérapie (ECT) répétée permet d'obtenir un effet antidépresseur significatif et durable.”*

pharmacologique. Ce sont les techniques dites de neurostimulation et de neuromodulation. Utilisée en routine dans les services hospitaliers habilités, l'électroconvulsivothérapie, ou ECT, consiste à provoquer une crise convulsive généralisée en envoyant un courant électrique de faible intensité dans le cerveau. *« La convulsion, qui va s'arrêter d'elle-même après 20 à 40 secondes, provoque une dépolarisation globale des neurones »,* explique Emmanuel Poulet, chef de service aux urgences psychiatriques de l'hôpital Édouard-Herriot, à Lyon. Héritière des électrochocs, qui consistaient à provoquer une crise d'épilepsie sous anesthésie, l'ECT permet, grâce à la répétition des séances, d'obtenir un effet antidépresseur significatif et durable. *« Les travaux en imagerie fonctionnelle retrouvent une modification de l'activité de réseaux cérébraux impliqués dans la dépression, indique le praticien. Les études sur des modèles animaux montrent un effet sur la plasticité cérébrale. »* Non invasive – les électrodes sont simplement posées sur le scalp –, l'ECT se pratique sous anesthésie. *« Les recommandations actuelles et l'adaptation des paramètres de stimulation lors des séances s'emploient à réduire au maximum les effets indésirables, en particulier sur la mémoire »,* précise Emmanuel Poulet.

Plus récentes, la stimulation magnétique transcrânienne répétée (rTMS) et la stimulation électrique transcrânienne

▲ La stimulation magnétique transcrânienne (rTMS) permet de modifier l'activité électrique du cerveau.







en courant continu (tDCS) continuent de faire l'objet de travaux de recherche clinique. La stimulation magnétique transcrânienne utilise un champ magnétique au lieu d'un courant électrique, avec le même effet : provoquer une modulation des réseaux neuronaux. « *Après vingt à trente séances, on observe une modification durable de l'activité de la zone cérébrale ciblée, notamment en termes de flux sanguin et d'excitabilité, avec une efficacité démontrée dans le traitement des dépressions caractérisées* », précise encore Emmanuel Poulet. De plus en plus utilisée, la tDCS est une autre piste prometteuse dans la mesure où elle est bien tolérée par les patients, tout en étant applicable avec un matériel portatif très léger et donc, moins coûteux.

L'un des principaux freins au déploiement des nouvelles méthodes de neurostimulation reste, en effet, financier. Ainsi, bien que l'efficacité de la rTMS ait été démontrée par les études, l'acte n'est pas encore reconnu par les autorités sanitaires. Cette barrière financière est encore plus élevée pour les techniques de stimulation profonde ou DBS (pour *Deep Brain Stimulation*), qui consistent à implanter une électrode fonctionnant en permanence sur une zone bien précise du cerveau. Utilisée notamment dans la maladie de Parkinson, la stimulation profonde a également démontré ses effets

dans le traitement de la dépression ; mais outre son aspect invasif et ses effets à long terme encore inconnus, elle coûte plusieurs milliers d'euros et n'est réservée qu'à des cas réfractaires aux autres approches thérapeutiques.

#### **Des stratégies thérapeutiques sur-mesure**

Le recours aux antidépresseurs et l'essor des techniques de neuromodulation n'ont pas disqualifié les psychothérapies cognitivo-comportementales, qui restent d'actualité dans de nombreux programmes de traitement de la dépression. « *Le lien de corrélation entre le suivi d'une psychothérapie et la guérison d'un patient dépressif est d'environ 15 %. C'est certes faible, mais aucune des options thérapeutiques disponibles aujourd'hui ne peut prétendre donner des résultats sur l'ensemble des patients dépressifs* », commente Xavier Briffault. De plus en plus, les praticiens s'orientent vers une prise en charge mixte. « *Quand on est face à un patient pour ainsi dire paralysé, sans aucun ressort, on commence souvent par lui prescrire des antidépresseurs pour l'aider à retrouver la plasticité de son système nerveux*, commente Catherine Belzung, directrice de l'unité Imagerie et Cerveau, à l'Université de Tours. *Ce n'est qu'à ce moment-là qu'il va pouvoir devenir réceptif à la psychothérapie. Je vois un peu celle-ci comme une béquille, qui va ...*

... permettre de remettre le patient en route, même si son mode d'action reste encore en partie inexpliqué. »

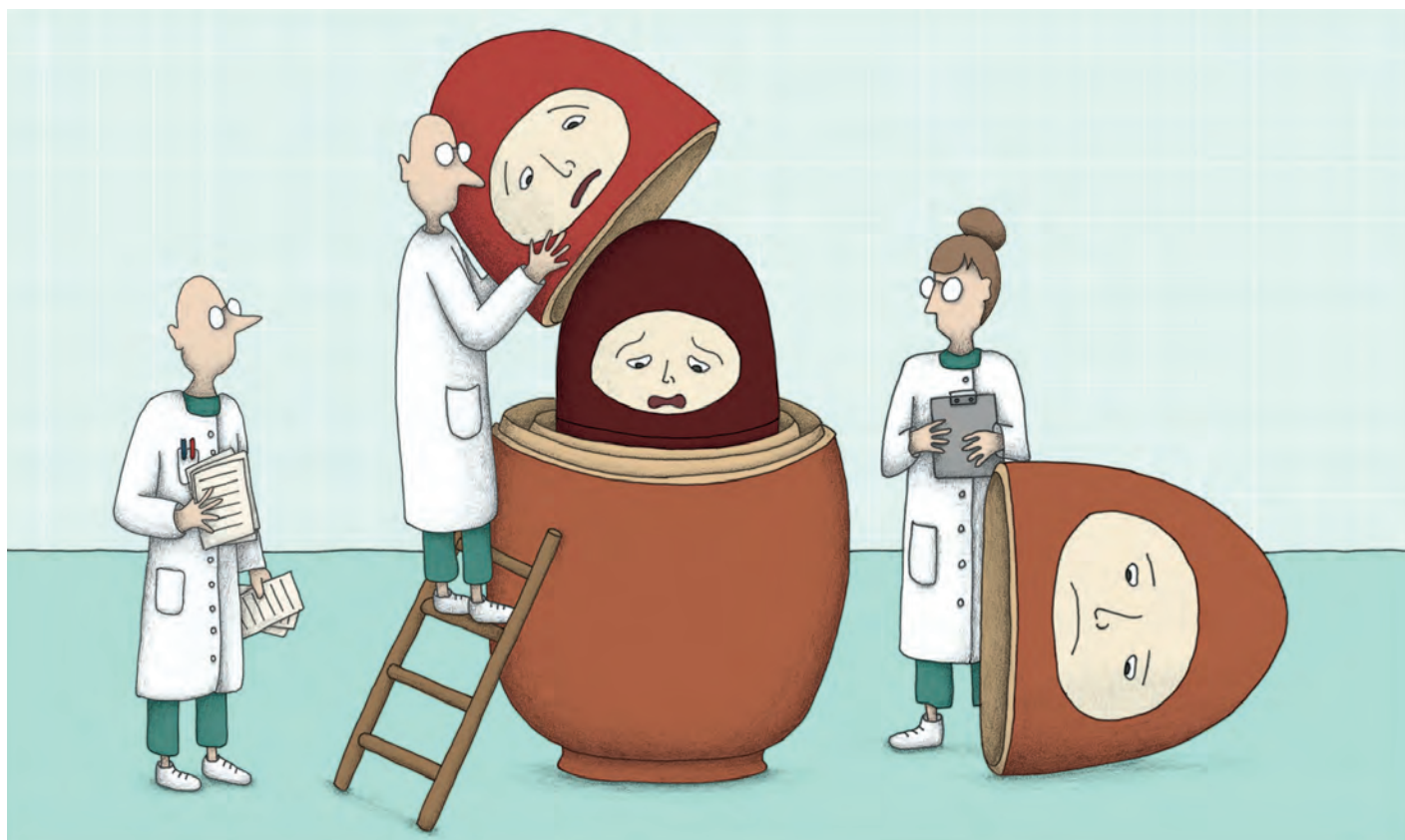
L'intérêt que porte cette neurobiologiste aux travaux de philosophes ou de psychologues pour mieux comprendre certains biais cognitifs impliqués dans la dépression – comme, par exemple, les pensées négatives qui donnent à voir, mais aussi à sentir ou à goûter au dépressif un monde répulsif ou, au mieux, sans attrait – est révélateur de l'état d'esprit de la psychiatrie, qui a globalement surmonté ses antagonismes entre l'étude neurobiologique de la dépression d'un côté, et une approche exclusivement psychologique de l'autre. « Les psychothérapies font partie de la boîte à outils que nous avons à notre disposition, confirme Emmanuel Poulet, au même titre que les médicaments et la neurostimulation. Ces outils sont complémentaires, et il faut savoir les utiliser comme tels. Cela n'a pas d'intérêt de les mettre en concurrence. »

Mais piocher dans la boîte pour choisir le bon outil au bon moment n'est pas encore chose facile. Comment décider que dans une phase donnée de la maladie, tel antidépresseur sera le plus efficace ou, qu'au contraire, une séance de neuromodulation évitera au patient de longs mois de souffrance – le temps de se rendre compte que le médicament est sans effet sur lui ? Dans la dépression, le diagnostic et l'évaluation des traitements restent

encore largement dépendants de l'observation des symptômes et de l'expression subjective du patient. Si les modèles qui servent depuis des décennies à ranger les dépressions dans différentes catégories en fonction de ces symptômes sont partiellement remis en question – qu'il s'agisse du Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux, ou DSM, venu des États-Unis ou de la Classification internationale des maladies (CIM) (voir encadré) –, ils continuent d'être utilisés en attendant de trouver une alternative plus objective : des caractéristiques biologiques mesurables permettant de mieux caractériser la dépression, nouveau graal des chercheurs cliniciens.

### En quête de biomarqueurs

L'un des premiers biomarqueurs à avoir été identifié est le cortisol : un taux élevé de cette hormone du stress est en effet mesuré chez certains patients dépressifs... mais pas chez tous. La piste inflammatoire est un autre candidat sérieux dans cette quête de biomarqueurs. « On observe chez certains patients des anomalies de marqueurs sanguins, les cytokines, des molécules impliquées dans le système immunitaire », explique Catherine Belzung, qui tente avec ses équipes de mettre au point un dépistage de ces marqueurs par simple test sanguin. Autre piste de recherche : traquer les anomalies du





système sérotoninergique en utilisant l'imagerie moléculaire, mais le procédé est lourd et impossible, d'un point de vue économique, à systématiser pour tous les patients... Aujourd'hui, force est de reconnaître qu'aucune de ces méthodes ne se révèle encore décisive, et la recherche sur les biomarqueurs se poursuit. « À terme, peut-être pourra-t-on obtenir une sorte de signature d'un état pathologique en dosant une dizaine de marqueurs, espère Michel Hamon. On pourrait voir l'augmentation de l'un, la diminution d'un autre..., et comprendre à quel type de dépression on a affaire afin de choisir la stratégie la mieux adaptée. »

Dernier – gros – point d'interrogation, et pas des moindres : les facteurs déclenchants de la dépression. « Ils sont sociétaux ! répond sans hésiter Michel Hamon. Ce sont les agressions de la société, en particulier à notre époque de plus en plus individualiste où disparaissent les solidarités : si des événements sociaux ou familiaux ont perturbé la construction du cerveau pendant les vingt premières années de la vie, ces personnes seront plus vulnérables que d'autres à l'environnement. » Tristan Dagron, historien de la psychologie à l'Institut d'histoire des représentations et des idées dans les modernités<sup>4</sup>, le confirme : « Dans un monde qui prône la performance à tout prix, absolument personne ne saurait prétendre être à la hauteur de ce qu'on attend de lui ni de l'idéal qu'il est conduit à se donner. »

Un temps avancée, l'hypothèse génétique reste également citée, mais semble encore loin d'être clarifiée. « Si l'on sait que les personnes apparentées à un patient dépressif sont deux ou trois fois plus exposées au risque de développer elles aussi une dépression, les chercheurs peinent à identifier le ou les gènes spécifiques de la dépression », indique Sophie Gautron. Certains gènes portant des mutations retrouvées chez des patients dépressifs ont suscité l'espoir à partir des années 1990, mais les études génétiques récentes menées sur des dizaines de milliers de personnes n'ont pas permis de confirmer cette hypothèse. La composante génétique de la dépression reste cependant avérée et importante. « Les chercheurs supposent désormais que ce sont des configurations de gènes, sans doute très complexes, qui entrent en jeu », poursuit la scientifique. Cette hypothèse multigénique pose que ce sont un grand nombre de gènes qui, en interagissant avec l'environnement et des situations particulières – un stress post-traumatique, par exemple – vont voir leur expression modifiée chez certaines personnes.

La science est encore loin de pouvoir réaliser des thérapies géniques pour prévenir la dépression, mais cette approche a le mérite de souligner la notion de variabilité selon les individus, désormais clef dans l'étude de la dépression. Une maladie que la recherche considère donc désormais d'un point de vue résolument diversifié : variété des causes, des symptômes, des marqueurs, des traitements... « Il n'y a plus une dépression, il y en a pratiquement

## Le DSM, un outil de diagnostic controversé

D'abord simple recueil statistique des maladies mentales né aux États-Unis en 1952, le *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux) s'est transformé, au fil des années, en un vaste classement des maladies mentales par catégories sur la base d'une description des symptômes observés et d'une évaluation quantitative des traitements pharmacologiques. La dernière édition en date, le DSM-V, a été publiée en 2013. Comme la Classification statistique internationale des maladies (CIM) établie par l'OMS à partir de 1948, plus généraliste, le DSM a pour but de rendre le diagnostic le plus objectif possible en proposant des nomenclatures et des désignations communes à tous les praticiens. Le manuel reste largement utilisé par les psychiatres, qui estiment qu'il remplit effectivement cette fonction et qu'il n'a pas pour

mission de comprendre les causes. Cette approche exclusivement descriptive, limitée à l'observation des syndromes, soulève pourtant de plus en plus de critiques, dans la mesure où le DSM ne s'intéresse pas du tout aux éléments extérieurs – familiaux, sociaux, sanitaires... - qui influencent le patient, et favorisent la prise de médicaments comme seule voie thérapeutique. Thomas Insel, directeur du très influent International Institute of Mental Health, aux États-Unis, déclarait, il y a quelques années, qu'il fallait en finir une fois pour toutes avec les catégories du DSM ; il a depuis créé une société informatique pour se lancer dans le « *Research Domain of Criteria* » (RDoC), un nouvel axe de recherche fondé sur l'idée que seule l'analyse très fine du cerveau permettra de comprendre les différents types de dépression et leurs mécanismes.

autant qu'il y a de dépressifs », résume Catherine Belzung. C'est pour cette raison que les technologies mobiles sont d'un apport crucial, estime Joel Swendsen à l'Incia : « Elles contribuent à pratiquer cette médecine personnalisée, en apportant quantité d'informations individuelles, qui jusque-là n'étaient jamais entrées dans les laboratoires. Mais attention, il convient de faire le tri entre les centaines d'applications téléchargeables, dont la plupart n'ont fait l'objet d'aucune étude clinique, et de coupler les données récoltées avec l'imagerie cérébrale et la neurobiologie ». Toutes ces informations de la vie quotidienne sont de nouvelles pièces qui viennent compléter le puzzle pour mieux comprendre la dépression. Le puzzle n'en est pas terminé pour autant, loin s'en faut. Le casse-tête continue. II

4. Unité CNRS/Univ. Jean-Monnet/ENS Lyon/Univ. Lumière Lyon 2/Univ. Jean-Moulin Lyon 3/Univ. Clermont-Auvergne.

# Quand la dépression n'arrive pas seule

La dépression ne se manifeste pas toujours seule. Accidents cardio-vasculaires, maladies neurodégénératives, troubles du sommeil, douleur chronique... lui sont régulièrement associés. Pourquoi cette concomitance ? Qu'est-ce qui, du trouble physique ou de la dépression, provoque l'autre ?

PAR LAURE CAILLOCE

Le chiffre ne laisse pas de surprendre, et permet de toucher du doigt l'ampleur du phénomène : en moyenne, 25 % des patients hospitalisés pour un problème de santé générale présentent aussi des symptômes dépressifs. « *Si l'on se situe du côté des personnes qui sont suivies pour dépression, les études rapportent que 35 à 50 % d'entre elles souffrent d'une autre maladie* », complète Bruno Auizerate, psychiatre à l'hôpital Charles Perrons à Bordeaux et chercheur au laboratoire NutriNeuro. Ainsi, il n'est pas rare de voir associés dépression et obésité, dépression et diabète, dépression et AVC, dépression et Parkinson, dépression et douleur chronique... Sans que l'on sache toujours quel trouble cause l'autre.

« *Plus la recherche avance, plus il apparaît qu'on a affaire à un phénomène bidirectionnel* », avance Pierre-Alexis Geoffroy, psychiatre à l'hôpital Bichat à Paris et chercheur au laboratoire Neurodiderot. On sait qu'une personne dépressive sera davantage sujette à des complications de santé ; la dépression se caractérise en effet par un stress oxydatif et un terrain inflammatoire plus importants, souvent aggravés par le fait qu'un sujet déprimé aura davantage de comportements à risque – consommation de tabac ou d'alcool plus importante, moindre recours à la médecine de prévention (examens sanguins, dépistage du cancer du sein ou du côlon)...

À l'inverse, la dépression est aussi susceptible d'apparaître dans le sillage d'une autre pathologie : elle peut être

la conséquence du mal-être engendré par la maladie et ce qu'elle suppose (séquelles physiques, lourdeur du traitement...), voire constituer un symptôme de la pathologie en tant que telle, comme le montrent les récentes découvertes sur la maladie de Parkinson et la mise en évidence par les chercheurs de voies biologiques communes avec la dépression (lire ci-dessous). « *La dépression qui apparaît pour la première fois chez un sujet âgé peut être annonciatrice d'une maladie neurologique dégénérative* », rappelle Pierre-Alexis Geoffroy.

La coexistence entre la dépression et une autre maladie n'est pas seulement un casse-tête pour les chercheurs, elle pose un vrai défi aux médecins dans le diagnostic et le traitement des patients. « *Du point de vue du psychiatre que je suis, cette co-occurrence, si elle n'est pas identifiée, peut compromettre la prise en charge des patients dépressifs et rendre inefficaces les traitements standards contre la dépression* », souligne Bruno Auizerate, qui pointe le danger que le patient développe une dépression récidivante, voire chronique. De la même manière, des patients souffrant de troubles physiques, dont on n'aurait pas diagnostiqué et pris en charge les troubles dépressifs, courent le risque de moins bien répondre aux traitements et voir leur maladie évoluer défavorablement. Une statistique, parmi tant d'autres, devrait alerter : une personne cardiaque déprimée a un risque de mortalité 3,5 fois plus élevé qu'une personne cardiaque non déprimée.

1. Unité CNRS/Université de Strasbourg. 2. Unité CNRS/Université Claude-Bernard Lyon 1.





## La douleur s'en mêle

« Il existe un lien très fort entre douleur et dépression, affirme Ipek Yalcin, neuroscientifique à l'Institut des neurosciences cellulaires et intégratives<sup>1</sup> (Inci) à Strasbourg et spécialiste de la douleur. On estime que 50 % des patients souffrant de douleurs chroniques développent des troubles anxieux ou dépressifs, un chiffre qui monte à 80 % si l'on cible les personnes souffrant de fibromyalgie, ces douleurs musculo-squelettiques généralisées. » Les études menées depuis une dizaine d'années sur l'animal ont permis de mieux comprendre ce lien entre douleur et dépression. « Chez la souris avec une sciatique persistante, on voit la structure et le fonctionnement du cerveau se modifier en quelques semaines à peine, et les comportements anxio-dépressifs s'installer », indique la chercheuse.

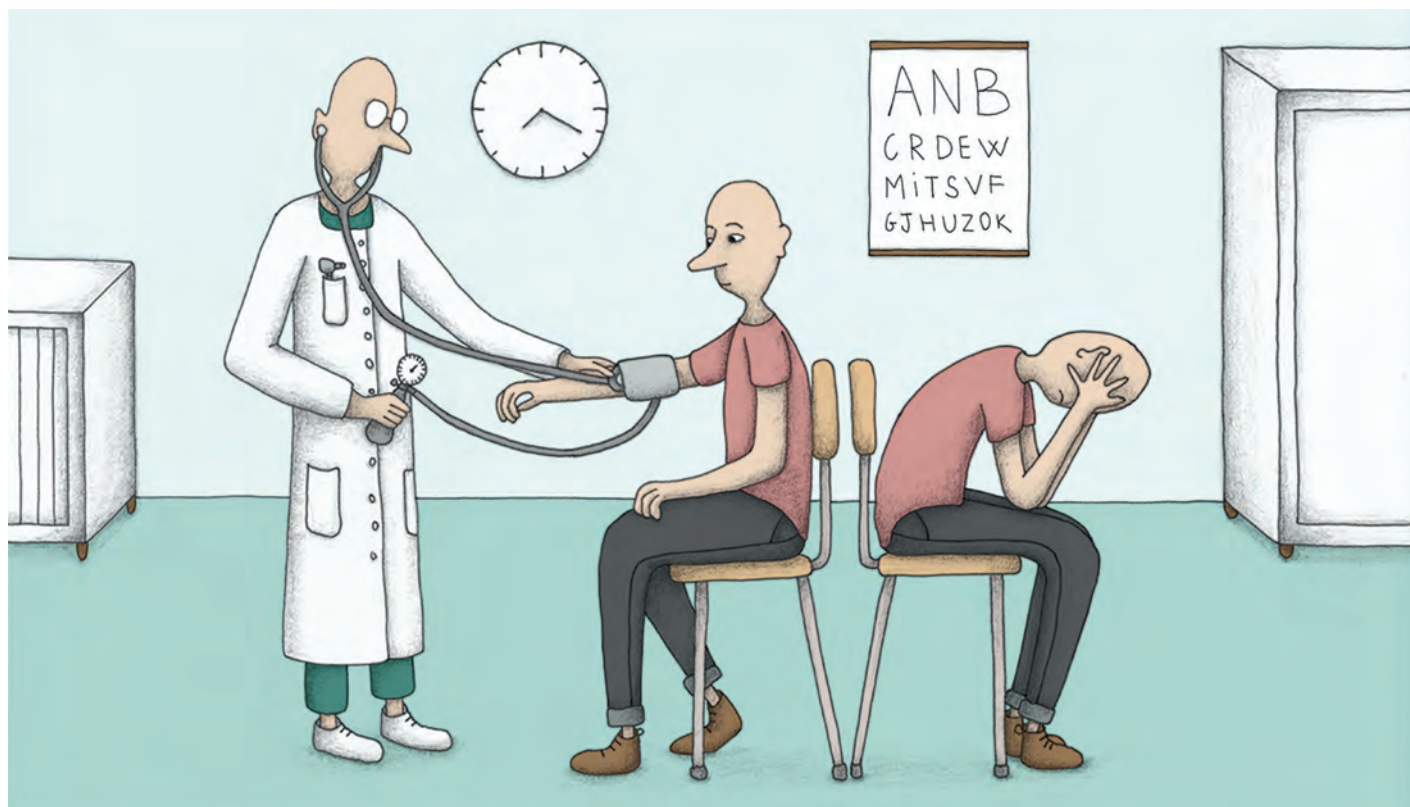
Cette réorganisation progressive concerne dans un premier temps les structures impliquées dans le traitement de l'information sensorielle liée à la douleur, puis atteint les zones en charge des émotions – le cortex pré-frontal, l'hippocampe ou encore l'amygdale. « La douleur s'inscrit dans le cerveau comme une mémoire, précise Ipek Yalcin. Preuve que ces modifications cérébrales sont profondes et durables : même lorsque l'on supprime la

douleur, l'état dépressif peut persister durant de nombreuses semaines chez les souris observées. » Mais le lien entre douleur et dépression ne fonctionne pas que dans un sens : la dépression aussi peut influencer sur la douleur. « On a affaire à un cercle vicieux », confirme Ipek Yalcin. Ainsi, les patients dépressifs auraient tendance à être plus sensibles à la douleur et à davantage développer des douleurs chroniques. « Les recherches des scientifiques sur le sujet sont toujours en cours. Chaque dépression est pour ainsi dire unique et il faut se garder de généraliser », nuance la chercheuse.



## Un symptôme de Parkinson

La maladie de Parkinson est bien connue pour ses symptômes moteurs : troubles du mouvement, tremblements, rigidité musculaire et troubles posturaux. Mais des symptômes non moteurs peuvent aussi se manifester, au premier rang desquels les troubles anxieux et la dépression. « Cela fait environ quinze ans que les chercheurs s'y intéressent, confirme Léon Tremblay, neurophysiologiste à l'Institut des sciences cognitives Marc Jeannerod<sup>2</sup> à Lyon, et spécialiste des ganglions de la base, une structure ...



... du cerveau impliquée dans cette maladie neurodégénérative. *On a d'abord pensé que les symptômes dépressifs étaient la résultante du stress induit par le handicap chez les patients parkinsoniens, mais on sait désormais qu'ils sont constitutifs de la maladie, au même titre que les troubles moteurs.* »

Le chercheur et son équipe ont été parmi les premiers à démontrer, en 2016, ce qui n'était jusque-là qu'une hypothèse : que deux populations neuronales distinctes situées dans les parties profondes du cerveau sont atteintes dans la maladie de Parkinson, à des degrés divers selon les malades. « *Le premier groupe de neurones, dit dopaminergique, produit et libère dans les ganglions de la base et les parties antérieures du cerveau un neurotransmetteur appelé dopamine, le deuxième groupe, dit sérotoninergique, libère la sérotonine dans les mêmes régions du cerveau,* détaille le scientifique. *Grâce à l'imagerie par émission de positons (TEP), nous avons montré que si le système dopaminergique est effectivement détérioré dans la maladie de Parkinson – un fait qui était déjà connu –, cette maladie neurodégénérative peut aussi atteindre de façon plus ou moins massive le système sérotoninergique.* » L'altération des fibres sérotoninergiques explique pourquoi les patients parkinsoniens chez qui des symptômes dépressifs ont été identifiés sont résistants aux traitements dits « inhibiteurs de la recapture de la sérotonine » (IRS), dont le célèbre Prozac®. « *Une fois le diagnostic correctement posé, des thérapies adaptées existent et sont à même de résoudre les deux types de symptômes, moteurs et non moteurs* », rassure Léon Tremblay.



## AVC et dépression, les liaisons dangereuses

Identifié il y a une vingtaine d'années environ, le lien entre accident vasculaire cérébral (AVC) et dépression est complexe. « *Il est aujourd'hui établi que les troubles de l'humeur sont un facteur de risque d'AVC, au même titre que la sédentarité, l'hypertension ou le cholestérol par exemple* », indique Igor Sibon, neurologue et chercheur à l'Institut de neurosciences cognitives et intégratives d'Aquitaine<sup>3</sup>, au sein de l'unité Neuro-imagerie et cognition. En cause, notamment : la surconsommation de tabac ou d'alcool chez certains sujets déprimés, et des comportements de prévention plus aléatoires – les traitements contre l'hypertension, le diabète, seront moins bien suivis. « *On sait aussi que l'un des neurotransmetteurs impliqués dans la dépression, la sérotonine, joue un rôle dans le fonctionnement des plaquettes sanguines impliquées dans la coagulation,* pointe Igor Sibon. *Il y aurait donc une communauté de voies biologiques entre troubles de l'humeur et survenue de l'AVC.* »

Mais le lien entre les deux affections n'est pas univoque : les personnes ayant subi un AVC ont également un risque plus fort de développer un trouble de l'humeur dans les mois qui suivent l'accident – un quart d'entre elles souffriraient de dépression sévère dans les trois mois. « *Or une dépression post-AVC, si elle n'est pas repérée et soignée, peut réduire l'efficacité des stratégies*



► La luminothérapie - dont l'exercice physique maximise l'efficacité - fait ses preuves pour régler les troubles du sommeil et certains troubles dépressifs.

3. Unité CNRS/Université de Bordeaux.



de récupération après l'accident, voire contribuer à l'apparition de troubles cognitifs comme le syndrome démentiel post-AVC », explique le scientifique, qui utilise la neuroimagerie pour mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre.

Son équipe s'intéresse tout particulièrement à la taille et à la localisation de la lésion. « Est-ce que certaines zones en particulier présentent plus de risques de déclencher une dépression ? Nous ne le pensons pas. Ce qui est en jeu ici, c'est davantage le réseau auquel la zone lésée appartient, et l'interruption que cela va créer dans ce circuit. » Un outil de détection précoce des symptômes de dépression post-AVC a également été développé et est actuellement en cours d'évaluation : grâce à ce questionnaire disponible sur smartphone et administré plusieurs fois par semaine, les scientifiques peuvent évaluer avec finesse l'état émotionnel du patient confronté aux événements de la vie quotidienne.



### Sommeil perturbé, danger

« L'intérêt porté aux liens entre sommeil et dépression est assez récent en France, affirme Patrice Bourgin, directeur du Centre des troubles du sommeil-Circsom à Strasbourg et chercheur à l'Inci. Mais aujourd'hui, il ne fait plus de doute que le sommeil est impliqué dans un certain nombre de troubles mentaux, dont la dépression. » Et ce, qu'il s'agisse de troubles du sommeil nocturne comme les insomnies de fin de nuit (4-5 heures du matin) associées à des chutes d'humeur, ou de troubles du sommeil de jour (sommolences, hypersomnie) associés notamment aux dépressions saisonnières.

Parmi les pistes suivies pour explorer ce lien complexe, le rôle joué par la lumière est au cœur des recherches du scientifique. « La lumière joue à plusieurs niveaux, explique Patrice Bourgin. Elle synchronise les rythmes et l'horloge interne ; elle influe sur la vigilance et sur l'éveil ; elle agit sur l'homéostasie du sommeil (c'est le fait d'accumuler de la "dette" » de sommeil durant le temps d'éveil qui nous permet de dormir la nuit suivante, NDLR) ; enfin, elle a des effets directs sur le système sérotoninergique, qu'on sait également très impliqué dans la dépression. »

Pour étudier le lien entre hypersomnie et dépression, les chercheurs étudient ainsi le fonctionnement de la rétine chez les patients en réaction à des ondes lumineuses de fréquences différentes. « Notre hypothèse, c'est que des anomalies de traitement du signal lumineux pourraient expliquer l'hypersomnie associée à la dépression », indique Patrice Bourgin. S'il reste encore beaucoup à apprendre sur le tryptique



lumière-sommeil-dépression, la luminothérapie fait d'ores déjà ses preuves pour régler certains troubles du sommeil, mais aussi, et c'est plus surprenant, un certain nombre de troubles dépressifs. « Les études montrent que la luminothérapie présente une efficacité comparable aux antidépresseurs pour traiter la dépression et que la combinaison des deux traitements est plus efficace que les antidépresseurs seuls », rappelle Patrice Bourgin, qui vient de signer avec Pierre-Alexis Geoffroy une vaste analyse sur le sujet. ||

# Vis ma vie de chevalier du XVI<sup>e</sup> siècle

SOCIÉTÉS



NUMÉRIQUE



**Histoire.** Ils ont marché deux jours dans les Alpes en armures d'acier ! Sur les traces de François 1<sup>er</sup> et de ses 40 000 soldats en 1515, des chercheurs ont reconstitué un épisode méconnu de la célèbre bataille de Marignan. Au générique de l'aventure : un historien passionné, une trentaine de volontaires, des biomécaniciens, des spécialistes d'imagerie 3D et l'un des derniers batteurs d'armure en France. Le but ? Estimer les contraintes de ces équipements de 40 kilogrammes sur le corps, et ce à 2 640 mètres d'altitude...

TEXTE PIERRE DE PARSCAU, AVEC LA RÉDACTION

PHOTO MEGAPIX/AILES, HELIATUS, BNF, MS FR 3021, F°7-8

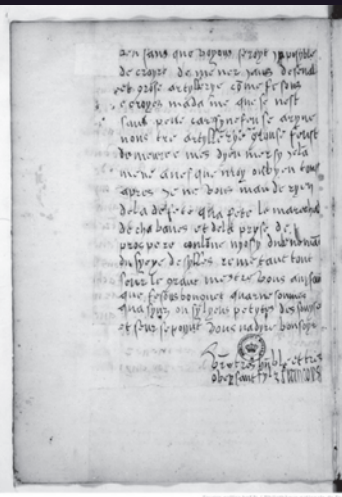






1. De gauche à droite, l'historien Stéphane Gal<sup>1</sup>, le mécène Cameron O'Reilly et le cycliste triple champion paralympique Patrick Ceria.

2. À l'origine de l'expérience, l'historien Stéphane Gal (à gauche sur la photo) est intrigué par une lettre du roi à sa mère. Celui-ci y indique que, craignant les embuscades, son équipage et lui « *portent le harnois parmi les montagnes* », c'est-à-dire avant de faire face à l'armée suisse sur le champ de bataille.



1. Laboratoire de recherche historique Rhône-Alpes (unité CNRS/ Univ. Lumière Lyon 2/Univ. Jean-Moulin Lyon 3/Univ. Grenoble-Alpes/ENS Lyon).





3

3. Décidé à expérimenter par lui-même cette traversée, à pied et à cheval, l'historien fait appel à l'un des derniers batteurs d'armure encore en activité en France. Il sera chargé de confectionner quatre spécimens en acier, fidèles au modèle du début du XVI<sup>e</sup> siècle.



4. Des mesures en imagerie 3D sont ensuite réalisées en laboratoire<sup>2</sup>, avec et sans ces armures de 40 kg, pour en estimer les contraintes biomécaniques sur le corps. Ces données, bien entendu inaccessibles à l'époque, permettent de quantifier la pénibilité du port de l'équipement.



5. Par exemple, certains mouvements sont modélisés en utilisant la technique de *motion capture* dans une salle spéciale à fond vert.



5

4

2. En collaboration avec le GipsaLab (unité CNRS/Grenoble-INP/Université de Grenoble Alpes), le HP2, Inria et le Labex ITEM.





6. Après presque deux ans de préparation, la trentaine de participants du projet March'Alpes s'est finalement lancée en juillet dernier à l'assaut du col de Mary, qui culmine à 2 641 mètres, pour une traversée de deux jours et 1 300 mètres d'ascension sur les hauteurs de Grenoble. Un itinéraire parallèle, un peu plus court que celui de François 1<sup>er</sup> en 1515.





6



7

7. Bilan de la première journée : éprouvante ! Les fréquents arrêts, pour que les cavaliers puissent descendre et remonter à cheval afin de franchir les torrents, occasionnent quelques chutes et blessures suivies en direct par les médecins et biomécaniciens de l'équipée.



8

8. Au final, franchir un col de montagne en armure, à 2 640 mètres d'altitude, c'est douloureux, mais faisable ! Les données à compiler permettront d'en savoir plus sur l'art militaire du XVI<sup>e</sup> siècle et la physionomie des hommes de l'époque qui, même plus aguerris à l'exercice, furent eux aussi mis à rude épreuve lors de cet épisode de l'Histoire.



Ce portfolio est tiré de la vidéo  
Vis ma vie de chevalier du XVI<sup>e</sup> siècle,  
à voir sur [cnrsljournal.fr](https://cnrsljournal.fr)



# *À l'assaut des grandes conjectures mathématiques*

NUMÉRIQUE ■

**Mathématiques.** De grandes questions résistent au temps et aux savants. En cette Année des mathématiques, *CNRS le Journal* s'est penché sur quelques-unes des conjectures les plus célèbres de l'histoire, dont certaines ne sont toujours pas démontrées mais continuent de stimuler la recherche.

PAR ANAÏS CULOT



► Visualisation de la conjecture de Syracuse. En partant du point central, le plan est parcouru en suivant une « spirale en carré ».

Elles existent par centaines, concernent l'ensemble des mathématiques et les plus mystérieuses d'entre elles s'appuient parfois sur un énoncé des plus simples : ce sont les conjectures, ces propositions qui ont de fortes probabilités d'être justes, mais que l'on n'arrive pas encore à démontrer ou réfuter. Pour y parvenir, les mathématiciens et mathématiciennes s'accordent à croire qu'il faut tout autant d'imagination que pour les concevoir, et beaucoup d'idées nouvelles. Mais de quoi est-il question exactement ? Quelle place occupent-elles dans les mathématiques ? Et quelles sont les retombées réelles des travaux autour de ces drôles d'objets ?

L'histoire de la discipline est jalonnée de conjectures emblématiques. « *J'ai trouvé une merveilleuse démonstration de cette proposition, mais la marge est trop étroite pour la contenir* », annoté ainsi Pierre de Fermat au XVII<sup>e</sup> siècle à la marge d'un livre<sup>1</sup>. La démonstration du dernier théorème de Fermat (Il n'existe pas de nombres entiers strictement positifs  $x$ ,  $y$  et  $z$  tels que :  $x^n + y^n = z^n$ , dès que  $n$  est un entier strictement supérieur à 2) n'arrivera pourtant qu'en 1994, grâce au mathématicien britannique Andrew Wiles. Mais le scientifique français était convaincu qu'un résultat pouvait être vrai même s'il n'était pas capable de le démontrer. « *La démonstration d'un théorème mathématique, sa preuve, est un enchaînement logique qui repose sur un système de déduction. Mais trouver une démonstration, et encore plus, formuler une conjecture, c'est l'imagination au pouvoir. Comment certains mathématiciens sont parvenus à une conjecture, cela s'apparente à un saut dans le vide* », décrit Martin Andler, professeur émérite au Laboratoire de mathématiques de Versailles<sup>2</sup>.

Le terme « conjecture » apparaît sous diverses formes au cours du temps et peut également être désigné comme « hypothèse ». Énoncer publiquement une conjecture est un acte majeur par lequel un mathématicien s'engage et décide de mettre une question sur le devant de la scène pour encourager ses collègues à y réfléchir. Une conjecture doit donc avoir du sens, être intéressante et mener à quelque chose. Mais qu'est-ce qui fait croire à un mathématicien que quelque chose est vrai sans démonstration ? Trois pistes principales : l'analogie, l'expérimentation et l'intuition. L'analogie consiste à identifier des similitudes entre deux problèmes et essayer d'appliquer ce qui fonctionne pour l'un à l'autre. Ou alors les mathématiciens réalisent des essais ou expériences d'où vont émaner des idées. Aujourd'hui, ils peuvent notamment utiliser le calcul sur ordinateur pour valider leur intuition.

Les conjectures sont-elles pour autant inaccessibles aux non-initiés ? Si leur résolution peut parfois prendre des centaines d'années, la compréhension de certains énoncés est à la portée de tous. C'est le cas de la

conjecture de Syracuse, du nom de l'université américaine où le problème posé par Lothar Collatz dans les années 1930 a été diffusé. La suite de Collatz, devenue suite de Syracuse, est une suite d'entiers naturels définie ainsi : partons d'un nombre entier supérieur à 1. S'il est impair : le multiplier par 3 et ajouter 1 ; s'il est pair : le diviser par 2. En répétant l'opération à l'infini, on obtient une suite d'entiers positifs dont chacun ne dépend que de son prédécesseur. Exemple : en partant de 5 (impair) on le multiplie par 3 et on ajoute 1, ce qui donne 16 (pair) puis 16 divisé par 2 donne 8, puis 4, puis 2, puis 1 et à nouveau 4, 2, 1, etc. Jusqu'à présent, les mathématiciens n'ont identifié aucun nombre, aussi grand soit-il, qui ne mène pas à la série 4, 2, 1. La conjecture de Syracuse est donc l'hypothèse selon laquelle la suite de Syracuse de n'importe quel entier strictement positif atteint 1. Mais cela est-il vrai pour tout nombre de départ ? Telle est la question à laquelle les scientifiques veulent répondre pour démontrer cette conjecture.

### Des sommets à gravir ensemble

« *Dans le massif montagneux des mathématiques, les conjectures sont des sommets à atteindre, mais pour y parvenir il faut se frayer un chemin et acquérir la connaissance la plus fine de tout ce qui se trouve sur sa route* », énonce Emmanuel Royer, directeur adjoint scientifique à l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (Insmi) du CNRS. ...

Le professeur Andrew Wiles, qui a prouvé le dernier théorème de Fermat, lors d'une conférence le 23 juin 1993 à l'Université de Cambridge. Ce théorème avait confondu les mathématiciens pendant plus de trois cents ans.



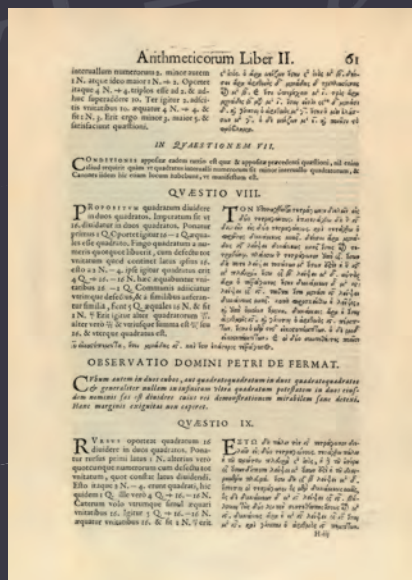
© SCIENCE PHOTO LIBRARY / PROFESSOR PETER GODDARD

1. Annotation manuscrite dans *Les Arithmétiques* de Diophante d'Alexandrie (III<sup>e</sup> siècle). 2. Unité CNRS/Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines.

© TIMBRE-POSTE DÉSSINÉ ET GRAVÉ PAR ANDRÉ LAVERGNE / LA POSTE 2020



Timbre-poste représentant le mathématicien français Pierre de Fermat et son « dernier théorème », émis par La Poste en 2001, en commémoration du 400<sup>e</sup> anniversaire de sa naissance.



Page des *Arithmétiques* de Diophante d'Alexandrie. Il s'agit de l'édition de 1670, publiée à Toulouse, par le fils de Fermat, contenant des annotations du mathématicien dans le texte. C'est à la marge d'une telle page que Fermat commença à inscrire sa démonstration, mais il ne put aller au bout, faute de place.



© SCIENCE PHOTO LIBRARY / NATIONAL PHYSICAL LABORATORY / CROWN COPYRIGHT

**LES 23 PROBLÈMES DU XX<sup>e</sup> SIÈCLE**

Les 23 problèmes du XX<sup>e</sup> siècle, ou problèmes de Hilbert, sont des questions non résolues en 1900, que David Hilbert, mathématicien allemand, estimait d'une importance capitale pour le XX<sup>e</sup> siècle. La plupart sont aujourd'hui démontrés, mais cinq sont encore l'objet de recherches.

... Les conjectures seraient ainsi des « phares » qui guident les mathématiciens, à l'image du théorème de Fermat démontré par Wiles, plus de trois cents ans après la note du scientifique français. « *Quand le théorème a été démontré, certains chercheurs ont été déçus car c'était la fin d'un puissant moteur à la construction de théories mathématiques* », raconte Martin Andler. Certaines conjectures résistent aux siècles et aux tentatives conjuguées des génies successifs. La recherche de solutions devient alors un incroyable effort collectif, s'apparentant à un relai à travers les siècles. Un seul mathématicien parcourt le « dernier mètre », mais avec le témoin transmis par ses prédécesseurs.

Au-delà de leur utilisation dans les mathématiques, les résultats paraissent déconnectés de toute application concrète. Toutefois, la réponse négative apportée par Alan Turing et Alonzo Church dans les années 1930 à l'un des 23 problèmes du XX<sup>e</sup> siècle proposés en 1900 par le mathématicien allemand David Hilbert – le problème de la décision –, s'est révélée cruciale pour poser les bases théoriques de l'informatique. Quant au théorème de Fermat, qui appartient au domaine mathématique de la théorie des nombres, il a fourni les méthodes les plus efficaces de cryptographie actuelle.

Alors quel sort pour une conjecture ? Elle peut être tranchée comme étant vraie ou fausse mais pas uniquement. En 1931, le jeune mathématicien allemand Kurt Gödel démontre qu'il existe des énoncés indécidables, c'est-à-dire que l'on ne peut ni confirmer ni infirmer. Un tournant dans l'histoire de la logique.

D'autres conjectures connaissent un dénouement heureux bien que tardif, comme celle de Poincaré.

**Poincaré, de la conjecture au théorème**

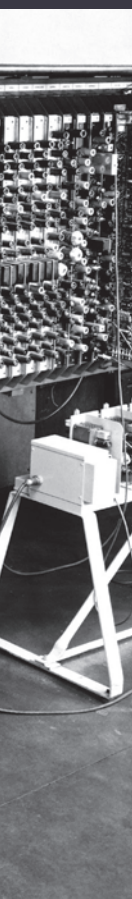
En 1904, le mathématicien français Henri Poincaré propose une caractérisation de la sphère en trois dimensions. « *Il y a eu une vingtaine de tentatives publiées par des mathématiciens prétendant dans la moitié des cas qu'elle était vraie et dans l'autre, qu'elle était fausse. Toutes ces tentatives ont échoué* », décrit Gérard Besson, mathématicien à l'Institut Fourier<sup>3</sup>.

Il faut attendre 1982 et le mathématicien américain William Thurston, qui inscrit la question de Poincaré dans une conjecture plus vaste. Il explique comment devraient être tous les objets géométriques à trois dimensions et non plus seulement la sphère. Cette piste accélère la course à la résolution. L'Américain Richard Hamilton fait une avancée importante en introduisant une nouvelle

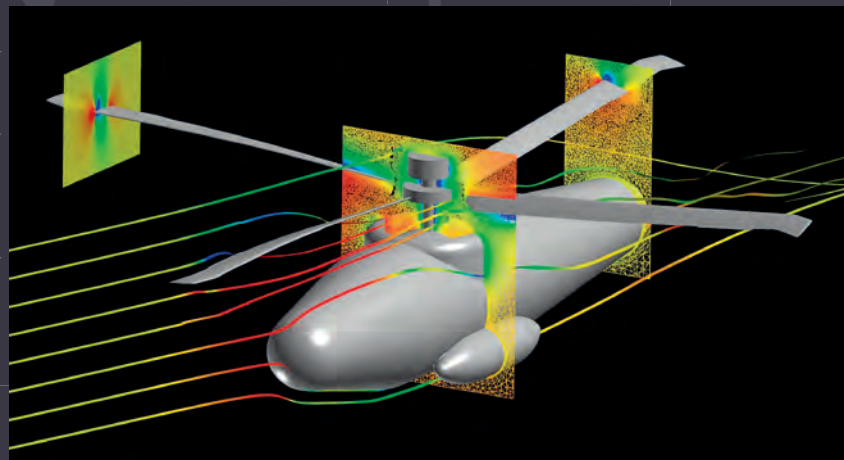
3. Unité CNRS/Université Grenoble-Alpes.



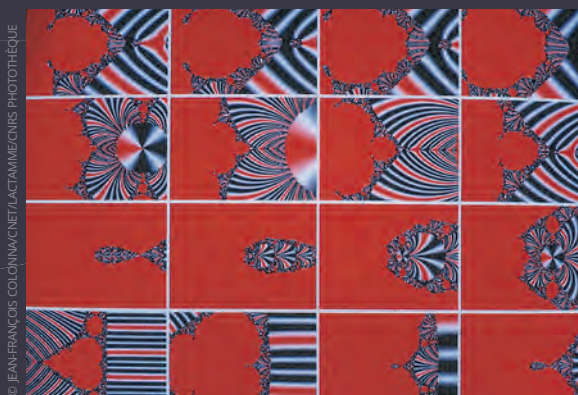
Contrôleuse exploitant le modèle pilote de moteur de calcul automatique (ACE). Il s'agissait d'une version préliminaire, proposée par l'informaticien et mathématicien britannique Alan Turing (1912-1954). Le Pilot ACE est le descendant des recherches de David Hilbert.



© SCIENCE PHOTO LIBRARY / LANGLEY (ELIZABETH LEE-RAUSCH), MICHAEL PARR / NASA



Simulation par supercalculateur du système de rotor d'un hélicoptère, utilisée pour résoudre des problèmes aérodynamiques complexes faisant référence aux équations de Navier-Stokes. Celles-ci continuent de défier les mathématiciennes et mathématiciens.



Construction d'un ensemble fractal par itération de la fonction zêta de Riemann. L'hypothèse de Riemann ne fait toujours pas consensus.

### LES SEPT PROBLÈMES DU MILLÉNAIRE

En 2000, le Clay Mathematics Institute présente au Collège de France sept problèmes majeurs des mathématiques, qui sont des défis à la communauté scientifique. Chacun est doté d'un prix d'un million de dollars. Parmi eux, la conjecture de Poincaré, démontrée par Perelman, ou le problème inspiré par les équations de Navier-Stokes.

méthode en 1983. C'est finalement le Russe Grigori Perelman qui, en 2003, annonce qu'il a franchi la dernière étape. Il met sept ans pour rédiger une démonstration pleine d'ellipses et particulièrement difficile à appréhender pour ses relecteurs. Au moins quatre groupes s'attellent à la vérification, qui dure également sept ans : un en Chine, deux aux États-Unis et une équipe franco-espagnole dont a fait partie Gérard Besson. « *Sentir que nous allions être capables de comprendre les méthodes pour résoudre la célèbre conjecture de Poincaré était attirant. À certains moments nous avons douté de la solution proposée par Perelman mais il avait identifié tous les pièges. Je suis assez admiratif de son travail* », ajoute le chercheur.

Le mathématicien russe refuse la médaille Fields en 2010, ainsi que le prix d'un million de dollars attribué par l'Institut Clay pour avoir résolu un des « sept problèmes du millénaire ». Puis il se retire de la communauté mathématique. Son prix sert néanmoins au financement d'une chaire à l'Institut Henri Poincaré. « *Son objectif est d'offrir à des jeunes chercheurs promis à un grand avenir des moyens pour séjourner six mois dans un environnement mathématique d'excellence à Paris* », explique Sylvie Benzoni, directrice de l'Institut<sup>4</sup>. À raison de deux lauréats par an, ces bourses soutiennent les projets de jeunes

mathématiciens et mathématiciennes spécialistes de divers domaines allant de la géométrie aux probabilités, en passant par l'étude des systèmes dynamiques. Si le résultat de Perelman n'a pas eu de conséquences au-delà des mathématiques, la méthode introduite par Hamilton a trouvé un écho dans le débruitage des images en informatique (c'est-à-dire l'élimination des informations parasites ou des dégradations subies par l'image, NDLR). Désormais, les mathématiciens s'interrogent sur les objets fermés en dimension 4, catégorie qui pourrait permettre de caractériser l'Univers.

### L'hypothèse de Riemann résiste à tous les assauts

« *Souvent en théorie des nombres, ce n'est pas le dernier pas qui manque, mais le premier*, confie Gérald Tenenbaum, professeur émérite à l'Université de Lorraine. *Dans le cas de l'hypothèse de Riemann, on se fonde parfois sur des analogies mais il n'y a pas l'embryon d'une véritable stratégie.* » Au cœur de la conjecture datant de 1859 se trouvent les nombres premiers, qui ont la propriété de n'être divisibles que par eux-mêmes et par 1, comme 13. Les mathématiciens cherchent à décrire la répartition de ces nombres dans l'ensemble de tous les nombres entiers. Pour résoudre ...

4. Unité CNRS/Sorbonne Université.

... ce problème, Riemann a utilisé la définition de la fonction « zêta », déjà considérée par Euler au XVIII<sup>e</sup> siècle, et a montré qu'elle permet de décrire très précisément la fréquence d'apparition des nombres premiers.

Cependant, cette conjecture ne fait pas consensus. « *Beaucoup de travaux de recherche s'appuient sur l'hypothèse comme point de départ. Les résultats obtenus sont donc conditionnels. La conjecture possède de nombreuses conséquences remarquables et il suffirait évidemment d'en infirmer une pour la réfuter* », ajoute Gérald Tenenbaum. Si elle était fautive, un grand nombre de théorèmes conditionnels tomberaient forcément à l'eau. Toutefois, même réfutée, l'hypothèse refléterait sans doute une image extrêmement proche de la réalité. Car en parallèle, plus de 10 000 millions de valeurs ont été vérifiées numériquement et sont en accord avec l'hypothèse. Pour la communauté mathématique, cependant, ce sont des indices, pas des preuves !

### L'informatique en renfort

La validation pourrait-elle être apportée par le domaine émergent des preuves assistées par ordinateur ? Ces outils informatiques, comme par exemple le système français Coq<sup>5</sup>, permettent d'écrire et de vérifier des preuves, et apportent des garanties de correction dans des domaines où ces preuves deviennent compliquées. Ils ont montré leur efficacité en 2010 sur le théorème des quatre couleurs, une conjecture ayant eu beaucoup de démonstrations fausses. Ce théorème affirme qu'il est possible, en n'utilisant que quatre couleurs différentes, de colorier n'importe quelle carte découpée en régions connexes, de sorte que deux régions adjacentes aient toujours une couleur différente.

Grâce à ces outils, une de ces démonstrations, annoncée en 1976, qui reposait sur des arguments mathématiques et plusieurs milliers de cas calculés pour la première fois par ordinateur, a pu être finalement acceptée. Le problème de la démonstration du théorème avait alors été déplacé vers le problème de la validation : d'une part de l'algorithme d'exploration, d'autre part de sa réalisation sous forme de programme. « *Le challenge de vérifier un théorème sur ordinateur est à la fois de vérifier les raisonnements mathématiques logiques mais aussi les calculs afin de garantir qu'ils répondent à des règles logiques* », décrit Christine Paulin-Mohring, chercheuse au Laboratoire de recherche en informatique<sup>6</sup>.

### L'équation de Navier-Stokes, une question ouverte

En plus des conjectures, les mathématiques sont animées par de nombreuses questions ouvertes comme celles qui concernent l'équation de Navier-Stokes établie au XIX<sup>e</sup> siècle et qui est à la base de l'un des problèmes du millénaire. Elle a pour objectif principal de décrire le mouvement des fluides, qu'il s'agisse d'un fluide

visqueux comme de l'huile, ou qu'il s'agisse d'eau ou d'air. Et pour décrire correctement un fluide en mouvement, il faut connaître sa vitesse en tout point de l'espace. Il s'agit donc d'une équation différentielle, dont le champ de la vitesse est l'inconnue, mais également dite « non linéaire » : les conditions varient en fonction du fluide étudié qui peut être soumis à des turbulences (comme le passage d'un avion dans l'air). « *Il y a tellement de questions intéressantes autour de ce sujet que l'on peut y passer beaucoup de temps sans résoudre la question importante. Ce n'est d'ailleurs pas possible d'y répondre directement et il faut l'aborder par d'autres biais* », témoigne la mathématicienne Isabelle Gallagher du Département de mathématiques et applications de l'ENS<sup>7</sup>. Les équations de Navier-Stokes sont pourtant largement utilisées dans la modélisation de phénomènes météorologiques, pour étudier les courants océaniques, ou encore en aérodynamique.

La différence entre une conjecture et une question ouverte est que, dans le premier cas, la réponse attendue est précise, alors que dans le second, l'incertitude est plus grande. Une réponse ouvrirait de nouvelles pistes qui pourraient mener un jour à une nouvelle conjecture. Et si résoudre une conjecture s'apparente à une fascinante aventure, c'est parce qu'une fois que les mathématiciens ont atteint leur but, ils peuvent alors mesurer l'étendue de leur longue expédition et entamer la prochaine. ||

## Une année de mathématiques 2019-2020

Lancée dans le sillage des 80 ans du CNRS, en octobre 2019, et en partenariat avec le ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse, l'Année des mathématiques porte plusieurs messages : les mathématiques sont une science vivante, omniprésentes dans la société ; une formation en mathématiques mène à de nombreux métiers ; l'enseignement des mathématiques doit redevenir un métier attractif ; les mathématiques ne sont pas réservées aux garçons !

Le CNRS propose aujourd'hui des actions pour la formation en mathématiques. Avec l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (Insmi), l'organisme s'implique notamment dans des formations destinées aux enseignants du secondaire et dans l'organisation d'événements tout public.

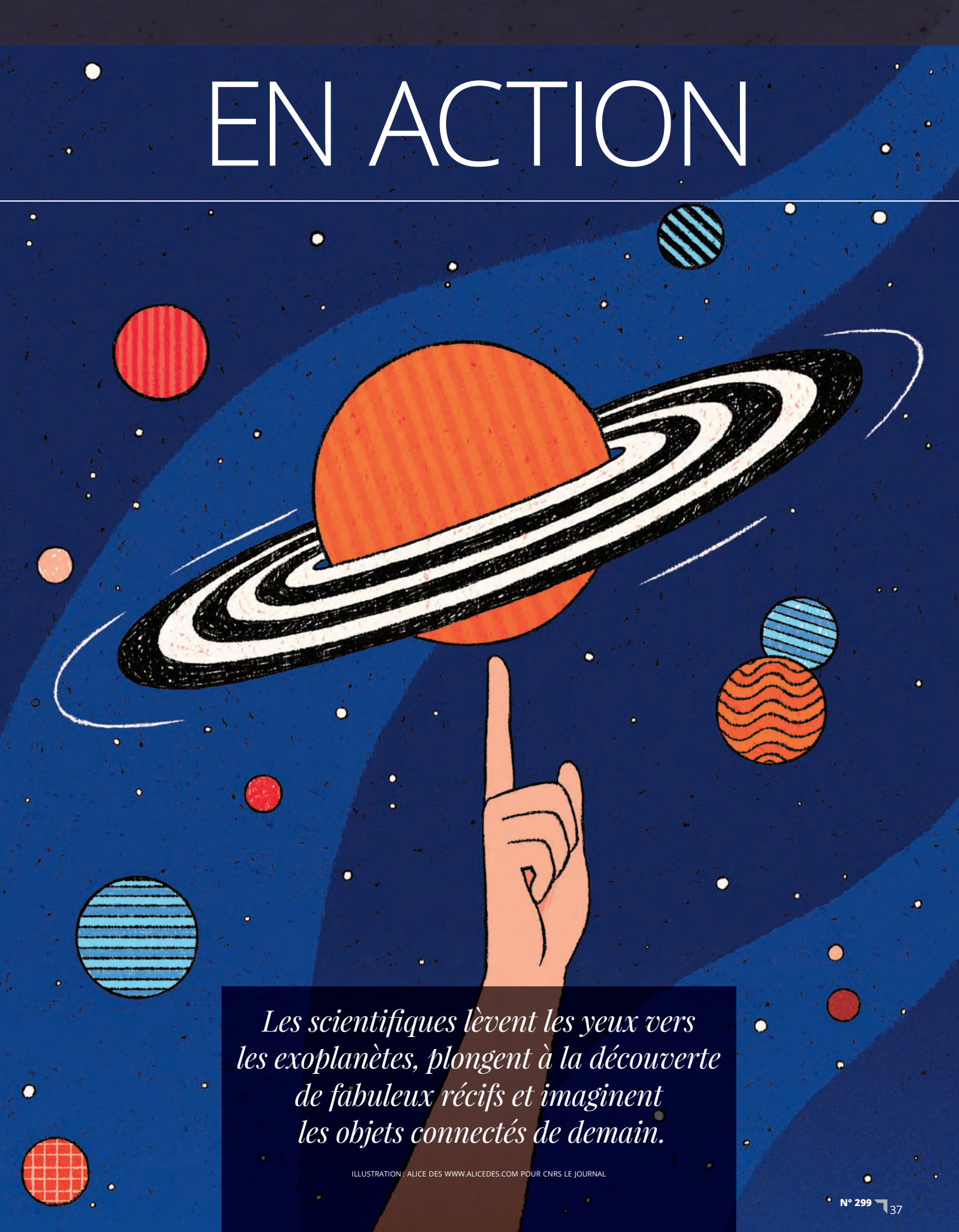


Pour en savoir plus : <http://annee.math.cnrs.fr>

5. Coq : assistant de preuve développé par Inria au sein du laboratoire Preuves, Programmes et Systèmes, aujourd'hui Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/Université de Paris). 6. Unité CNRS/Université Paris-Saclay. 7. Unité CNRS/ENS Paris.



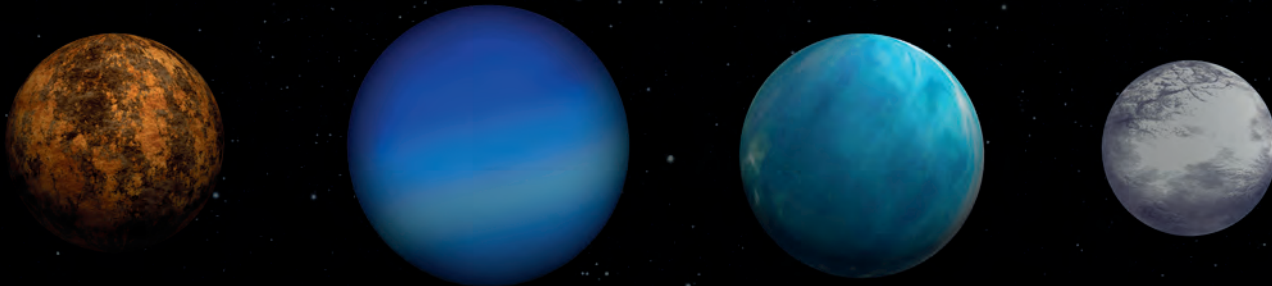
# EN ACTION



*Les scientifiques lèvent les yeux vers les exoplanètes, plongent à la découverte de fabuleux récifs et imaginent les objets connectés de demain.*

ILLUSTRATION : ALICE DES WWW.ALICEDES.COM POUR CNRS LE JOURNAL

# Cheops, le profileur d'exoplanètes



UNIVERS

**Astronomie.** Vingt-cinq ans après la découverte de la première planète extrasolaire, le télescope spatial Cheops, lancé le 18 décembre dernier, doit enfin permettre aux chercheurs de déterminer la nature de ces exoplanètes.

PAR VAHÉ TER MINASSIAN

La mission Cheops<sup>1</sup>, partie en décembre à bord d'une fusée Vega depuis la base de Kourou (Guyane), marque une nouvelle étape dans la recherche sur les exoplanètes. Depuis l'orbite où il sera positionné à 700 kilomètres (km) d'altitude, ce petit télescope spatial de l'Agence spatiale européenne (ESA) et du Bureau spatial de la Suisse mesurera, avec une précision inédite, la taille de ces astres. Son double objectif sera d'en apprendre un peu plus sur la composition rocheuse, gazeuse, voire glacée ou océanique de ces corps célestes ; et déblayer ainsi le terrain pour les instruments qui les étudieront en détail dans les années à venir !

Cette mission a ceci de remarquable qu'elle coïncide, à quelques semaines près, avec l'attribution, le 8 octobre 2019, du prix Nobel de physique à deux astronomes de l'Observatoire de Genève, pour la découverte – par la méthode des vitesses radiales –, de la première exoplanète. En 1995, Michel Mayor et Didier Queloz – qui préside le conseil scientifique de Cheops – analysent la lumière de l'étoile 51 Peg à l'aide du spectromètre Élodie de l'Observatoire de Haute-Provence. Ils mesurent des

► L'analyse des données de Cheops permettra par exemple de savoir si une exoplanète est constituée (de gauche à droite) de roches, de gaz, d'eau ou de glace.

variations périodiques de vitesse indiquant la présence d'un énorme objet qui perturbe le mouvement de l'astre : une planète géante dont ils réussissent à calculer la masse (la moitié de celle de Jupiter) et la période orbitale (4,2 jours). Cette première détection marque les débuts d'une toute nouvelle discipline : l'exoplanétologie, dont la mission Cheops est le dernier avatar.

## Après la détection, la caractérisation

Cheops a notamment pour objectif d'affiner les observations réalisées depuis un quart de siècle par les astronomes. En effet, depuis la détection de 1995, plus de 4 000 exoplanètes ont été découvertes, bouleversant ce qu'on imaginait sur la diversité de ces objets dans l'Univers et sur la manière dont se forment et s'organisent les systèmes solaires.

Les chercheurs ne savent cependant presque rien sur la nature et les propriétés de ces planètes mises au jour par centaines, dont les masses s'échelonnent entre celle de la Terre et celle de Neptune. Ces « super-Terre » ou « mini-Neptune » – qui n'ont aucun équivalent dans notre

1. Characterising ExoPlanets Satellite – Satellite de caractérisation des exoplanètes.



système solaire –, sont-elles faites de fer, de roches silicatées ou de glace ? Possèdent-elles des atmosphères ? Et si oui, quelle est leur composition ? Sont-elles totalement recouvertes d'océans ? Les scientifiques disposent encore de trop peu d'indices pour répondre à ces questions. Pour espérer élucider leur composition, ils auraient besoin de connaître la densité moyenne de ces corps afin de la confronter aux modèles de structure interne de planètes.

### Établir une liste de « super-Terre »

Malheureusement, les catalogues établis jusqu'ici fournissent rarement cette information. En effet, la densité d'un astre n'est pas une grandeur directement mesurable. Elle doit être calculée en combinant des informations sur sa masse et sur son rayon qui sont récoltées indépendamment l'une de l'autre, et selon deux techniques différentes : la méthode des vitesses radiales et la méthode des transits. Or, ces techniques ne peuvent généralement pas être appliquées aux mêmes astres. En effet, « les exoplanètes dont on a établi la masse par la technique des vitesses radiales orbitent toutes autour d'étoiles brillantes (généralement proches), alors que celles dont on a mesuré le rayon avec la méthode dite des transits sont généralement associées à des étoiles beaucoup moins brillantes (donc plutôt éloignées) », explique Willy Benz, professeur à l'Université de Berne (Suisse) et responsable de la mission Cheops.

Tout comme CoRoT (Centre national d'études spatiales – ESA et partenaires), Kepler (Nasa), TESS (Nasa) et bientôt PLATO (ESA), ce satellite scrutera les étoiles afin de mesurer des baisses de luminosité provoquées par le

#### LA MÉTHODE DES VITESSES RADIALES

Cette méthode mesure par spectroscopie Doppler le léger mouvement d'oscillation de l'étoile que provoque la masse d'une planète orbitant autour d'elle.

#### LA MÉTHODE DES TRANSITS

Cette méthode évalue le rayon de la planète à partir de la baisse de luminosité observée de l'étoile lorsque la planète lui « passe devant ».

▲ Le télescope de prochaine génération James Webb est équipé d'un miroir en or à 18 segments, ici déployé dans une salle blanche du Goddard Space Flight Center de la Nasa à Greenbelt (Maryland, États-Unis).

transit ou passage périodique de planètes sur sa ligne de visée. Toutefois, à la différence de ces télescopes spatiaux, son objectif ne sera pas de détecter de nouvelles planètes. Mais plutôt d'en observer certaines déjà connues et proches pour en déterminer le rayon avec une précision de l'ordre de 10 %. Avec un espoir : constituer une liste d'une cinquantaine de « super-Terre », toutes parfaitement décrites en termes d'orbite, de masse, de diamètre et de densité. Et ainsi fournir aux spécialistes un échantillon d'une taille suffisante pour leur permettre d'avancer dans la compréhension de ces objets.

Durant les trois à cinq années que doit durer la mission, le télescope spatial surveillera aussi une série de systèmes solaires détectés par la méthode des vitesses radiales afin de déterminer s'ils comptent des planètes en transit. Une pareille configuration est rare, puisqu'elle implique que la planète croise notre ligne de visée de l'étoile. Mais, explique Xavier Bonfils, chargé de recherche CNRS à l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble<sup>2</sup> : « lorsqu'elle intervient sur des étoiles proches et brillantes, elle fait de ces exoplanètes des cibles sur lesquelles on peut facilement mesurer les propriétés physiques et la composition atmosphérique ».

### Mesurer la température, trouver des anneaux

Les astronomes espèrent ainsi découvrir une demi-douzaine de systèmes à même d'être observés par les télescopes de la prochaine génération : qu'il s'agisse du James Webb (Nasa-ESA-Agence spatiale canadienne), dont la mise en service est prévue en 2021, ou du E-ELT (European Southern Observatory) attendu en 2025. Enfin, précise Magali Deleuil, professeure au Laboratoire d'astrophysique de Marseille<sup>3</sup> : « Cheops cherchera à mesurer la température de la haute atmosphère des "Jupiter chauds" et à détecter la présence éventuelle de lunes et d'anneaux associés à des exoplanètes ».

Financée par l'ESA dans le cadre de son programme Cosmic Vision (2015-2025), Cheops a été développé, sous la responsabilité de la Suisse, par un consortium d'une dizaine de pays dont la France. Cette dernière n'est pas intervenue dans la conception du télescope d'un mètre ultrasensible qui équipe le satellite de 250 kilogrammes. Mais elle a fourni, par le truchement de l'équipe de Magali Deleuil, le logiciel de traitement des données qui sera employé, à Genève, par le Centre des opérations scientifiques de cette mission dite de type « S » (Small). Elle participe aussi à la définition des cibles. Certaines, comme 55 Cancri, promettent déjà de faire couler beaucoup d'encre. Ce système fait de deux étoiles compte au moins cinq planètes dont l'une serait une « super-Terre » rocheuse. Reste à le vérifier. Ce que fera Cheops. ||



© NASA/DESIREE STOVER

# À la recherche des musées de demain

SOCIÉTÉS  NUMÉRIQUE 

**Muséographie.** Accueil des publics, conservation, médiation... Comment les recherches scientifiques peuvent-elles façonner les grandes tendances muséales de demain ?

PAR SOPHIE FÉLIX

« La recherche peut accompagner la réflexion sur la médiation, c'est même un chantier énorme ! », s'enthousiasme Didier Michel, directeur de l'Association des musées et centres pour le développement de la culture scientifique, technique et industrielle (Amcsti), un réseau professionnel national. Un défi relevé par plusieurs équipes de recherche et start-up du CNRS, qui étaient présentes au Salon international des techniques muséographiques (Sitem) dont la 24<sup>e</sup> édition s'est tenue à Paris du 28 au 30 janvier.

## Maintenir le lien avec les publics

Le tourisme culturel est un secteur dont la santé reste « solide mais impactée ponctuellement par le contexte général », explique Anne-Solène Rolland, cheffe du Service des musées de France au ministère de la Culture. Malgré un certain recul pour l'année 2019, la France demeure le troisième pays européen en termes de fréquentation de musées, avec 65 millions de visiteurs par an, derrière l'Allemagne et le Royaume-Uni. « Et le Louvre reste le musée le plus fréquenté au monde, avec plus de 10 millions de visiteurs en 2018 ! », assure Anne-Solène Rolland.

Selon elle, deux axes de collaboration sont aujourd'hui bien ancrés entre le monde de la recherche et les musées : des projets de recherche construits en commun autour des collections, dans lesquels « les sciences "dures" apportent à nos musées des compétences qui y sont absentes », et des musées qui accueillent des équipes de recherche, permettant de « créer une culture commune ». L'étude socio-économique des publics constitue un troisième axe « fructueux pour mieux connaître et comprendre les usages des visiteurs ». « Cela nourrit nos choix en matière de médiation, de dispositifs techniques ou muséographiques, confirme Anne Krebs, qui dirige le service Études et recherche du musée du Louvre. Nous entretenons aussi des partenariats de

recherche, notamment sur les pratiques réelles et virtuelles des visiteurs. »

Car les nouvelles technologies remanient les centres culturels et scientifiques : « Les deux tendances clés actuelles sont les escape games et les réalités virtuelle et augmentée, analyse Didier Michel. Les premiers permettent un degré d'engagement plus important du public mais les secondes mettent du temps à se développer, peut-être par manque de moyens et de contenus de qualité. La réalité virtuelle isole aussi le visiteur, ce qui va à l'encontre de la dimension de sociabilisation des musées. »

## Les musées en demande

Un isolement que rejette également Sébastien de Pertat, co-concepteur de LoSonnante, un dispositif d'écoute innovant qui a d'ailleurs été récompensé au Sitem. En posant leurs coudes sur un boîtier renfermant l'appareil et leurs mains sur leurs oreilles comme des écouteurs, les utilisateurs peuvent entendre, et expérimenter ensemble, un contenu sonore propagé par vibrations osseuses jusqu'à leur oreille interne. Cette « expérience sensible » permet aussi de s'adresser à certains publics malentendants et de gérer la pollution sonore des espaces. « Avec leurs problématiques en termes d'équipements sonores, les musées

► Le boîtier LoSonnante, dispositif d'écoute innovant, installé sur le belvédère Vauban à Grenoble (octobre 2017).



© T. BONNEFANT, S. DE PERTAT





© CHRISTIAN DURV/CNRS

► Au Sitem 2020, les visiteurs ont pu expérimenter les tableaux sonores de Mylène Pardoën et plonger dans l'ambiance parisienne du XVIII<sup>e</sup> siècle.

© CLARE LIEE HAN ET/MUSÉE DU LOUVRE-LENS/IKONIKAT/ CNRS PHOTO THÉRIQUE



sont vite apparus comme des partenaires évidents, confirme l'ingénieur d'études au laboratoire Pacte<sup>1</sup>. « Il y a une forte demande de la part des professionnels, corrobore Didier Michel, car la recherche peut produire de la connaissance sur les dispositifs, donc les usages, de demain. »

À la Maison des sciences de l'Homme Lyon Saint-Étienne<sup>2</sup>, Mylène Pardoën reconstitue les sons du passé, comme les théâtres du XVIII<sup>e</sup> siècle de la Foire Saint-Germain à Paris. « J'ai créé ma discipline, qui mélange sciences humaines, informatique et acoustique, car j'ai détecté une inadéquation entre la simple ambiance proposée par un compositeur de musique et la mission principale des musées : mettre à disposition du grand public une Histoire qui s'appuie sur des concepts scientifiques valides. Avec nos outils, nos pratiques scientifiques, nous pouvons apporter une réponse plus adaptée ». Pour elle, « il est essentiel que les scientifiques participent à l'évolution des musées », ce qui nécessite un dialogue entre différents métiers et de nouvelles compétences.

### Une démarche à construire ensemble

Procédé inédit de réalité augmentée et d'annotation graphique, l'outil Ikonikat aide ainsi à optimiser la muséographie aussi bien qu'à comprendre les attentes et réactions du public : le visiteur désigne sur une tablette les éléments d'une œuvre qui lui paraissent pertinents. Il contribue donc à la collecte de données et d'informations, une démarche dite de « science participative », et aide à constituer le savoir scientifique diffusé dans l'exposition.

► Un visiteur analyse le tableau *Famille de paysans de Louis Le Nain (vers 1642)* au musée du Louvre-Lens, avec l'application Ikonikat. À l'aide d'une tablette, il marque du doigt les zones significatives, selon lui, du tableau.

Aujourd'hui, la « recherche participative » va encore plus loin : les citoyens contribuent aussi à la définition de la question de recherche, à l'analyse des données et à la diffusion des résultats. « Ces tendances se retrouvent dans toute l'Europe, où les centres de science et les musées partagent les mêmes enjeux, avec seulement une variation d'intensité, complète Didier Laval, spécialiste de la démarche Living Lab appliquée aux acteurs culturels. Dans le monde anglo-saxon, la question de l'inclusion est devenue une priorité : les musées créent des offres pour et avec des populations jusque-là peu écoutées, privées d'accès à la culture, en allant les voir pour recréer du lien social. »

Mais recherche et médiation ont parfois du mal à communiquer. « La démarche des musées peut être en décalage avec la recherche, détaille Sébastien de Pertat. Ils doivent notamment avoir le souci de la gestion de flux de visiteurs et ont besoin de dispositifs simples, fonctionnels et robustes. Il serait intéressant de travailler sur le long terme avec un musée pour développer des appareils spécifiques. » Une approche encore rare, les centres culturels étant plutôt en attente d'une sollicitation de la part de scientifiques venant avec leur recherche et leur financement. « Les chercheurs et chercheuses peuvent trouver au musée un fort intérêt pour leurs travaux et un public disponible pour des expériences, confirme Didier Michel. Dix-sept millions de personnes viennent chaque année visiter nos structures. Mais comment aller chercher les 30 ou 40 millions de Français manquants : quels dispositifs et quels types d'usage les attireront ? Nous avons besoin de collaborer avec des scientifiques pour explorer ce champ d'investigation. » ||

1. Unité CNRS/Université Grenoble-Alpes/Sciences Po Grenoble. 2. Unité CNRS/ENS Lyon/Sciences Po Lyon/Univ. Jean-Moulin Lyon 3/Univ. Lumière Lyon 2/Univ. Jean-Monnet/Univ. Claude-Bernard Lyon 1.

# L'étonnant récif de l'Amazonie

VIVANT 

**Biologie.** Découvert il y a peu, ce récif sous-marin situé à une centaine de kilomètres des côtes guyanaises jouit d'une exceptionnelle biodiversité, comme ont pu le constater les scientifiques qui ont embarqué à bord du navire *l'Esperanza* de Greenpeace.

PAR LAURE CALLOCE

Il n'y a pas que la forêt en Guyane, ses centaines d'espèces d'arbres, sa faune foisonnante... Au large, à une centaine de kilomètres du rivage, se trouve une zone d'une étonnante biodiversité : le récif de l'Amazonie. « Ce récif découvert il y a quelques années à peine à l'embouchure de l'Amazonie remonte jusqu'aux côtes de la Guyane, explique Serge Planes, biologiste au Criobe<sup>1</sup>. Posé au fond de l'océan, tout au bord du plateau continental, ce qui devait être un récif corallien lors de la dernière période glaciaire est aujourd'hui immergé à plus de cent mètres de profondeur, dans l'obscurité la plus totale. »

En septembre dernier, une équipe de scientifiques embarquée à bord du navire *l'Esperanza*, de l'ONG Greenpeace, y a découvert un écosystème d'une étonnante diversité, au niveau du récif lui-même, comme à la surface de l'océan, où cétagés, oiseaux... ont pu être observés en grand nombre.

« Si le récif a déjà fait l'objet d'observations par des chercheurs brésiliens, effectuées au large des côtes brésiliennes, c'est la toute première fois qu'une équipe de plongeurs y descend pour prélever des échantillons biologiques », raconte Serge Planes. Plonger à 100 mètres de fond est une aventure en soi ; le faire dans

les eaux guyanaises réputées pour leur turbidité, du fait des sédiments charriés par l'Amazonie et de la forte concentration en plancton, se révèle particulièrement délicat. « On ne voit rien dans les premiers mètres, tant les eaux sont chargées, et à partir de soixante-dix mètres, la lumière de la surface perce difficilement », témoigne le biologiste. Tout au fond, la neige océanique, constituée de flocons blancs issus de la décomposition du plancton, arrose le récif en continu.

## Des îlots de biodiversité

Dans cet étrange décor, les scientifiques ont découvert toute une faune d'invertébrés dominée par le groupe des « oursins » : des **crinoïdes**, ces oursins préhistoriques dépourvus de carapace, des oursins communs, des étoiles de mer, des **ophiures**... S'y ajoutent les populations plus classiques de gorgones, corail noir, poissons, mollusques, crustacés... « Ce qu'on retrouve sur le récif de l'Amazonie s'apparente à un mélange de faune côtière telle qu'on peut la retrouver dans les récifs coralliens de la Caraïbe, plus au nord, et de faunes plus typiques des fonds sableux ou des abysses », résume Serge Planes.

Reste aujourd'hui à faire les analyses ADN des 2 500 échantillons

## CRINOÏDES

Animaux ressemblant à des plantes, pourvus d'un squelette calcaire articulé et de longs bras flexibles qui leur permettent de filtrer le plancton dont ils se nourrissent.

## OPHIURES

Classe d'échinodermes proches des étoiles de mer, caractérisés par leur disque central et leurs cinq bras très fins.

collectés, afin de caractériser finement les espèces en présence et d'identifier l'origine et les fragilités de cet écosystème si particulier. « Le récif de l'Amazonie n'est pas un récif continu. On parle davantage d'îlots de biodiversité, qui devront bénéficier de mesures de conservation adaptées », précise Serge Planes.

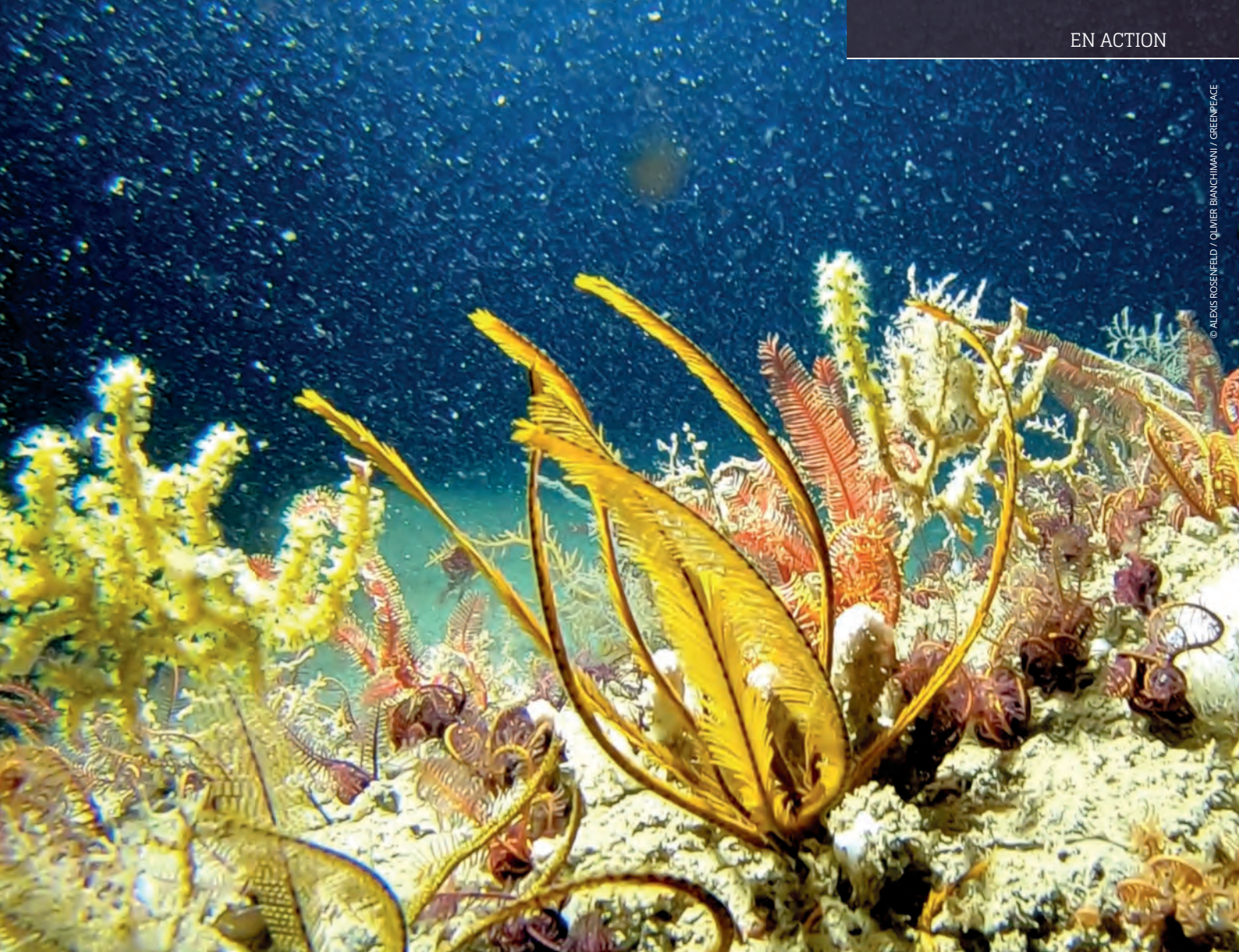
## Des risques de pollution

La nécessité d'établir un plan de protection pour la zone ne fait pas de doute, au vu des appétits économiques qu'elle aiguise : si aucun projet n'a encore vu le jour, la menace de la construction de plateformes pétrolières offshore – et les risques de marée noire associés – reste réelle à l'embouchure de l'Amazonie.

« Avec les courants marins qui entraînent le panache de l'Amazonie plus au nord, vers la Guyane et le Suriname, n'importe quelle pollution côté brésilien viendrait automatiquement affecter les côtes guyanaises, et perturber cet écosystème si original », confirme Olivier Van Canneyt, biologiste au laboratoire Pelagis<sup>2</sup>. Ce spécialiste de la mégafaune marine (cétagés, requins, gros poissons, oiseaux marins...), qui avait déjà effectué un survol de la zone en avion en 2008 et en 2017, n'en revient toujours pas des observations effectuées à bord de *l'Esperanza*.

1. Centre de recherches insulaires et observatoire de l'environnement (unité CNRS/École pratique des hautes études-PSL/Université Perpignan via Domitia). 2. Systèmes d'observation pour la conservation des mammifères et oiseaux marins (unité CNRS/Université de La Rochelle).





« Contrairement à ce que l'on pourrait croire, les eaux océaniques chaudes sont assez peu propices au foisonnement de la vie, à l'exception notable des zones côtières comme les récifs coralliens, explique le scientifique. C'est pourquoi nous avons été très surpris de la diversité et des densités des populations d'animaux rencontrées au large de la Guyane. »

#### Une profusion inhabituelle

En dix jours de mer, les biologistes ont recensé une quinzaine d'espèces de cétacés, parmi lesquelles neuf espèces de dauphins : le grand dauphin, le dauphin tacheté pantropical, mais aussi des dauphins à tête ronde ou globicéphalinés, comme le péponocéphale ou l'orque pygmée...

« Nous avons eu aussi la surprise de voir des baleines à bosse avec leurs petits âgés de quelques semaines, et des rorquals tropicaux en pleine scène de chasse sur des bancs de petits poissons, aux côtés de thons, de requins et d'oiseaux marins. Des scènes de profusion de vie que nous avons plutôt l'habitude d'observer dans les eaux froides ou tempérées riches en plancton, comme celles du golfe de Gascogne par exemple », poursuit le chercheur, qui attribue cette exceptionnelle richesse au mélange d'eau de mer et d'eau douce provenant de l'Amazone, bien sûr, mais aussi de la dizaine de fleuves guyanais comme l'Oyapock, qui marque la frontière avec le Brésil, ou le Maroni côté Suriname. « La présence sur les côtes

► L'incroyable biodiversité du récif de l'Amazone, photographiée pour la première fois en septembre 2019.

de Guyane de kilomètres de mangroves – des habitats propices à la reproduction de nombreuses espèces de poissons, notamment – ne peut que favoriser cette biodiversité du large. »

Une chose est sûre, une telle profusion signifie que les eaux océaniques de la Guyane ne sont pas seulement un lieu de passage, mais remplissent des fonctions importantes pour la survie des animaux : la reproduction, comme pour la baleine à bosse, l'alimentation pour le rorqual tropical, comme pour les raies manta ou les tortues olivâtres nées sur les côtes de la Guyane... et doivent être protégées en conséquence. ||



# L'Internet des objets grappille de l'énergie

+ Lire l'intégralité de l'article sur [lejournale.cnrs.fr](http://lejournale.cnrs.fr)

MATIÈRE ◀ NUMÉRIQUE ▶

**Ingénierie.** Les capteurs communicants sans fil qui composent l'Internet des objets ont des besoins particuliers. Le grappillage de l'énergie ambiante peut leur permettre de s'alimenter de manière autonome.

PAR MARTIN KOPPE

En croissance exponentielle, l'Internet des objets (IoT en anglais) concerne tous les secteurs d'activité : transports, industrie, médecine, armée, aérospatial... On estime qu'il existe cinquante milliards d'objets connectés dans le monde, pour un marché d'environ cinq cents milliards de dollars. Mais comment tous les alimenter ?

## Chaque joule compte

« On essaye d'alimenter ces appareils sans avoir à passer par des piles ou des batteries, qu'il faudrait changer régulièrement, souligne Romain Bachelet, chargé de recherche CNRS à l'Institut des nanotechnologies de Lyon<sup>1</sup>. Ils doivent donc être capables de récupérer leur propre énergie et celle alentour, puis de la convertir en électricité. »

Le grappillage d'énergie demande une conversion d'énergie (ou transduction), d'un signal physique en un autre, principalement électrique. On obtient ainsi de l'électricité à partir d'un vaste panel de sources ambiantes, mécaniques, thermiques, lumineuses, (électro)magnétiques, etc. Chacune nécessite un composant spécifique pour réaliser l'opération : le transducteur.

« Nous sommes en présence de toutes petites puissances, de l'ordre du microwatt jusqu'au milliwatt »,

explique Elie Lefeuvre, professeur à l'Université de Paris-Saclay et chercheur au Centre de nanosciences et de nanotechnologies<sup>2</sup>. La moindre perte doit donc être évitée. « Les problèmes se rencontrent surtout à l'interface des transducteurs, chargée d'améliorer les rendements sans consommer plus que ce qu'elle apporte, détaille le chercheur. Le grappillage se saisit d'énergies de faible puissance, mais à la tension pouvant être relativement élevée. À l'inverse, les transducteurs fournissent un courant plus raisonnable, mais avec des tensions très réduites. »

Vient ensuite la question du stockage de cette énergie, collectée de manière irrégulière pour alimenter un usage lui-même intermittent. « Un implant médical bénéficie d'une température environnante stable et connue, mais les objets utilisés en extérieur sont soumis à des variations climatiques parfois importantes, insiste Elie Lefeuvre. Or les systèmes de stockage de l'énergie sont très sensibles à ces changements. »

## Des systèmes sur-mesure

Si un pacemaker ne consomme pas beaucoup d'énergie, sa pile doit tout de même être remplacée. La collecte de l'énergie des vibrations produites par les battements du cœur ouvre la voie à des appareils bien plus

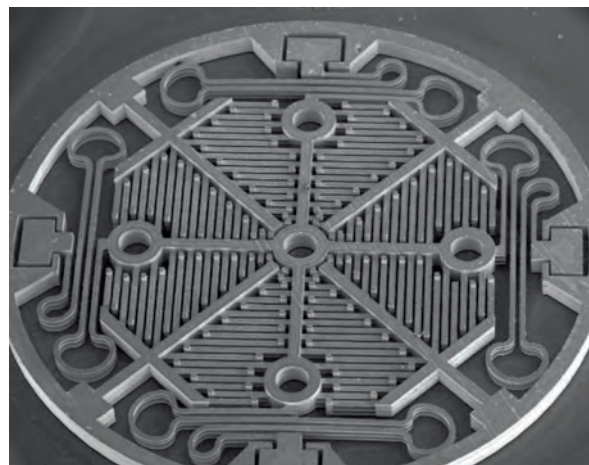
autonomes. Cela demande d'adapter le transducteur à ces conditions très spécifiques en termes de fréquence et d'amplitude des battements cardiaques. Chaque situation doit être finement étudiée pour choisir la meilleure source d'énergie dans laquelle puiser, mais aussi adapter le transducteur et l'électronique aux quantités disponibles. Une réalité qui empêche les systèmes de grappillage d'être produits à la chaîne et de façon générique, ce qui augmente considérablement leur coût. De plus, la variété des applications impose différentes contraintes sur les dimensions et la conception des composants.

Enfin, la question de la densité d'énergie subsiste : comment l'obtenir et la conserver dans le plus petit espace possible ? Pour Elie Lefeuvre, « résoudre tous ces défis demande de faire appel aux sciences des matériaux, à la microélectronique ou à l'électrochimie. On ne peut pas réduire indéfiniment la surface utilisée mais, comme nous sommes encore loin des limites physiques, la marge de progrès restante stimule la recherche. » II



*Inventer l'avenir — L'ingénierie se met au vert*, Martine Meireles-Masbernat, Laurent Nicolas et Abdellilah Slaoui (dir.), CNRS Éditions, août 2019, 240 p.

▲ Micro-fabrication additive par dépôt électrolyte de Nickel. Ce micro-dispositif, conçu et fabriqué au C2N, grappille de l'énergie dans l'environnement humain.



1. Unité CNRS/Centrale Lyon/Insa Lyon/Université Claude-Bernard/CPE Lyon. 2. Unité CNRS/Université Paris-Sud.



# SideROS croise le fer contre le cancer

VIVANT 

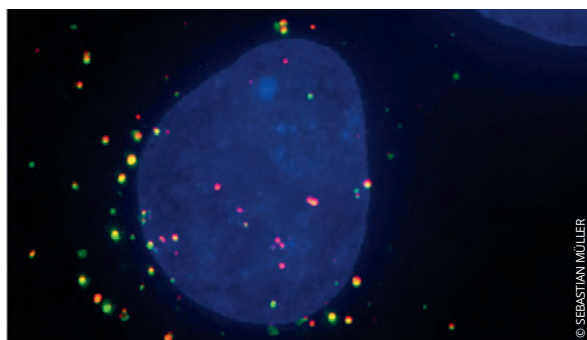
**Innovation.** Grâce à un nouveau mode d'action qui vise le fer contenu dans les tumeurs, Raphaël Rodriguez, cofondateur de la start-up SideROS, veut éliminer les cellules souches cancéreuses les plus récalcitrantes.

PAR MARTIN KOPPE

**A** la fois résistantes, actives et mobiles, les cellules souches cancéreuses font croître les tumeurs et provoquent des récurrences de cancer, même après traitement. « Ces cellules cancéreuses résistantes contiennent plus de fer et sont métaboliquement plus actives que les autres, explique Raphaël Rodriguez<sup>1</sup>. Nous avons donc décidé de les attaquer par cet angle. » Le chercheur a choisi l'ironomycine, petite molécule de synthèse dérivée de la salinomycine conçue dans son laboratoire, qu'il a brevetée. Le produit naturel ainsi que ce dérivé de synthèse bloquent le fer lysosomal et perturbent l'homéostasie de la cellule. L'accumulation de ce métal entraîne la production d'espèces réactives de l'oxygène, toxiques pour la tumeur. Cela finit par enclencher le processus de mort cellulaire des cellules souches cancéreuses.

## Reconnaissance et attractivité

Forts de cette piste extrêmement prometteuse et inédite, Raphaël Rodriguez et Robin Rivaton, économiste et essayiste, ont fondé une start-up pour valoriser l'ironomycine. « Il a d'abord fallu publier beaucoup de travail académique, puis discuter avec des contacts dans les biotechnologies et les milieux économiques, se souvient le chimiste. Lancer une



© SEBASTIAN MULLER

start-up demande le bon timing. Ni trop tôt ni trop tard. » SideROS naît alors en 2019, soutenue par le programme RISE de CNRS Innovation. La jeune pousse est immédiatement repérée, et reçoit la même année le prix de la start-up innovante du concours i-LAB, organisé par le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et la Banque publique d'investissement (Bpifrance).

Toujours en 2019, Raphaël Rodriguez obtient non seulement le grand prix scientifique de la Fondation Charles Defforey, mais aussi le prestigieux Tetrahedron young investigator award, pour l'ensemble de ses travaux, prix international réservé aux chercheurs de moins de 40 ans. « Le concours i-Lab nous a offert une visibilité très importante, s'enthousiasme Lucie

► **Microscopie à fluorescence d'un modèle de cellules souches cancéreuses.** Autour du noyau, (en bleu), on voit une co-localisation entre l'ironomycine (en vert) et les lysosomes (en rouge).

 Lire l'intégralité de l'article sur [lejournal.cnrs.fr/nos-blogs/de-la-decouverte-a-linnovation](http://lejournal.cnrs.fr/nos-blogs/de-la-decouverte-a-linnovation)

Mondoulet, Chief executive officer de SideROS. Notre dossier a ainsi été reconnu par des experts scientifiques de très haut niveau, ce qui renforce sa solidité pour la recherche de financements. »

## Vers des essais cliniques

Ancienne chercheuse en génie biochimique et alimentaire, Lucie Mondoulet a créé en 2007 le département R&D de DBV Technologies. « J'ai quitté DBV en 2018, pour reprendre un projet de recherche dès ses premières phases de découverte, avant toutes les étapes de développement nécessaires pour démarrer les essais cliniques, explique la chercheuse. C'est la période la plus critique, mais c'est aussi là où l'on retrouve le plus d'engouement et de créativité. »

Pour les prochains mois, le travail consistera à industrialiser les procédés de fabrication maîtrisés à l'échelle du laboratoire et évaluer la toxicité de l'ironomycine avant une première administration chez le patient. « Nos tests in vitro ont confirmé l'efficacité de la molécule sur des cellules de cancers hématologiques<sup>2</sup>, ainsi que de cancers solides tels que le glioblastome<sup>3</sup> ou celui des ovaires, détaille Lucie Mondoulet. Nous avons aussi des preuves de concept précliniques in vivo sur des souris greffées avec une tumeur du sein, qui montrent qu'elle empêche la reprise tumorale. Nous espérons que les premiers essais cliniques sur l'homme pourront commencer en 2022, qu'il faudra alors financer par une levée de fonds à hauteur de plusieurs dizaines de millions d'euros. » Le défi est ainsi triple : scientifique, financier et sanitaire. L'ironomycine recèle cependant bien assez de promesses pour que l'équipe de SideROS les relève tous. **II**


1. Directeur de recherche CNRS au laboratoire Chimie et biologie de la cellule (CNRS/Institut Curie/Inserm). 2. La leucémie est un exemple de cancer hématologique. 3. La forme la plus courante de tumeur au cerveau.

# Peut-on voir dans le noir ?

VIVANT  NUMÉRIQUE 

**Chimie.** Le traitement par photothérapie dynamique de certains cancers a mis en évidence un effet secondaire étonnant : les patients traités voient mieux la nuit. Des chercheurs ont réussi à percer les mécanismes de cette surprenante acuité visuelle grâce à la simulation moléculaire.

PAR LAURE CAILLOCE

 Lire l'intégralité de l'article sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)

C'est un effet secondaire étonnant de la photothérapie dynamique, ce traitement associant lumière et médicament photosensible, utilisé pour traiter certains cancers. « Au début des années 2000, des articles ont paru qui faisaient état de patients soignés avec de la chlorure e6, une molécule photosensible, qui commençaient à voir des silhouettes et des contours dans le noir », raconte Antonio Monari, chimiste au laboratoire de physique et chimie théoriques<sup>1</sup> et spécialiste de simulation moléculaire.

Le principe de ces traitements par photothérapie : le médicament est activé par un faisceau laser localisé au niveau de la tumeur – un rayonnement infrarouge capable de diffuser à faible profondeur dans les tissus – et détruit les cellules tumorales par la production d'une espèce d'oxygène très réactive, l'oxygène singulet.

Mais comment la chlorure e6 utilisée pour éliminer les cellules tumorales se retrouve-t-elle à interagir avec le système visuel ? C'est ce

qu'Antonio Monari et ses confrères ont cherché à savoir en utilisant une méthode nouvelle en biologie : la simulation moléculaire, qui permet de mimer des réactions biochimiques entièrement sur ordinateur, sans paille ni microscope.

## Mimer le biologique

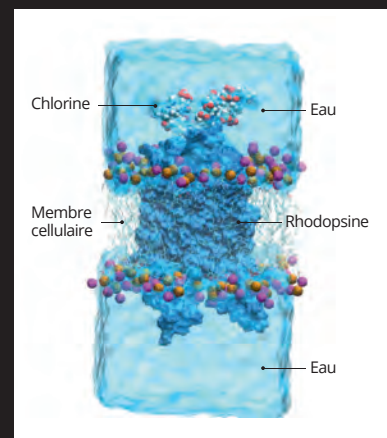
Lors du processus de vision, la lumière est collectée par un ensemble de récepteurs localisés dans la rétine : les cônes et les bâtonnets. Les bâtonnets contiennent une grande quantité de rhodopsine, une protéine photosensible capable d'absorber la lumière visible grâce à un groupement actif appelé rétinol, un dérivé de la vitamine A. « Lorsqu'il reçoit de la lumière, le rétinol change de structure chimique et se dissocie de la protéine, permettant la traduction du signal lumineux en signal électrique interprétable par le cortex visuel », explique Antonio Monari.

Dans des conditions de faible luminosité, et notamment la nuit, le rayonnement lumineux prédominant

ne se trouve plus dans le domaine du visible mais dans des longueurs d'onde plus élevées, les infrarouges, auxquelles le rétinol n'est pas sensible. Raison pour laquelle nous ne pouvons pas voir dans le noir.

« Grâce aux expérimentations menées ces dernières années, on sait que sous rayonnement infrarouge, la structure chimique du rétinol est modifiée après injection de chlorure – on parle d'isomérisation – de la

▲ Capture d'écran de la simulation moléculaire numérique réalisée. On voit l'interaction chimique entre la molécule de chlorure utilisée en photothérapie et la rhodopsine présente dans les récepteurs de l'œil.



1. Unité CNRS/Université de Lorraine.



même façon que lorsqu'il reçoit de la lumière visible. C'est ce qui explique cette augmentation de l'acuité visuelle nocturne. Mais on n'avait aucune idée de la façon précise dont la rhodopsine et son groupement rétinol interagissaient avec la chlorure. C'est ce mécanisme que nous avons réussi à élucider grâce à la simulation moléculaire. »

Pour cette simulation, les chercheurs ont mis en présence une protéine de rhodopsine virtuelle insérée dans sa membrane lipidique, plusieurs molécules de chlorure e6 et de l'eau, soit quelques dizaines de milliers d'atomes. Leurs supercalculateurs ont tourné plusieurs mois et réalisé des millions de calculs avant de pouvoir simuler l'intégralité de la réaction biochimique déclenchée par le rayonnement infrarouge.

#### Pistes thérapeutiques

En absorbant le rayonnement infrarouge, la chlorure e6 interagit avec l'oxygène présent dans les tissus de l'œil et le transforme en oxygène singulet, comme cela a pu être observé au niveau des lésions cancéreuses. Antonio Monari et ses confrères d'universités, deux espagnoles et une chinoise, ont réussi à montrer que cet oxygène singulet pénétrait dans la molécule de rhodopsine et venait s'accumuler à côté du rétinol, provoquant son isomérisation. « Comme nous sommes en présence d'un faible rayonnement infrarouge – rien à voir avec la puissance du faisceau laser utilisé en photothérapie –, il n'y a pas production de suffisamment d'oxygène réactif pour provoquer la destruction de cellules de l'œil, rassure Antonio Monari. Mais il y en a suffisamment pour que la vision nocturne soit légèrement améliorée. »

La compréhension de ce mécanisme pourrait permettre, à terme, de neutraliser cet effet secondaire chez les patients traités par photothérapie dynamique, et ouvre des perspectives intéressantes pour développer des traitements alternatifs pour la cécité ou l'hypersensibilité lumineuse. II

## En bref

### Objectif développement durable

Mettre fin à toutes formes de pauvreté, lutter contre la faim dans le monde, prendre des mesures contre le changement climatique... Le CNRS mène des actions en lien avec chacun des 17 Objectifs de développement durable adoptés par l'ONU. Celles-ci sont à découvrir dans une rubrique dédiée sur le site [cnrs.fr](http://cnrs.fr) et l'intranet, au travers de fiches évolutives et ouvertes aux propositions des agents de l'organisme.

[www.cnrs.fr/fr/objectifs-de-developpement-durable-le-cnrs-sengage](http://www.cnrs.fr/fr/objectifs-de-developpement-durable-le-cnrs-sengage)

### Impacts de la recherche

La réflexion sur le développement durable touche aussi les pratiques de la recherche. Le 24 janvier, le CNRS a organisé le séminaire « Impacts des pratiques de la recherche sur l'environnement » pour mettre en cohérence les pratiques de travail de la recherche avec le développement durable.

[www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/cnrs-vers-des-pratiques-de-recherche-plus-durables](http://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/cnrs-vers-des-pratiques-de-recherche-plus-durables)

### Mathématiques sans frontières

Le 17 décembre à Londres, le CNRS et l'Imperial College London ont décidé de renforcer leur collaboration au travers de l'International Research Laboratory en mathématiques, Abraham de Moivre. Un programme conjoint de doctorat a ainsi été mis en place.



Lire aussi l'article « L'Europe de la recherche face au Brexit » [www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/leurope-de-la-recherche-face-au-brexit](http://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/leurope-de-la-recherche-face-au-brexit)

### Un hub pour l'environnement

Le 5 décembre dernier, à Port-Elizabeth (Afrique du Sud), a été inauguré l'International Research Laboratory ReHabs. Créé par le CNRS, l'Université Claude Bernard et l'Université Nelson Mandela, en partenariat avec les South African National Parks et l'Université d'Angers, ce laboratoire en écologie et environnement se veut un "hub" pour la recherche innovante sur les socio-écosystèmes et la biosphère à l'heure de l'anthropocène.

### Un forum contre la tuberculose

Pour la première fois depuis sa création, le forum mondial sur les vaccins contre la tuberculose aura lieu en France, à Toulouse du 20 au 22 avril 2021. Cette 6<sup>e</sup> édition devrait réunir plus de 400 participants du monde entier – scientifiques, cliniciens, associations de patients, fondations, financeurs ou encore industriels –, pour faire le point sur l'état des recherches afin de viser à une meilleure vaccination contre cette maladie infectieuse pour laquelle on compte 10 millions de nouveaux cas par an. Isabelle Saves et Olivier Neyrolles, de l'Institut de pharmacologie et de biologie structurale, ont porté la candidature de la France.

### Bilan social et parité

Le Bilan social et parité 2018 est en ligne sur le site du CNRS. Y sont consultables les données chiffrées concernant les personnels rémunérés par le CNRS et leur contexte de travail. L'ensemble des données des tableaux et des graphiques sont téléchargeables, de même que les séries chronologiques sur une période de plus de dix ans.

<https://drh.cnrs.fr/le-bilan-social-et-parite>

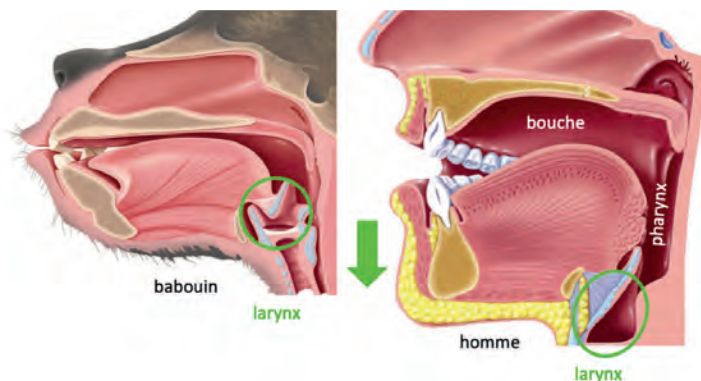
# Depuis quand parlons-nous ?

VIVANT SOCIÉTÉS

**Science de la parole.** Très en vogue depuis cinquante ans, la théorie de la descente du larynx, qui explique notre aptitude à parler, est battue en brèche par une équipe pluridisciplinaire de chercheurs. Ils repoussent à plus de 20 millions d'années la possibilité d'émergence de la parole.

PAR LAURE CAILLOCE

© LABORATOIRE DE PSYCHOLOGIE COGNITIVE (CNRS/AMU) ET GIPSA-LAB (CNRS/UGA)



► Conduit vocal du babouin et de l'homme moderne. On retrouve les mêmes articulateurs (lèvres, langue), mais chez l'homme, le larynx est positionné plus bas.

Proposée en 1969 par l'Américain Philip Lieberman, et largement diffusée depuis, la théorie de la descente du larynx (TDL) posait la condition de l'émergence de la parole chez l'homme moderne : pour être capable d'articuler les voyelles [a], [i] et [ou], prédominantes dans le monde, il faudrait posséder un larynx en position basse, au niveau de la 5<sup>e</sup> vertèbre cervicale, contrairement à nos lointains cousins singes dont le larynx se situe plus haut dans le cou, au niveau de la 3<sup>e</sup> vertèbre cervicale.

« La TDL se propose d'expliquer pourquoi l'homme peut parler, à la fois de par son évolution en tant qu'espèce, mais aussi du fait de son évolution en tant qu'individu »,

racontent Louis-Jean Boë et Jean-Luc Schwartz, chercheurs au Gipsa-lab<sup>1</sup>, qui ont cosigné une vaste étude dans *Science Advances*<sup>2</sup>. En effet, le bébé, comme le singe, possède un larynx haut dans ses premières années d'existence, avant que celui-ci ne descende plus bas dans le cou – conséquence de la croissance du crâne qui tend à s'allonger chez l'être humain. « Le problème, c'est que cette théorie ne repose plus sur aucun fondement valide. »

## Le cas des bébés et des singes

Selon l'article, qui met en perspective les travaux d'une équipe pluridisciplinaire de chercheurs, la position du larynx importe peu pour la formation de voyelles différenciées. « Ce qui

importe, c'est moins la taille de notre conduit vocal, que la façon dont nous le contrôlons grâce aux mouvements des lèvres, de la mâchoire ou de la langue », expliquent les chercheurs, qui vont plus loin : les singes et les bébés sont parfaitement capables d'émettre des sons distincts.

« D'un point de vue strictement anatomique, les bébés sont tout à fait capables de produire les sons [a], [i], [ou], et ils le font d'ailleurs très bien après l'âge de 9 mois. S'ils ne le font pas plus tôt, c'est pour une question de maturation du cerveau. » Concernant les singes, une collaboration avec l'équipe de Joël Fagot<sup>3</sup> à Marseille, a permis d'analyser un millier de vocalisations de babouins en semi-liberté. « Nous avons constaté que ces singes produisaient jusqu'à 6 ou 7 sons différenciés, dont certains associés à des situations et des comportements bien identifiés. »

## Néandertal aurait pu parler

Dernière affirmation de la TDL mise à mal par le collectif de chercheurs : Néandertal, du fait de son larynx haut, aurait été incapable de produire un langage articulé. « Si l'on prend le crâne, les vertèbres cervicales, et l'os hyoïde de Néandertal (os situé à la base de la langue, NDLR), il apparaît qu'il avait le même port de tête que Sapiens et un larynx vraisemblablement positionné à la même hauteur... », affirment les chercheurs. Anatomiquement, il pouvait donc probablement parler, même si rien ne permet de le savoir.

« Si l'on considère que les singes sont capables de produire des proto-voyelles, et qu'ils ont anatomiquement très peu évolué depuis que nous nous sommes séparés d'eux, il y a 27 millions d'années, cela veut dire que les premières lignées humaines avaient elles aussi cette capacité de produire des sons différenciés. Cela repousse donc de plus de 20 millions d'années la possibilité d'émergence d'un langage articulé chez les humains. » ||

## LARYNX

Partie du conduit vocal où sont logées les cordes vocales, et qui est située à l'arrière de la cavité buccale, sous le pharynx.

1. Laboratoire Grenoble Images Parole Signal Automatique (CNRS/Grenoble INP/Université Grenoble-Alpes). 2. "Which way to the dawn of speech?: Reanalyzing half a century of debates and data in light of speech science", Louis-Jean Boë, Thomas R. Sawallis, Joël Fagot et al., *Science Advances*, vol. 5, n° 12, déc. 2019. 3. Laboratoire de psychologie cognitive (CNRS/Aix-Marseille Université).



# Les experts du CNRS



© LAURENT LECLERCQ/CNRS

Pour faciliter les relations entre le monde économique et l'organisme de recherche, le CNRS propose un nouveau service : Trouver un expert. Explications avec Edith Wilmart, directrice de CNRS Formation Entreprises.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURENCE STENVOT

**La Direction des relations avec les entreprises (DRE) du CNRS a lancé au début de l'année un nouveau service, Trouver un expert, dont vous êtes la responsable. À qui s'adresse-t-il et dans quel but ?**

**Edith Wilmart :** Il s'agit d'un service destiné aux entreprises (Start-up, PME, grands groupes), aux services de l'État (douane, gendarmerie, police, hôpitaux) et aux collectivités territoriales. Notre mission est l'identification d'un expert ou d'une experte correspondant à leurs besoins au sein des 1 100 laboratoires du CNRS et de ses partenaires. Relevant de la DRE, Trouver un Expert est géré par une équipe composée de scientifiques qui travaillent pour et avec les demandeurs, futurs partenaires potentiels du CNRS.

Ce service a connu un véritable succès lors de sa présentation sur des salons professionnels tels que Cosmetic 360 et Textival et nous nous attendons à plusieurs centaines de demandes cette année. En à peine quelques semaines, nous avons déjà reçu des dizaines de requêtes émanant d'entreprises, que nous avons toutes traitées avec succès. À titre d'exemple, nous avons orienté

une PME dans le secteur des cosmétiques vers un laboratoire qui maîtrise parfaitement les oxydes métalliques et leurs impacts sur la santé, ou encore une grande entreprise dans le secteur des dispositifs médicaux vers un chercheur travaillant sur la place du sport dans la société. Nos actions permettront la création de plus d'interactions, notamment avec les PME et les ETI.

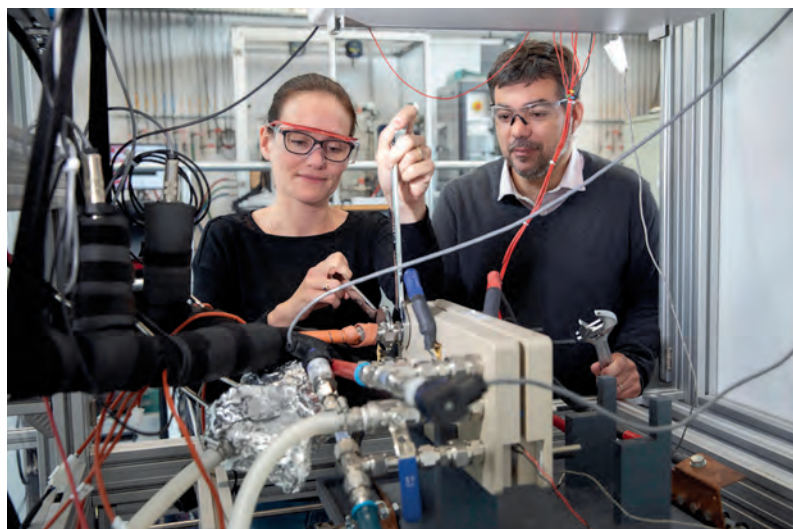
**Comment cela se passe-t-il concrètement ?**

**E. W :** Les entreprises, services de l'État et collectivités déposent simplement leur demande sur le site internet via un formulaire. L'équipe Trouver un expert l'étudie en toute discrétion, en s'appuyant sur des outils et sur des réseaux internes, dont les chargés de valorisation des instituts et des délégations du CNRS. Notre équipe de scientifiques est à même de traduire les demandes des entreprises envers les chercheurs et de les affiner si besoin. En moyenne, au bout d'une quinzaine de jours, l'expert ou l'experte identifié et le demandeur sont mis en relation. Si c'est un succès, notre équipe oriente le tandem ainsi constitué vers la structure de contractualisation dédiée. Ensemble, ils conviennent du mode d'interaction nécessaire pour mener à bien le projet, via un contrat de consultance, une prestation de service intellectuelle ou technique, un contrat de collaboration ou encore une formation.

**D'où est venue l'idée de créer Trouver un expert ?**

**E. W :** « Comment fait-on pour travailler avec le CNRS ? » C'est une question qui revient souvent sur les salons de la part des entreprises innovantes. Mais difficile pour elles de s'y retrouver lorsque l'on sait que le CNRS représente 1 100 laboratoires qui couvrent l'ensemble des disciplines scientifiques. Nous apportons une plus-value, par rapport à un service essentiellement basé sur un moteur de recherche, qui réside dans le traitement au cas par cas des demandes, de manière rapide et efficace. Grâce à la pertinence de l'expert identifié, l'assurance de ses motivations et disponibilités, Trouver un expert propose un service « sur mesure » ! ||

▲ L'expertise des laboratoires peut s'avérer précieuse pour des entreprises ou des services de l'État. Ici, test de performance électrique sur un prototype de pile à combustible, réalisé au laboratoire Laplace de Toulouse.



© FRÉDÉRIC MAILLIGNÉ/LAPLACE/CNRS PHOTOHÉQUE

1. <https://trouverunexpert.cnrs.fr/>

# Le génome des Papous, mémoire de l'humanité

VIVANT

SOCIÉTÉS

**Paléogénétique.** Et si les secrets des origines de l'humanité étaient nichés au cœur de l'ADN des Papous ? En combinant des approches archéologiques et génomiques, des chercheurs remontent la piste de nos ancêtres en Papouasie-Nouvelle-Guinée.

PAR LOUISE MUSSAT

En juin et juillet 2019, l'équipe de François-Xavier Ricaut, du laboratoire Évolution et diversité biologique<sup>1</sup>, a mené deux missions de terrain dans ce bout du monde, dans le cadre du projet Papuan Past. Objectif : combiner des recherches génétiques et archéologiques afin de percer les secrets d'une partie de nos ancêtres, les tout premiers *Homo sapiens* à avoir mis le pied, il y a de cela 65 à 50 000 ans, en Mélanésie.

Le climat était alors très différent de celui d'aujourd'hui. La Terre était entrée depuis déjà plusieurs dizaines de milliers d'années dans une ère glaciaire. De ce fait, le niveau de la mer était environ 100 mètres plus bas qu'aujourd'hui. Les îles indonésiennes ne formaient alors qu'une immense langue de terre rattachée au reste de l'Asie, que les paléogéographes appellent Sunda. L'Australie, la Papouasie et la Tasmanie étaient quant à elles reliées en une gigantesque île, Sahul, qui ne pouvait être atteinte depuis Sunda qu'en traversant des bras de mer allant jusqu'à 100 kilomètres de large.

« Nous voulons comprendre qui étaient ces premiers "Sahuliens" (ancêtres des Aborigènes australiens et des Papous) qui, une fois arrivés à Sahul, ont donné naissance à une

diversité culturelle et génétique parmi les plus riches du monde, explique François-Xavier Ricaut. Nous avons particulièrement à cœur de découvrir quelle(s) route(s) ce dernier ancêtre a emprunté pour peupler Sahul, et à quelle époque précise il y est arrivé. Ce notamment, afin de remonter la piste de la dernière sortie d'Afrique de l'Homme moderne. » Arrivés au bout de la route, les premiers *Homo sapiens* mélanésien n'ont, à quelques exceptions près, sans doute plus quitté ce territoire reculé. Le génome des premiers Papous, leurs descendants, qui est aussi celui des premiers Aborigènes australiens, est demeuré quasiment intact. Leur patrimoine génétique, unique au monde, comprend 2 % de l'ADN de l'homme de Néandertal et entre 4 et 6 % de l'ADN de l'homme de Denisova. Les Papous ne sont rien de moins que la mémoire de nos origines.

## L'ADN pour remonter le temps

Les chercheurs souhaitent donc effectuer des prélèvements auprès des populations, en différents endroits de l'île, afin de collecter le plus de génomes possible et ainsi identifier, à partir de cette cartographie génétique, un dénominateur commun : la trace des « ancêtres fondateurs ». Leur secret pour y parvenir ? La



1. Unité CNRS/Université Toulouse III Paul-Sabatier, École nationale de formation agronomique/IRD.



paléogénétique. L'information génétique est transmise d'une génération à l'autre, mais pas à l'identique. Selon un rythme régulier, des mutations apparaissent et sont transmises aux descendants. Ce rythme de mutation sert en quelque sorte d'horloge, une horloge dite moléculaire : en comparant le nombre de mutations entre deux séquences (deux portions) d'ADN appartenant à deux individus, les chercheurs peuvent calculer à quelle période ils ont divergé l'un de l'autre, et donc retrouver l'époque à laquelle vivait leur ancêtre commun. « On a aujourd'hui les moyens techniques d'analyser une grande quantité de génomes, ce qui était impossible il y

a encore quelques années, explique François-Xavier Ricaut. *En séquençant l'ADN de nombreux Papous et Aborigènes australiens, on peut en quelque sorte remonter le temps* ».

Grâce à leur base de données génétiques, unique au monde pour cette région, les chercheurs sont en effet parvenus à établir un scénario de peuplement. Les premiers *Homo sapiens* auraient posé le pied à Sahul il y a de cela 65 à 50 000 ans. « Cela colle avec l'archéologie, se félicite le chercheur : *Madjebebe en Australie et Ivane en Papouasie-Nouvelle-Guinée (PNG), les deux plus vieux sites d'occupation humaine connus, ont respectivement -65 000 et -49 000 ans. Mais ce scénario demande bien sûr à être vérifié* ».

Et s'ils savent à quel moment précis *Sapiens* est arrivé ici, les scientifiques peuvent en déduire le moment où il a quitté l'Afrique, à la fois grâce à l'horloge moléculaire, mais aussi par la vitesse de déplacement de ces premiers explorateurs. « *On pense que les Sapiens hors d'Afrique évoluaient à raison d'1 kilomètre par an. Si des Sapiens sont arrivés ici il y a entre 65 et 50 000 ans, cela signifie qu'ils ont quitté l'Afrique il y a entre 75 et 60 000 ans* », avance François-Xavier Ricaut.

### Peuplement et dispersion

Autre question : quel a été le point d'entrée de *Sapiens* à Sahul ? L'équipe souhaite tester deux hypothèses : le Nord, par les Célèbes et la « tête de l'oiseau » en Nouvelle-Guinée ; ou le Sud, par Timor et le plateau continental australien. Et comment se sont-ils dispersés ensuite dans Sahul : par la cordillère centrale, ou à travers la plaine de l'Arafura au sud (aujourd'hui immergée) ? « *Nos premières analyses suggèrent que les populations actuelles de PNG sont majoritairement issues d'une colonisation depuis le sud-est de l'île* », explique François-Xavier Ricaut. L'équipe a donc effectué des prélèvements auprès des populations de Daru au sud, en bordure de la mer de l'Arafura, face à l'Australie. Leur génome pourrait être très proche de celui des « ancêtres fondateurs ».

Pour confirmer ce scénario, de nouvelles analyses s'imposent et donc, de nouveaux prélèvements. « *Après les présentations et cérémonies d'usage, les gens sont en général très enthousiastes envers notre travail si bien que lors de cette campagne, nous avons manqué de matériel de prélèvement, tant il y avait de candidats !*, se souvient Nicolas Brucato, responsable de la mission à Daru. *Nous faisons ces prélèvements avec le plus de bienveillance et de transparence possible. Pas question de les faire au détriment des Papous, "juste" pour faire avancer la science. Nous tenons à les rendre partie prenante de nos recherches.* » Durant sept jours, François-Xavier Ricaut et ses ...



► Les femmes du village d'Awin posent le temps d'une photo, juste après un sing-sing, une danse traditionnelle. Elles ont tenu ainsi, en costume et parure cérémoniels, à saluer l'équipe du projet Papuan Past avant son départ du village. (Cette photo fait partie des vingt lauréats du concours La preuve par l'image 2019, organisé par le CNRS, NDLR.)





Pour en savoir plus

» <https://papuanpast.hypotheses.org>



© F.-X. RICAUT WITH SUPPORT FROM THE NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY

... coéquipiers de la Mission préhistorique française en Papouasie-Nouvelle-Guinée<sup>2</sup> et de l'Université de Papouasie-Nouvelle-Guinée, ont arpenté le Sepik, marché des heures dans la jungle inextricable, navigué en pirogue de village en village pour récolter des échantillons provenant d'individus et de communautés très divers. « Plus nous aurons de données différentes, plus nous pourrons comparer les individus et, via la technique de l'horloge moléculaire et des modélisations bio-informatiques, remonter aux ancêtres fondateurs et à leur route de dispersion, espère le chercheur. Cette diversité nous permet déjà de tirer des informations très précises sur les premiers Sapiens qui ont accosté à Sahul. Nous pensons en effet que deux groupes différents y sont arrivés dans un intervalle de quelques milliers d'années, et se sont ensuite différenciés en Nouvelle-Guinée en six groupes génétiques distincts. »

Ces premiers Papous et leurs descendants ont bâti un ensemble de cultures extraordinaire. Au fil des millénaires, huit cents langues ont émergé, soit 20 % de toutes les langues parlées sur la planète ! La topographie de l'île de Nouvelle-Guinée, avec ses vallées encaissées et ses plaines marécageuses, est favorable à l'isolation des groupes. « Nous pensons que cette isolation aurait

favorisé cette forte diversité culturelle et linguistique, mais aussi forcé le développement des réseaux d'échanges entre groupes, notamment pour éviter une trop forte endogamie », explique le scientifique.

### La piste archéologique

Le 25 juin, changement de décor pour une seconde mission dans la région des Highlands, menée conjointement avec le professeur Hubert Forestier du Muséum national d'histoire naturelle. « Nous avons installé notre camp de base près de l'abri rocheux de Manim, près de la rivière qui porte le même nom, à 1 770 mètres d'altitude dans la vallée de Wurup », précise François-Xavier Ricaut. Ici, entre les villages d'altitude, les scientifiques trouvent d'autres sites anciens de peuplement, idéalement placés sur la route que leurs analyses génétiques commencent à tracer.

« Dans les strates de certains abris, les restes d'une impressionnante mégafaune ont été découverts. Nous pensons donc qu'à l'époque où Sapiens est arrivé, il a rencontré toute une population de gros animaux endémiques de Sahul, qu'il n'avait jamais vus avant », poursuit-il. En examinant les strates les plus récentes dans ces anciens lieux de vie, les chercheurs n'en trouvent

► Pour rejoindre les villages et les sites à étudier, l'équipe de François-Xavier Ricaut a dû traverser jungle et cours d'eau dans des conditions parfois très périlleuses !

plus aucune trace. Sans doute parce qu'elle s'est progressivement éteinte dans les millénaires qui ont suivi l'arrivée de l'Homme, à cause de la pression anthropique (chasse, feux de forêt, etc.), mais aussi du changement climatique engendré par la glaciation de l'époque. « Il est possible que privés de faune, les premiers Mélanésiens se soient davantage appuyés sur les ressources végétales. D'ailleurs des traces d'exploitation forestière remontent à la première occupation sur le site d'Ivane il y a 49 000 ans, et le plus vieux site agricole au monde, le site de Kuk classé à l'Unesco et situé à quelques kilomètres de Manim, est daté de plus de 9 000 ans ! » s'exclame le chercheur.

### Faire parler l'ADN

4 juillet. Avant de rentrer en France, l'équipe fait un crochet par l'Université de Melbourne, en Australie. C'est là, au laboratoire de génomique intégrative (Melbourne Integrative Genomics), qu'une partie des échantillons ADN récoltés sur le terrain est analysée. L'autre partie est étudiée à l'Université de Toulouse, en collaboration avec les plateformes du Centre national de génotypage d'Évry. « Grâce aux Papous, nous retraçons peu à peu l'arrivée des premiers Sapiens au bout du monde. Il nous reste désormais à affiner leur route, le nombre d'individus qui composaient ces pionniers, mais aussi quel patrimoine génétique exact ils ont hérité de Denisova », résumant les chercheurs.

Mais de nombreuses questions restent en suspens pour le scientifique, notamment sur le rôle précis des gènes hérités de Denisova : « Les premières données suggèrent qu'ils confèrent à leurs détenteurs une bonne réponse immunitaire face aux maladies et un métabolisme particulier des lipides. Mais portent-ils encore d'autres gènes archaïques utiles, voire déterminants ? Ces mêmes gènes ont-ils été légués à l'ensemble de l'humanité ? » Le génome si précieux des Papous devrait le révéler. II

2. La Mission préhistorique française en Papouasie-Nouvelle-Guinée (MPF-PNG) est soutenue par le ministère de l'Europe et des Affaires étrangères.



# LES IDÉES



*Réfléchir à l'évolution de l'innovation,  
à la perception de la ménopause  
et à la longue histoire  
du canal de Suez.*

ILLUSTRATION : ALICE DES WWW.ALICEDES.COM POUR CNRS LE JOURNAL



# 150 ans de Suez : l'histoire d'un canal très disputé



© KHALED DESOUKI/AFP

## SOCIÉTÉS



DR

**Histoire.** Inauguré en Égypte en 1869, le canal de Suez n'est pas seulement une prouesse technique permettant de relier l'Orient à l'Occident. Il a été durant plus d'un siècle le théâtre de nombreuses tensions, comme nous le raconte l'historienne Caroline Piquet.

PAR LAURE CAILLOCE

### Quand l'idée est-elle née de creuser un canal à travers l'isthme de Suez ?

**Caroline Piquet**<sup>1</sup> : L'idée de créer une communication entre la mer Rouge et la Méditerranée pour faciliter le commerce entre ces deux zones est une préoccupation ancienne qui remonte à l'Égypte des pharaons. Dès le règne de Sésostri III, 2 000 ans

avant notre ère, il existe un système de canaux reliant la mer Rouge au delta du Nil, canaux qui seront définitivement comblés au VIII<sup>e</sup> siècle de notre ère. L'idée est réapparue à plusieurs reprises depuis, mais la véritable genèse du canal actuel remonte à la campagne d'Égypte menée par Bonaparte en 1798. L'idée est reprise en 1846 par une société d'études

fondée par les saint-simoniens, qui échouent à convaincre l'Égypte. C'est finalement un diplomate français, Ferdinand de Lesseps, très proche du vice-roi d'Égypte, qui en 1854 va obtenir l'autorisation de créer la compagnie chargée des travaux, puis de l'exploitation du canal pour une durée de 99 ans : la Compagnie du canal de Suez.

### Cela veut-il dire que la Compagnie du canal de Suez est une entreprise française ?

**C.P.** : La Compagnie du canal de Suez est une entreprise de droit égyptien, sur le papier tout du moins. Sur le plan capitalistique, Ferdinand de Lesseps voulait un financement international qui aurait fait intervenir l'empire ottoman, la Grande-Bretagne, l'empire d'Autriche-Hongrie...

Mais la Grande-Bretagne voit d'un mauvais œil ce chantier qui lui fait de

1. Historienne au Centre Roland Mousnier (unité CNRS/Sorbonne Université).



Le canal construit entre 1859 et 1869 a été élargi par l'Égypte en 2015 afin d'accueillir de plus gros navires.

Lire l'intégralité de l'entretien sur [lejournel.cnrs.fr](http://lejournel.cnrs.fr)

la concurrence pour le commerce avec l'Orient et refuse de participer, de même que l'empire ottoman auquel l'Égypte est rattachée. Lesseps doit donc revoir ses ambitions à la baisse : les capitaux sont majoritairement apportés par des petits porteurs français, et les 44 % manquants sont financés par le vice-roi d'Égypte. Dès 1875, cependant, l'Égypte est en banqueroute et doit céder ses parts. C'est l'Angleterre, devenue le premier utilisateur du canal, qui les rachète. D'un point de vue du capital, comme de la gouvernance, la Compagnie du canal de Suez devient une entreprise franco-britannique

**Creuser un canal au milieu du désert, sur une distance de 160 kilomètres, est une entreprise titanesque. Les conditions dans lesquelles se déroule le chantier sont d'ailleurs rapidement dénoncées comme proches de l'esclavage...**

**C.P. :** Pour conduire ce chantier en plein désert, le vice-roi d'Égypte a proposé à la compagnie de faire appel à la corvée. Ce système traditionnel en Égypte permet de mobiliser les paysans sur une durée d'un mois pour l'entretien des canaux le long du Nil. C'est donc bien une main-d'œuvre gratuite qui travaille à la main, en plein soleil, au creusement du canal... Sur les 400 000 fellahs mobilisés entre 1859 et 1862, on estime que plusieurs dizaines de milliers sont morts.

La critique ne vient pourtant pas de la société égyptienne : c'est la Grande-Bretagne qui dénonce l'utilisation de la corvée, tandis que l'empire ottoman exige de Lesseps d'arrêter le chantier. Les fellahs sont remplacés par des ouvriers étrangers, grecs, italiens, dalmates, et un effort de mécanisation sans précédent est engagé : on va investir et fabriquer des dragues capables de creuser plus vite, plus profond... Le chantier de Suez devient un symbole du progrès technique. Le canal est finalement inauguré en 1869 après dix années de chantier, lors de fêtes somptueuses organisées par le vice-roi d'Égypte.

**La lune de miel avec les autorités égyptiennes ne va pourtant pas durer très longtemps...**

**C.P. :** Après la banqueroute de 1875, l'Égypte subit dès 1882 l'occupation militaire de la Grande-Bretagne qui prend prétexte de troubles sur cette route commerciale majeure pour intervenir. L'Égypte entre dans une période coloniale qui va durer jusque dans les années 1930, et perd dans le même temps toute influence dans la gestion du canal : tous les postes de direction de la Compagnie du canal de Suez sont occupés par des ingénieurs et contremaîtres français, et le conseil d'administration est à 100 % européen. Les ouvriers qualifiés sont grecs et italiens majoritairement. Les Égyptiens employés le sont aux postes les plus subalternes.



© SELVA LEE/MAGE/AFIP

À Port-Saïd, une ville créée *ex nihilo* par la Compagnie du canal de Suez, l'architecture comme le mode de vie sont européens.

**Est-ce la raison pour laquelle on a reproché à la compagnie du canal de Suez d'être un véritable État dans l'État ?**

**C.P. :** Pour cette raison, mais aussi parce qu'elle constitue une sorte de mini-société à côté de la société égyptienne. La compagnie, qui emploie des milliers de personnes, a créé deux villes *ex nihilo*, Port Saïd, côté Méditerranée, et Ismaïlia, où se trouve l'administration de la compagnie, tandis que Suez qui n'était qu'un petit village de pêcheurs devient un port de premier plan sur la mer Rouge. Dans ces villes, l'architecture comme le mode de vie sont européens. La compagnie, qui a une politique très paternaliste, subventionne des écoles réservées à son personnel français. Elle fait venir des missionnaires pour les ouvriers grecs, italiens..., mais subventionne aussi les écoles réservées aux Égyptiens.

**À partir de quand les relations se détériorent-elles entre l'Égypte et la compagnie ?**

**C.P. :** Une tension s'installe dès le début du XX<sup>e</sup> siècle entre les mouvements nationalistes égyptiens et la Compagnie du canal de Suez. Mais le véritable moment de bascule se situe en 1936, lorsque la Grande-Bretagne se retire de la gestion interne du pays. La compagnie se retrouve seule ...

*“Pour conduire ce chantier en plein désert, le vice-roi d'Égypte a proposé à la compagnie de faire appel à la corvée. Un système rapidement dénoncé.”*

face au gouvernement égyptien qui demande des royalties sur l'exploitation du canal et réclame l'égyptianisation de l'entreprise et la formation de personnel qualifié égyptien – ce que rechigne à faire la direction française. Les tensions vont aller crescendo.

### L'annonce de la nationalisation du canal par le président Nasser, le 23 juillet 1956, n'est donc pas une totale surprise pour la Compagnie du canal de Suez ?

**C.P. :** L'annonce que fait Nasser lors du 4<sup>e</sup> anniversaire du renversement de la monarchie ne prend personne complètement de court, non, même si elle trouve son explication dans un événement qui n'a rien à voir avec la gestion du canal : pour Nasser, qui vient de se voir refuser l'aide financière des États-Unis pour le financement du haut barrage d'Assouan, il s'agit avant tout d'exprimer son mécontentement et de récupérer de la marge de manœuvre financière. Sa décision est certes brutale, mais il ne faut pas oublier que la fin de la concession du canal était imminente : selon les termes du contrat de 1856, l'exploitation du canal devait revenir à l'Égypte en 1968.

### L'intervention militaire de la France et de la Grande-Bretagne, quelques mois plus tard, est en revanche un vrai coup de théâtre !

**C.P. :** Les Français, comme les Britanniques, ne souhaitent pas que l'administration du canal échoie à l'Égypte, et ont tout fait depuis les années 1930 pour montrer que les Égyptiens étaient incapables d'en assurer le bon fonctionnement. À la place, ils proposent à l'Égypte une administration internationale. Nasser refuse, raison pour laquelle l'opération militaire de 1956 est mise



sur pied. On connaît le scénario : suite à un accord secret, Israël envahit le Sinaï le 29 octobre, suivi par les Français et les Anglais qui bombardent la zone du canal dès le 31 octobre puis parachutent leurs troupes, officiellement pour maintenir la paix. Ce que l'on appelle la « crise de Suez » est stoppée net une semaine plus tard sous la pression des Nations unies, des États-Unis et de la Russie. Mais les dégâts côté égyptien sont considérables : on dénombre plusieurs milliers de morts civils et militaires. Depuis cette date, c'est l'Autorité égyptienne du canal de Suez qui gère le fonctionnement du canal.

### Le canal est-il un enjeu des conflits qui suivent dans la région, en 1967 et en 1973 ?

**C.P. :** Absolument pas. Le canal n'est pas un enjeu dans les guerres israélo-arabes de 1967 (la guerre des Six jours) et de 1973 (la guerre du Kippour), même si de par sa position géographique, il devient *de facto* une frontière militaire entre les deux belligérants. Fermé durant huit années, il est rouvert définitivement à la navigation en 1975. Grâce aux accords de paix de Camp David, signés en 1978 entre l'Égypte et Israël, la région du canal n'est désormais plus une zone de tension au Moyen-Orient.

► La décision du président Nasser (ici à Port-Saïd), en 1956, de nationaliser le canal est certes brutale... mais la fin de la concession de 99 ans attribuée à la compagnie était prévue pour 1968.

### Quelle place le canal de Suez occupe-t-il aujourd'hui dans l'économie égyptienne ?

**C.P. :** Le canal est le deuxième apport de devises du pays après le tourisme, avec 4,7 milliards de dollars de revenus en 2015. C'est une route maritime en plein essor, qui profite de la forte croissance du commerce mondial depuis les années 2000. Pour augmenter la fluidité du trafic et accroître sa rentabilité, l'Égypte a fait de gros travaux d'aménagement en 2015, en créant notamment des zones de dérivation. Il en va de sa pérennité : s'il reste une voie maritime très prisée, qui évite à nombre de bateaux de faire le tour de l'Afrique via le cap de Bonne espérance, le canal de Suez n'est pas la seule option pour les armateurs, qui font leurs arbitrages en fonction des tarifs – fluctuants – fixés par l'autorité égyptienne.

Pour les navires qui circulent entre la zone Pacifique et l'Europe, le canal de Panama est un vrai concurrent ; avec la fonte de la banquise arctique, le passage du nord est, par la Sibérie, va s'avérer une voie de plus en plus intéressante entre l'Asie et l'Europe. Enfin, une éventuelle remise en service des oléoducs de Syrie et d'Irak risquerait de capter une partie du transport des hydrocarbures, dont il est un axe privilégié. ||



À lire :  
« Les imaginaires du canal de Suez », édité par Randa Sabry et Sarga Moussa, Sociétés et représentations, n° 48, octobre 2019.



## À lire



## FAUNE ET FLORE

Comme son titre l'indique, cet ouvrage est un manuel raisonné présentant les faunes et flores sous-marines de Saint-Pierre-et-Miquelon. Illustré par des photographies de l'artiste Benjamin Deroche et des clichés de plongée pris par des membres du Laboratoire des sciences de l'environnement marin, ce livre constitue le tout premier inventaire (non exhaustif) des curiosités et beautés des fonds marins de l'archipel. Accompagnant cette magnifique iconographie, on y trouve pour chaque espèce des informations, parfois très pointues, sur les critères permettant de l'identifier, sur sa biologie, son écologie et sa répartition géographique.

*Patrimoine naturel des fonds marins de Saint-Pierre-et-Miquelon*, Groupe BeBest et Observatoire marin de l'Institut universitaire européen de la mer, éditions Fovearts, janvier 2020, 328 p., 25 €.

## UNIVERS

Il y a 130 millions d'années, dans une galaxie très lointaine, tandis que les premières plantes à fleur apparaissaient sur une Terre remplie de dinosaures, deux étoiles à neutrons entraînent en collision.

Cet événement cataclysmique généra non seulement beaucoup de rayonnement électromagnétique – sous forme de lumière, d'ondes radio, de rayons X ou gamma –, mais aussi une vibration du « tissu » de l'espace-temps – sous la forme d'une onde gravitationnelle. Le 17 août 2017, astronomes et physiciens observèrent d'abord l'onde gravitationnelle puis, de quelques secondes à quelques jours plus tard, les différents types de rayonnements électromagnétiques émis lors de la collision. C'était la première fois que l'on détectait conjointement ces deux types d'ondes provenant de la même source. Cet ouvrage très accessible revient sur l'histoire de cette découverte et les promesses qu'elle porte.

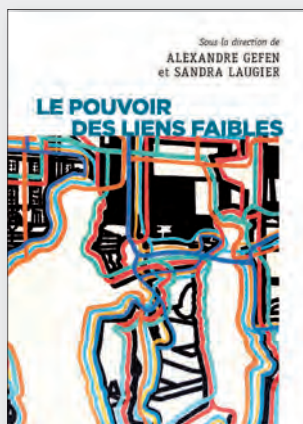
*Le Trésor des ondes gravitationnelles*, Pierre Spagnou, CNRS Éditions, coll. « Le Banquet scientifique », janvier 2020, 350 p., 25 €.



## RELATIONS

Forgée il y a 50 ans par le sociologue Mark Granovetter, la notion de « liens faibles » permet, par contraste, de rendre compte des ressources sociales inaccessibles aux liens forts que sont la famille, l'amour, le travail, etc. En interrogeant nos rapports aux visages, objets, lieux... qui déterminent notre relation aux autres, elle permet d'observer en quel sens nos affinités esthétiques, nos engagements politiques ou éthiques infléchissent nos existences. Cet ouvrage collectif se propose de s'emparer et de revisiter ce concept afin de mieux « rendre sensible la texture invisible de nos vies et de nos attachements ordinaires ».

*Le pouvoir des liens faibles*, Alexandre Gefen et Sandra Laugier (dir.), CNRS Éditions, janvier 2020, 384 p., 25 €.



## CONNAISSANCES

Ce numéro spécial d'*Hermès* prend ses sources dans une rencontre organisée en septembre 2019 à l'occasion des 80 ans du CNRS, où des chercheurs ont débattu autour de cinq questions fondamentales pour saisir les enjeux scientifiques, politiques et sociaux du XXI<sup>e</sup> siècle, allant de l'aide à la décision par les algorithmes à la révolution de la traduction automatique. Au-delà de la restitution de ces débats, des entretiens avec des artistes, psychanalystes, professionnels de la communication ou personnalités politiques viennent apporter un éclairage différent et complémentaire sur les transformations du monde contemporain.

« *La communication au cœur des connaissances* », Brigitte Chapelain et Bernard Valade (dir.), *Hermès*, n° 85, novembre 2019, 244 p., 25 €.



SOCIÉTÉS

# Profession *conlanger*, créer des langues pour la science-fiction

Par **Frédéric Landragin**, linguiste, directeur de recherche CNRS au laboratoire Langues, Textes, Traitements informatiques, Cognition<sup>1</sup>.

La série *Game of Thrones*<sup>2</sup> et la trilogie *Le Seigneur des anneaux*<sup>3</sup> ont fait connaître un nouveau métier requérant des compétences de linguiste : celui de *conlanger*. Il s'agit d'inventer une langue pour les besoins d'une fiction, que ce soit au cinéma, en littérature (J.R.R. Tolkien<sup>4</sup> est un célèbre *conlanger*), ou dans un jeu vidéo (comme la langue D'ni dans le jeu *Myst*). Plus la langue construite possède des caractères de langues naturelles réelles, plus elle « fait vrai » et contribue au décalage – spatial, temporel, culturel – qui nous fait apprécier la science-fiction et la fantasy, ce que désigne le terme *sense of wonder*, parfois traduit en « sens de l'émerveillement ».

## Langues modèles et universelles

Pour plus de réalisme et de plausibilité, la conception de langues fictives est désormais confiée à des linguistes spécialistes de *conlangering*. Le dothraki ou le haut valyrien, inventés par un linguiste devenu *conlanger*

à succès, David J. Peterson, pour l'adaptation de *Game of Thrones* par la chaîne HBO, sont des exemples de langues construites à l'image de langues naturelles. Elles sont en effet constituées de lexiques riches et variés, et présentent des subtilités linguistiques dignes d'être développées dans de volumineuses grammaires. Tout comme les langues elfiques du *Seigneur des anneaux* ou de *Thor*. *Le monde des ténèbres* (Alan Taylor, 2013). Certaines comprennent même une facette dite diachronique : comme les langues vivantes, elles sont envisagées évoluant avec le temps. L'anticipation linguistique est d'ailleurs un champ de la science-fiction, menant à des réflexions sur le futur des langues utilisées par des communautés de plus en plus importantes.

D'autres langues sont construites sur le modèle du *volapük* et de l'*espéranto*, en tant que moyens de communication pratiques pour les échanges internationaux. Et comme

► *Daenerys Targaryen* incarnée par Emilia Clarke dans *Game of Thrones*.

la science-fiction met en scène des civilisations extraterrestres, elle étend le champ d'application hors de notre planète en explorant la voie de l'astrolinguistique, à savoir la conception d'une langue « universelle » qui pourrait servir dans toute la galaxie. L'astrolinguistique est aussi une discipline bien réelle. Avec la *lingua cosmica*, qui fait le lien entre les fameux projets SETI et le récent METI, il s'agit ainsi de fonder une langue sur des principes supposés universels, en l'occurrence la logique et ses opérateurs : conjonction (« et »), disjonction (« ou »), implication, négation, etc.

## Communiquer avec les machines

L'intelligence artificielle (IA) est un autre sujet de prédilection de la science-fiction. Très tôt, les auteurs



Une fois par mois, retrouvez sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr) les Inédits du CNRS, des analyses scientifiques originales publiées en partenariat avec Libération.

1. Unité CNRS/École normale supérieure/Université Paris-3 Sorbonne nouvelle. 2. Série télévisée américaine médiévale-fantastique (2011-2019), créée par David Benioff et D.B. Weiss, adaptée des romans de George R.R. Martin.



ont imaginé des langues spécialement conçues pour communiquer avec les machines : le *mechaneese*, par exemple, intermédiaire entre langue naturelle et langage de programmation informatique. La redondance et l'ambiguïté y sont proscrites, car l'efficacité prime. La science-fiction récente a quelque peu abandonné cette voie, au profit de celle de la reconnaissance vocale et de la compréhension automatique – voire de l'IA – généralisées.

Enfin, la science-fiction féministe, parfois en lien avec le thème du cyborg, a également creusé la question de la langue, en tant que reflet des inégalités entretenues par la société. Nombreux sont les romans, par exemple *Native Tongue* (Suzette Haden Elgin, 1984) ou *Poumon vert* (Ian R. MacLeod, 2002), où une société matriarcale développe sa propre langue, où le féminin « l'emporte » sur le masculin, où les noms et les pronoms sont dépourvus de genre.

### Percevoir le monde

En explorant des langues imaginaires de multiples sortes, la science-fiction contribue à plusieurs questionnements sur l'universalité des langues, leur origine, leur capacité à changer les mentalités, etc. Parmi les linguistes célèbres, seuls quelques-uns sont cités par les auteurs de science-fiction.

Le premier est sans doute Noam Chomsky, pour ses idées sur l'innéisme et l'existence d'une « grammaire universelle ». C'est ainsi que l'auteur Ian Watson a publié en 1973 un roman inspiré de sa lecture de Chomsky, et dont le titre même – *L'Enchâssement* – paraîtra familier à ceux qui ont lu Chomsky. Plus qu'une réflexion sur le mécanisme d'enchâssement linguistique, consistant à mettre une phrase dans une phrase, ce roman a incarné un courant de la science-fiction que certains, en commençant par François Richaudeau et Marina Yaguello, appellent « linguistique fiction ». Le second, ou plutôt les seconds, sont Edward Sapir et



**À lire : Comment parler à un alien ? Langage et linguistique dans la science-fiction**, Frédéric Landragin, éd. Le Béalial' coll. Parallaxe, 2018.

Benjamin Lee Whorf pour leur thèse sur le relativisme linguistique, affirmant que notre langue influe notre façon de percevoir le monde, par exemple le temps, les couleurs, voire la neige. Adeptes des expérimentations et des exagérations en tous sens, la science-fiction s'est approprié cette idée et l'a transformée en déterminisme linguistique : notre langue détermine notre façon de percevoir. Autrement dit, pour reprendre le mot de Roland Barthes, la langue devient fasciste.

### La dictature par la langue

Le roman dystopique *1984* de George Orwell et *Les Langages de Pao* de Jack Vance sont les exemples typiques de cette exploitation de la thèse de Sapir-Whorf : pour rendre un peuple plus soumis (comme dans *1984*), ou au contraire plus agressif (comme dans *Les Langages de Pao*), un gouvernement n'hésite pas à changer la langue, à imposer l'usage de certains mots ou **morphèmes** plutôt que d'autres. Le

film *Premier Contact* (Denis Villeneuve, 2016), adaptation de la nouvelle de Ted Chiang (*L'Histoire de ta vie*, 1998), regroupe les caractéristiques d'une linguistique-fiction. L'héroïne, Louise Banks, est linguiste (un portrait de Chomsky est même visible dans son bureau) ; la langue des extraterrestres (et notamment son système d'écriture où les phrases forment des cercles agrémentés de magnifiques graphismes) est remarquable d'originalité ; la thèse de Sapir-Whorf est exploitée à l'extrême (en apprenant cette langue, Louise Banks est transformée au point d'avoir des visions) ; et l'universalité pointe le bout de son nez à la fin, quand l'héroïne reçoit des exemplaires de son livre, intitulé *The Universal Language*.

Comme quoi le premier contact avec des extraterrestres, au-delà de son aspect spectaculaire et du *sense of wonder* jamais très loin, permet de faire réfléchir sur le langage et sur la linguistique, voire d'en vulgariser quelques-unes de ses théories. **II**

## PETIT LEXIQUE DU CONLANGER

### CONLANGER

Créateur de *conlang* ou *constructed language* (c'est-à-dire « langue construite »).

### VOLAPÜK

Langue construite créée en 1879-1880 par le prêtre catholique allemand Johann Martin Schleyer, qui, lors d'une insomnie, sentit que Dieu lui commandait de créer une langue auxiliaire internationale.

### ESPÉRANTO

Langue construite internationale, créée en 1887 par Ludwik Lejzer Zamenhof, utilisée par des personnes provenant d'au moins 120 pays à travers le monde.

### LINGUA COSMICA

La langue cosmique (du latin *lingua cosmica*), ou *lincos*, est une langue construite sur une base logique,

exempte de l'ambiguïté et de la polysémie des langues humaines. Créée par le mathématicien Hans Freudenthal en 1960, refondée par l'informaticien Alexander Ollongren en 2012, elle a l'ambition de représenter toutes nos connaissances en vue de leur transmission radio vers des extraterrestres intelligents.

### SETI

Le Search for Extra-Terrestrial Intelligence (« recherche d'intelligence extraterrestre ») regroupe des projets scientifiques essentiellement américains dont l'objectif est de détecter la présence d'intelligences extraterrestres dans d'autres systèmes solaires. Le premier projet est lancé en 1960 à l'initiative de l'astronome Frank Drake.

### METI

Le Messaging Extra-Terrestrial Intelligence est une branche du Seti destinée à émettre un message à l'attention d'une intelligence extraterrestre.

### MECHANESE OU « IDIOME MÉCANIQUE »

Langue artificielle de fiction imposée à un humain dans le livre *L'Enfant des étoiles* (Frederik Pohl et Jack Williamson, 1965) pour pouvoir communiquer avec une machine toute puissante.

### MORPHÈME

Partie de mot, comme le préfixe « re » de « rejouer », le suffixe « able », qui permet de construire un adjectif, ou les marques du genre et du nombre. Les morphèmes sont les plus petits éléments significatifs d'un mot.

3. Série de trois films de fantasy américano-néo-zélandaise (*La Communauté de l'anneau*, 2001 ; *Les Deux tours*, 2002 ; *Le Retour du roi*, 2003) réalisée par Peter Jackson et fondée sur le roman éponyme, en trois volumes, de J.R.R. Tolkien. 4. John Ronald Reuel Tolkien ou J. R. R. Tolkien, est un écrivain et professeur d'université britannique (1892-1973). Il est principalement connu pour ses romans *Le Hobbit* et *Le Seigneur des anneaux* dont sont adaptés les films de Peter Jackson.

# « Innover, c'est aussi chercher à améliorer nos conditions de vie »



© KEN DIMARU

SOCIÉTÉS

**Économie.** Notre conception de l'innovation a radicalement changé ces dernières décennies, et une approche davantage fondée sur le bien-être et l'humain se serait substituée à l'idéologie techno-centrée des années 1990. C'est l'analyse de l'économiste Sébastien Lechevalier qui a dirigé un récent ouvrage sur le sujet.

PROPOS RECUEILLIS PAR FABIEN TRÉCOURT

**Votre livre<sup>1</sup> *Innovation Beyond Technology* (Springer, 2019) montre à quel point ces dernières décennies ont été un « âge d'or » pour l'innovation technologique...**

**Sébastien Lechevalier<sup>2</sup>:** Plusieurs indicateurs témoignent en effet d'une accélération depuis les années 1990, qu'il s'agisse de l'augmentation des investissements dans la recherche et l'ingénierie, du nombre de chercheurs ou de publications. Et quand on s'intéresse à l'histoire des sciences et des idéologies, on constate que l'innovation devient une valeur cardinale dans ces années-là. À la tête des entreprises comme des États, l'idée s'impose que l'innovation (essentiellement technologique) est la condition *sine qua non* pour se développer, prospérer, ou tout simplement survivre.

**Comment cette idéologie s'est-elle installée ?**

**S. L. :** Dans notre ouvrage, plusieurs auteurs montrent que la fin de la guerre froide et l'échec du communisme ont porté un coup à l'idée de progrès. Des travaux d'économistes qui s'inspirent, depuis les années 1970, de l'œuvre de Joseph Schumpeter sur la destruction créatrice, s'imposent alors comme une alternative. Selon eux, plus un gouvernement investit dans l'innovation, encourage les citoyens à entreprendre et à créer de

nouvelles technologies, plus l'économie prospère. Se construit ainsi dans les années 1990 le mythe de la nouvelle économie qui explique et justifie la domination technologique américaine. Cela conduit également à des changements profonds dans les théories économiques de la croissance qui mettaient jusqu'alors l'accent sur l'accumulation de capital et du travail, laquelle se heurte inévitablement à des limites. En mettant l'accent sur l'innovation, les néo-schumpétériens permettent de penser une économie de la connaissance et d'envisager la croissance comme illimitée.

► Une cabine « Orange Money » à Dakar, au Sénégal (2015). Gérées par Sonatel, opérateur d'Afrique, et détenues en partie par Orange, elles permettent de transférer de l'argent par téléphone.

**Pourquoi un tournant s'amorce-t-il autour des années 2000 ?**

**S. L. :** Autour de cette décennie, le paradigme néo-schumpétérien est remis en question : on s'aperçoit, notamment après la crise de 2008-2009, que la croissance ralentit dans les pays riches, alors même que la politique d'innovation s'est amplifiée. S'y ajoute la part de fantasmes et d'emballlement de la technophilie des années 1990, mère de désillusions. En médecine par exemple, le contraste est fort entre, d'un côté, les progrès liés à la thérapie génique, le traitement de certains cancers ou du



© AMP PHOTO / SETILOU

1. Ce livre est le fruit d'une étroite collaboration entre la Japan science and technology agency, le CNRS et l'EHESS pour l'organisation de deux conférences à Paris et à Tokyo en 2015 et 2016 : « Engaging Society in Innovation and Creativity: Perspectives from Social Sciences and Humanities » et « Innovation Beyond Technique ».





Lire l'intégralité de l'entretien sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)



*Innovation Beyond Technology: Science for Society and Interdisciplinary Approaches*, Sébastien Lechevalier (dir.), Springer, 2019, 324 p.

sida, et d'un autre côté les conditions d'accueil des patients ou le traitement de la souffrance. On constate alors que l'innovation ne s'accompagne pas nécessairement d'une amélioration des conditions de vie ou du bien-être. Ce serait même parfois le contraire, à voir l'essor de controverses sur l'obsolescence programmée par exemple. De nombreux scandales liés à la technologie – impact des pesticides, effets indésirables de certains médicaments, etc. – ont également nourri des doutes croissants sur les bienfaits finis de l'innovation technologique. Enfin, la catastrophe de Fukushima, dans un pays dont l'industrie nucléaire était réputée pour sa sûreté, a nourri une vague de doutes dans la communauté scientifique et l'imaginaire collectif.

### Une nouvelle conception de l'innovation émerge-t-elle à présent ?

**S. L. :** Depuis quelques années, l'idée que l'innovation ne se réduit pas aux nouvelles technologies prend de l'importance. Innover, de ce point de vue, c'est aussi imaginer des usages, des cadres juridiques ou encore des politiques susceptibles d'améliorer nos conditions de vie. Si nous voulons lutter contre le réchauffement climatique, par exemple, il faudra bien sûr inventer des moyens de transport moins énergivores et moins polluants. Mais nous devons également repenser nos règles de circulation, appréhender la ville et le maillage territorial autrement. Une tendance lourde consiste aussi à se départir d'une approche trop centrée sur ce que l'on observe aux États-Unis, en Europe, au Japon ou en Corée... Certaines initiatives sont ainsi remarquables dans les pays du Sud. Au Sénégal par exemple, des entrepreneurs locaux ont monté un système de prêts et de paiements

grâce à un simple réseau de téléphones portables permettant à des agriculteurs ou de jeunes entrepreneurs d'accéder à des services similaires à ceux de nos banques en ligne. La conjonction de besoins humains, de nouveaux usages et certes d'outils technologiques, apparaît ainsi comme un facteur d'innovation. Ce type de pratiques, analysées avec des concepts tels que « *grassroots innovation* » ou « *reverse innovation* », inspire aujourd'hui un champ de l'économie davantage centré sur l'humain.

### D'où l'intérêt de l'approche pluridisciplinaire de votre ouvrage...

**S. L. :** Les facteurs humains ou les usages sont en effet parfois négligés dans les formations en ingénierie. J'ai moi-même été bousculé par les questions de mes collègues philosophes, épistémologues ou historiens des sciences ! Ils nous ont aidés à cerner le poids de l'idéologie néoschumpétérienne ou encore à interroger le sens du mot « progrès ».

### Comment favoriser le progrès au sens large ?

**S. L. :** Il est essentiel d'ouvrir le débat avec les chercheurs, les ingénieurs, mais aussi les politiques et la société civile. L'idée n'est pas nouvelle mais les progrès en ce sens restent timides. Nous devons imaginer des moyens d'impliquer les citoyens, afin de coupler l'innovation technologique et une réflexion sur nos besoins réels – sociaux, éthiques, environnementaux, etc. Je crois enfin que le secteur privé a un rôle majeur à jouer. Le succès d'une entreprise ne peut plus se mesurer uniquement à l'aune de l'augmentation de son taux de profit. Les entreprises doivent intégrer dans leurs objectifs le bien-être global des consommateurs, de leurs salariés et de leurs partenaires. ■

## À voir

### EXPOSITION

**L'envers et l'endroit ; le droit et le tortu ; l'ordre et le désordre ; le grand et le petit...** La Cité des sciences et de l'industrie à Paris propose un nouvel espace insolite pensé pour aider le jeune public à appréhender les opposés.



Dans un village poétique composé notamment d'une maison décolorée, d'une école étrange et d'un square « tête en bas », les enfants pourront expérimenter des couples de contraires en mobilisant leurs différents sens. Une exposition destinée aux 2-7 ans, dont le CNRS est partenaire scientifique, à explorer jusqu'au 3 janvier 2021.

**Contraires, Cité des sciences et de l'industrie, Paris, jusqu'au 3 janvier 2021.**



» [www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/expos-temporaires/prochainement/contraires](http://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/expos-temporaires/prochainement/contraires)

## À lire

### NATURE

**Anthropologues, économistes, écrivains, ethnologues, poètes, géographes dessinateurs, jardiniers-paysagistes, philosophes, photographes et bien d'autres...** Soixante-seize auteurs, scientifiques ou artistes, originaires de tous les continents, dressent ici un panorama mondial de l'anthropologie de la nature tout en témoignant de

l'influence qu'a eu Philippe Descola sur leurs travaux, voire sur leur vie. Autant de regards différents qui mettent en exergue l'importance et l'actualité des travaux du médaillé d'or 2012 du CNRS.



**Au seuil de la forêt. Hommage à Philippe Descola, l'anthropologue de la nature**, Geremia Cometti, Pierre Le Roux, Tiziana Manicone et Nastassja Martin (dir.), Tautem, novembre 2019, 112 p., 39 €.

### GÉOSCIENCES

**D'étonnantes illustrations combinées à des textes courts et pédagogiques** brossent un portrait de notre planète ainsi qu'un état des lieux des connaissances des scientifiques.

Depuis la croûte terrestre jusqu'au noyau en fusion, les auteurs nous parlent de volcans et de séismes, de fonds marins et d'exploration spatiale dans cet ouvrage accessible, véritable invitation à la découverte des géosciences.



**La Terre à l'œil nu**, Nicolas Coltice, Romain Jolivet, Jean-Arthur Olive et Alexandre Schubnel, CNRS Éditions, septembre 2019, 168 p., 18 €.

## À lire

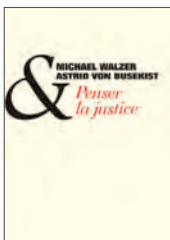
## DÉMONSTRATIONS PUBLIQUES

Constatant que nombre d'individus sont quotidiennement confrontés – quand ils n'en sont pas eux-mêmes acteurs – à une succession de démonstrations publiques (allant de la présentation Powerpoint à la manifestation en passant par le télé-achat ou la keynote Apple), le sociologue Claude Rosental propose de montrer pourquoi ces démonstrations constituent un outil de conviction et de promotion, mais aussi une forme fondamentale d'interaction et d'échange. Il s'appuie pour cela sur les résultats d'enquêtes réalisées, aujourd'hui ou par le passé, dans des espaces aussi divers que l'entreprise, la rue, les foires commerciales ou les salons informatiques.



*La Société de démonstration*, Claude Rosental, éditions du Croquant, octobre 2019, 340 p., 20 €.

## POLITIQUE



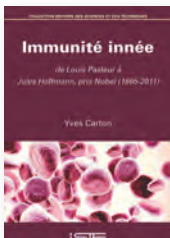
Dans ce livre d'entretiens, la professeure de théorie politique Astrid von Busekist interroge une figure marquante de la gauche intellectuelle étasunienne : le philosophe politique Michael Walzer. Enfant du Bronx, Walzer – âgé aujourd'hui de 80 ans – défend depuis les années 1950 une morale politique enracinée dans les traditions

culturelles mais capable de dialoguer par-delà les frontières. Il rejette ainsi les postures théoriques et la critique philosophique détachée du réel, car selon lui, le débat philosophique n'est utile que s'il s'adosse aux pratiques concrètes et à la moralité des sociétés.

*Penser la justice*, Michael Walzer et Astrid von Busekist, Albin Michel, coll. « Itinéraire du savoir », février 2020, 368 p., 22,90 €.

## IMMUNOLOGIE

Première ligne de défense de l'organisme contre les pathogènes, l'immunité innée existe aussi bien chez les vertébrés que chez les invertébrés. À la différence de l'immunité acquise (celle exploitée par les vaccins), ce type d'immunité se met en place dans les secondes qui suivent l'intrusion grâce à des acteurs cellulaires ou humoraux mobilisables immédiatement. Cet ouvrage examine la façon dont l'immunité innée a été élucidée, des travaux de Pasteur sur la maladie du ver à soie jusqu'au prix Nobel attribué à Jules Hoffmann pour sa découverte des similitudes entre la réponse innée des insectes et celle observée chez l'homme.



*Immunité innée. De Louis Pasteur à Jules Hoffmann, prix Nobel (1865-2011)*, Yves Carton, ISTE Éditions, coll. « Histoire des sciences et des techniques », septembre 2019, 312 p., 75 €.

# La ménopause est-elle une construction sociale ?



SOCIÉTÉS

**Sociologie.** Loin d'être une expérience universelle, la ménopause serait aussi une construction sociale qui, en mettant en scène le vieillissement féminin, éclairerait les rapports sociaux de sexe en Occident. Entretien avec Cécile Charlap, auteure de *La Fabrique de la ménopause*.

PROPOS RECUEILLIS PAR SANDRINE HAGÈGE

**Dans votre livre, on découvre que le terme de ménopause est né en France, en 1821. Quel est le contexte de sa création ?**

**Cécile Charlap** : C'est un médecin français, Charles de Gardanne, qui invente ce terme dans une période d'intérêt grandissant pour les maladies des femmes. À partir du XVIII<sup>e</sup> siècle, dans le contexte de renouveau des Lumières, avec l'essor de la science naturelle, des catégorisations, de la rationalité, on voit s'affermir une pensée bicatégorielle du corps, avec un corps féminin et un corps masculin perçus comme des entités différentes et opposées. Cette construction d'une biologie féminine va se poursuivre tout au long du XIX<sup>e</sup> siècle. Avec l'essor de la psychiatrie, la ménopause sera même pensée, dans le contexte des Folles de Charcot, comme la cause de maladies mentales et de fureurs cleptomanes ou sexuelles.

**On apprend aussi que c'est un concept occidental...**

**C. C.** : L'anthropologue Margaret Lock a montré que dans le Japon d'avant

les années 1990, il n'existe pas de terme équivalent à cette notion d'arrêt de la fertilité et des règles. Il y a un terme, le « *konenki* », qui englobe le vieillissement en général, féminin comme masculin. Et si, en Occident, être féconde c'est mettre au monde un enfant, au Japon, cette notion se poursuit dans l'éducation : les grands-mères rencontrées par Margaret Lock se sentaient toujours fertiles parce qu'elles s'occupaient des petits-enfants.

**Comment la vision médicale a-t-elle évolué ?**

**C. C.** : Lorsque la notion émerge, on pense le corps en termes d'« humeurs ». La ménopause est expliquée par un manque de force chez les femmes, avec l'âge, pour expulser le sang menstruel, et cette rétention sanguine serait la cause de nombreux troubles : cancers, inflammations, polypes, ulcères... Les médecins proposent alors aux femmes l'imposition de sangsues ou des saignées. Puis, au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, les médecins déconseillent aux femmes ménopausées de faire du

1. Maîtresse de conférences à l'Université de Toulouse Jean-Jaurès, chercheuse au Laboratoire interdisciplinaire solidarités, sociétés, territoires (unité CNRS/Univ. Toulouse Jean-Jaurès/EHESS/École nationale de formation agronomique).





Lire l'intégralité de l'entretien  
sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)

vélo ou de prendre le train, reproduisant les préjugés d'alors sur les dangers de la vitesse. Au tournant du XX<sup>e</sup> siècle, une conception hormonale du corps va peu à peu s'imposer et la ménopause sera pensée comme une maladie de la carence en œstrogènes, en lien étroit d'ailleurs avec le développement des hormones de synthèse par les industries pharmaceutiques, qui culmineront dans les années 1960 à 1980. Ces traitements hormonaux de substitution (THS) sont aujourd'hui en perte de vitesse sur le marché occidental, depuis que deux études<sup>2</sup> ont établi des liens entre prise de THS et cancer, mais le marché asiatique a explosé depuis les années 1990.

### Ce concept s'est donc surtout construit sur une approche pathologique ?

**C. C. :** La ménopause est dite par les médecins, pensée dans le cadre médical et associée à trois registres. D'abord le symptôme, qui va former une sorte de grammaire du corps que les femmes apprennent au cours de leur vie. Puis la déficience, cette idée que la ménopause n'est pas une



*La Fabrique de la ménopause*, Cécile Charlap, CNRS Éditions, février 2019.

▶ La série britannique *Absolutely Fabulous* met en scène les mésaventures de deux quadragénaires déjantées, Edina et Patsy. Cet épisode (2001), aborde avec humour les traitements médicaux et autre réunion des « ménopausées anonymes ».

transformation hormonale mais une perte, établie à partir d'un standard correspondant aux taux hormonaux des femmes en période de fécondité, comme si le corps fécond était la norme. Enfin, le troisième registre est celui du risque : de cancer, d'ostéoporose et en général d'altération de la qualité de vie, comme si cette altération n'était pas le propre du vieillissement mais celui de la ménopause.

### Cette image finalement très négative du vieillissement féminin est-elle représentative des rapports sociaux de sexe ?

**C. C. :** Ma thèse, c'est que la construction de la ménopause est éminemment ancrée dans les rapports sociaux de sexe et la hiérarchie du masculin et du féminin, dans laquelle le corps masculin est pensé avant tout comme stable et du côté de la raison, quand le corps féminin serait le lieu de la « nature », des tourments, de l'instabilité. Notre conception de la ménopause introduit l'idée d'un vieillissement plus précoce et plus déficitaire pour les femmes que pour les hommes. On l'observe dans l'espace public, avec un Sénat rempli

d'hommes aux cheveux blancs valorisés pour leur expérience et leur maturité. Le corps des femmes est par ailleurs pensé du point de vue de la fécondité et d'attributs esthétiques très valorisés. Ainsi, la mise en exergue de la stérilité et de l'altération des qualités esthétiques organise des représentations du vieillissement au féminin qui font que, pour les femmes, vieillir c'est perdre de la valeur sociale.

### Vous parlez aussi d'une « ménopause sociale ». de quoi s'agit-il ?

**C. C. :** J'ai essayé de montrer que ce n'est pas au moment de la ménopause physiologique que les femmes arrêtent de faire des enfants. La stérilité advient bien avant et cette stérilité sociale se construit dans le discours médical et médiatique. Les grossesses à partir de 38-40 ans sont présentées comme particulières : dans les ouvrages médicaux, on consacre des chapitres spécifiques à ces grossesses dites « dangereuses » ou « à risque », et à ce titre, déconseillées. Dans les médias, elles sont affichées comme « tardives » et devant être justifiées. Ces discours construisent une norme de déprise de la fécondité à partir de la quarantaine. Par comparaison, les paternités après 40 ans ne sont pas pensées comme particulières.

### Que pensez-vous de l'émergence du concept d'andropause ?

**C. C. :** C'est une catégorie très intéressante à observer mais qui a du mal à s'imposer. Le corps masculin et ses questions de génitalité ou de contraception sont beaucoup moins mobilisés par la recherche. Il y aurait un travail à faire sur l'émergence de cette catégorie dans la littérature médicale et institutionnelle, et plus largement, sur les manières de penser la fécondité masculine. ||



© FRENCH & SAUNDERS PRODUCTIONS / BBC / COLLECTION CHRISTOPHE L.

2. L'étude américaine Women's Health Initiative (WHI), parue dans *Journal of the American Medical Association*, 2002, 288(3):321-33) et l'étude britannique Million Women Study (MWS) publiée en 2003 dans *Lancet* 362(9382):419-27.







*Hervé Fritz*, directeur de recherche CNRS au Laboratoire de biométrie et biologie évolutive<sup>1</sup>

# “Je me souviens...”

PROPOS RECUEILLIS PAR ANNE-SOPHIE BOUTAUD

...de ce projet National Geographic, mené dans le parc national de Hwange au Zimbabwe. C'était en 2009, dans le cadre d'une thèse réalisée par Éléonore Hellard. Sur la photo, elle inspecte un terrier de hyène. Notre objectif était de comprendre l'écologie spatiale des hyènes à l'intérieur et à la périphérie du parc, labellisé zone Atelier. Le suivi des terriers est crucial pour cette compréhension car ils structurent l'usage de l'espace d'un clan. Les hyènes utilisent souvent des passages busés sous les routes comme terriers, notamment pour la mise bas des jeunes. Cette photo illustre bien ce que peut être une recherche de terrain sur la faune africaine : comme en témoigne la présence du garde des parcs nationaux qui accompagne Éléonore, c'est une faune dangereuse. Cette étude s'est poursuivie par la thèse de Stéphanie Périquet, centrée sur les interactions entre les hyènes et les lions. En effet, suite au moratorium sur la chasse au lion entre 2004 et 2009, la cohabitation entre ces carnivores a beaucoup changé entraînant... une augmentation des populations de lions.”

PHOTO : FRANÇOIS DEBIAS/HERD/CNRS PHOTOTHÈQUE

1. Unité CNRS/Université Claude-Bernard Lyon 1.





de Denis Guthleben,  
historien au CNRS

# Lumière sur Becquerel

Troisième source renouvelable d'électricité derrière l'hydraulique et l'éolien, le photovoltaïque est en train de se tailler une place au soleil dans notre pays. Bien sûr, la France reste loin derrière la Chine et fait encore pâle figure face à certains de ses partenaires européens. Mais nous pourrions vite sortir de l'ombre : portée par une recherche de pointe, dont vous avez déjà pu apprécier certains des fleurons tels que l'Institut photovoltaïque d'Ile-de-France (IPVF) dans votre journal<sup>1</sup>, et par un tissu industriel dynamique, cette énergie connaît

un bel envol depuis plusieurs années. Elle pourrait ainsi passer de moins de 10 gigawatts de puissance aujourd'hui, à plus de 40 gigawatts avant la fin de la prochaine décennie. Il n'était que temps, quand on sait qu'elle repose sur une découverte bien de chez nous !

## Dans la famille Becquerel, je voudrais... Edmond !

La découverte de l'effet photovoltaïque, c'est comme un jeu de sept familles dans lequel une carte est souvent restée dans l'oubli. Chez les Becquerel, on se souvient volontiers de l'aïeul, Antoine (1788-1878), qui, outre ses travaux pionniers dans des domaines aussi divers que la physique, la chimie ou la géologie, s'est illustré par des faits d'armes qui lui ont valu plusieurs citations à l'ordre du jour

de la Grande Armée. Plus souvent encore, on songe à Henri (1852-1908), le découvreur en 1896 des « rayons uraniques » – c'est-à-dire de la radioactivité – et le lauréat, avec Marie et Pierre Curie, du prix Nobel de physique en 1903. Et, plus près de nous enfin, il y a Jean (1878-1953), un spécialiste reconnu des propriétés optiques et magnétiques des cristaux.

Edmond (1820-1891), lui, manque souvent à l'appel, comme broyé entre la gloire de son père Antoine et

celle de son fils Henri. Il faut dire que les intéressés eux-mêmes se sont donné la peine de brouiller les cartes. D'une part, ils ont travaillé main dans la main d'une génération à l'autre – Antoine initie Edmond à la recherche sur l'électricité et partage la plupart de ses publications, tandis qu'à son tour Edmond encourage Henri dans l'étude des sels phosphorescents, dont celui d'uranium. D'autre part, les Becquerel ont occupé la même chaire de physique du Muséum national d'histoire naturelle, transmise de père en fils des années 1830 à la Seconde Guerre mondiale... un cas flagrant de népotisme qui se serait peut-être perpétué si Jean ne s'était pas éteint sans descendance en 1953 !

## Le père de l'effet photovoltaïque

Toujours est-il que dans cet écheveau familial, un élément est avéré : si Edmond est bel et bien le fils de son père et le père de son fils, ce n'est ni son père, ni son fils – et encore moins son petit-fils ! – mais lui, sans aucun doute possible, le père de l'effet photovoltaïque. Le 4 novembre 1839, alors qu'il n'est encore que le tout jeune « aide naturaliste » d'Antoine au Muséum, il présente à l'Académie des sciences un mémoire « sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires ». Il y constate en effet que « des rayons qui accompagnent les rayons les plus réfringibles de la lumière solaire, font éprouver à des lames métalliques plongées dans un liquide, une action telle, qu'il en résulte des effets électriques auxquels on ne peut attribuer une origine calorifique ».

Évidemment, les experts ne manqueront pas de souligner qu'on est loin des cellules photovoltaïques telles qu'on les connaît aujourd'hui. Le phénomène observé par Edmond, lié à ceux mis en œuvre pour la photographie argentique qu'il a également étudiée, relève de la chimie et de l'électrochimie. Il provient de la transformation de la matière qui s'opère sous l'effet des rayons solaires au contact de liquides. Et le chemin sera encore long jusqu'à son application à des dispositifs solides à semi-conducteurs, puis la fabrication des premiers panneaux au silicium en 1954. Mais l'aventure est en marche, et son initiateur méritait bien d'être remis en pleine lumière, à l'occasion du symposium qui sera organisé en son honneur le 24 mars prochain, le jour même du 200<sup>e</sup> anniversaire de sa naissance<sup>2</sup>. ||

*“Le photovoltaïque est en train de se tailler une place au soleil dans notre pays. Il n'était que temps, quand on sait que cette énergie repose sur une découverte bien de chez nous !”*

1. Voir « Le soleil brille déjà », CNRS Le Journal, n° 295, hiver 2019. 2. Symposium Edmond Becquerel, 24 mars 2020, inscriptions gratuites dans la limite des places disponibles. Pour plus de renseignements : <https://www.ipvf.fr/edmond-becquerel-symposium/>





# Trouver un expert ?

Un nouveau service pour vous aider à identifier un expert ou une experte dans un des 1 100 laboratoires du CNRS et de ses partenaires.

Ce service s'adresse aux entreprises, services de l'État, collectivités territoriales.

[trouverunexpert.cnrs.fr](http://trouverunexpert.cnrs.fr)



**LE CNRS PARTICIPE !**

**SEMAINE  
DU CERVEAU  
2020**

**EN EUROPE ET DANS PLUS DE  
120 VILLES EN FRANCE**

**16 ————— 22 MARS**

EXPOSITIONS  
CINÉ-DÉBATS  
SPECTACLES  
ATELIERS  
RENCONTRES  
CONFÉRENCES  
ANIMATIONS SCOLAIRES  
CAFÉ SCIENCES



SOUS LE HAUT PATRONAGE DE  
MME FRÉDÉRIQUE VIDAL  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR,  
DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION

[www.semaineducerveau.fr](http://www.semaineducerveau.fr)





# CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS #7



**#7** actuellement  
en vente  
en librairie et Relay

200 pages / **12,50 €**

cnrs

CNRS EDITIONS

[www.carnetsdescience-larevue.fr](http://www.carnetsdescience-larevue.fr)