



**LE DROIT**  
peut-il  
sauver  
**la nature ?**

Les lauréat(e)s  
2017 de la  
**médaille**  
**de l'innovation**

**En route**  
**vers une**  
chimie plus  
**écologique**

Les premiers  
pas de la  
robotique  
aérienne

MA



FINALE NATIONALE

THESE



EN DIRECT SUR  
MT180.FR  
#MT180

EN



180 SECONDES

14 JUIN 2017  
18H30

MAISON DE LA RADIO  
STUDIO 104 - PARIS 16



INSCRIPTION GRATUITE OBLIGATOIRE SUR MT180.FR

ORGANISÉ PAR



CONFÉRENCE  
DES PRÉSIDENTS  
D'UNIVERSITÉ

AVEC LE SOUTIEN DE



LA SAGA DE...

# Jean Rouch

*l'ethnologue-cinéaste*

À l'occasion du centenaire de sa naissance, le CNRS met en ligne *La saga de... Jean Rouch*.

Un site pour découvrir, ou redécouvrir, le parcours de cet amoureux de l'Afrique, précurseur de nouvelles techniques cinématographiques.

Mise en ligne : 15 mai 2017

[sagascience.com/jeanrouch](http://sagascience.com/jeanrouch)



Photo : BNF | Expo BNF IR | © DR

**Rédaction :**

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

**Téléphone :** 01 44 96 53 88**E-mail :** lejournald@cnrs.fr**Le site Internet :** <https://lejournald.cnrs.fr>**Anciens numéros :**<https://lejournald.cnrs.fr/numeros-papiers>**Gérer son abonnement au journal****(pour les agents du CNRS) :**<https://lejournald.cnrs.fr/abojournal>**Directeur de la publication :**

Alain Fuchs

**Directrice de la rédaction :**

Brigitte Perucca

**Directeur adjoint de la rédaction :**

Fabrice Impériali

**Rédacteur en chef :**

Matthieu Ravaud

**Chef de rubrique :**

Charline Zeitoun

**Rédacteurs :**

Laure Cailloce, Claire Debôves,

Yaroslav Pigenet

**Assistante de la rédaction****et fabrication :**

Laurence Winter

**Ont participé à ce numéro :**Kheira Bettayeb, Julien Bourdet,  
Anne-Sophie Boutaud, Bruno Caietti,  
Grégory Fléchet, Denis Guthleben,  
Martin Koppe, Fui Lee Luk, Hugo Leroux,  
Véronique Meder, Christelle Mercier  
Pineau, Saman Musacchio, Émilie Silvoz,  
Jean-Baptiste Veyrieras**Secrétaires de rédaction :**

Isabelle Grandrieux, Sandrine Hagège

**Conception graphique :**

Céline Hein

**Iconographes :**

Anne-Emmanuelle Héry,

Marie Mabrouk

**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 : manifestation en  
Étateur contre Chevron Texaco.

PHOTO : L. DEMATTEIS/REDUX-REA

**L**a recherche en sciences humaines et sociales (SHS), aussi diversifiée dans ses objets et ses méthodes que dans ses disciplines, est depuis quelques années très explicitement mobilisée afin d'apporter des réponses aux grandes questions d'aujourd'hui. Comme le montre l'enquête de ce numéro de *CNRS Le journal*, c'est le cas sur le sujet de l'évolution des pratiques du droit face à la mondialisation ou pour la défense de la planète. La recherche démontre clairement que le droit a toujours su s'adapter aux situations nouvelles. Ainsi, face à la mondialisation, ont été constitués des tribunaux arbitraux, une Cour européenne des droits de l'homme ou la Cour pénale internationale. Afin d'améliorer la protection de l'environnement, certains pays ont même décidé d'attribuer un statut de personnes à certains fleuves, ce qui permet de les défendre devant les tribunaux !

*“La recherche  
en SHS s'inscrit  
dans une démarche  
d'innovation.”*

La recherche en SHS s'inscrit aussi volontiers dans une démarche d'innovation marquée par des allers et retours avec les différents acteurs de la société. Cette démarche aboutit souvent à une valorisation de ces travaux. Le salon Innovatives SHS, les 17 et 18 mai à Marseille, est l'occasion de présenter soixante-dix exemples de ces valorisations françaises et québécoises. Elles concernent la santé, thème sur lequel nous avons décidé de placer l'accent cette année, mais aussi le patrimoine, les territoires ou bien encore l'éducation et l'expertise. L'utilisation de tout l'éventail des outils numériques permet aussi bien d'inventer de nouvelles mises en valeur du patrimoine, en y intégrant des démarches collaboratives, que de proposer de nouveaux dispositifs de rééducation ou de prévention dans le domaine de la santé individuelle et collective. La révolution de la géolocalisation a débouché sur de très nombreux produits logiciels, de modélisation et de simulation, offrant souvent une aide à la décision publique. Enfin, nos équipes n'ont pas oublié les logiciels de jeux éducatifs ou de « serious games » qui permettent d'améliorer les performances dans de nombreux domaines, allant de l'orthographe à l'effort physique. Une diversité de recherches qui permet de prendre toute la mesure de la faculté d'innovation des sciences humaines et sociales.

*Patrice Bourdelais,*  
directeur de l'Institut des sciences  
humaines et sociales du CNRS



© C. FRESILLON/CNRS PHOTO THEQUE



© C. TARABOUT, F. ARTZNER

# GRAND FORMAT

13

Justice : les défis du XXI <sup>e</sup> siècle .....	14
Au royaume des lumières .....	26
Vers une chimie plus écologique .....	32

Delphine Delacour  
ou la culture  
de la cellule



6

© S. RUAT

## EN PERSONNE 5

Yves Meyer reçoit le prix Abel .....	8
Médaille de l'innovation, le palmarès 2017 .....	10
Philippe Coussot, aux confins de la matière .....	12

Les premiers pas  
de la robotique  
aérienne



38

© LAAS-CNRS

## EN ACTION 37

Paris, capitale mondiale des maths en 2022 ? .....	40
Des particules cosmiques pour ausculter les volcans .....	42
De l'égyptologie aux robots, les sciences humaines innovent .....	44
Les ambitions de la voiture à hydrogène .....	46
L'extraordinaire sens de l'orientation des fourmis .....	48
Comment se préparer à une crue de la Seine ? .....	50
Ce système de sept planètes pourrait être habitable .....	52

Mais qui sont  
vraiment  
les pirates ?



56

© FERRIS, J. L. GEROME/PRIVATÉ  
COLLECTION/REIDIGERIAN IMAGES

## LES IDÉES 55

Des algorithmes contre la démocratie ? .....	59
Comment rapprocher la science des citoyens .....	60
Fascinante parole sifflée .....	62
Leurs territoires ne sont pas « minables » ! .....	63

### CARNET DE BORD

Laurent Bruxelles nous raconte un souvenir de recherche ... 64

### LA CHRONIQUE DE DENIS GUTHLEBEN

La mesure des pôles .....

# EN PERSONNE



*À la rencontre des médaillés de l'innovation, d'un mathématicien au sommet de son art et d'une biologiste à l'assaut d'une maladie rare.*

ILLUSTRATION : VICTORIA ROUSSEL POUR CNRS LE JOURNAL

# Delphine Delacour ou la culture de la cellule

PAR GRÉGORIE FLÉCHET

VIVANT 

**Biologie.** En février dernier, Delphine Delacour a reçu le prix de recherche sur les maladies rares de la Fondation Groupama. Étudiant les mécanismes à l'origine d'une pathologie intestinale, cette biologiste du CNRS est parvenue, avec son équipe de l'Institut Jacques-Monod<sup>1</sup>, à faire croître des cellules sur des puces biomimétiques. Cette dotation va lui permettre d'envisager de possibles pistes thérapeutiques.

En cette fin de matinée de printemps, le laboratoire de l'équipe « Adhésion cellulaire et mécanique », installé au quatrième étage de l'Institut Jacques-Monod de Paris, est en effervescence. Une vingtaine de chercheurs et d'étudiants en blouses blanches s'activent devant leurs paillasses. Certains observent avec attention le contenu d'un flacon de culture cellulaire, tandis que d'autres répertorient les centaines de récipients s'alignant au-dessus de leur plan de travail. À l'écart de l'agitation, Delphine Delacour peaufine la rédaction d'un projet d'étude scientifique visant à reproduire les effets de la dysplasie épithéliale intestinale (DEI) sur l'organisation des cellules de l'intestin.

« Cette pathologie congénitale rare provoque bien souvent dès la naissance des malformations de la paroi intestinale qui empêchent de digérer correctement les aliments, ce qui nécessite de placer très tôt ces enfants sous alimentation par intraveineuse pour limiter l'insuffisance intestinale résultant de la maladie », explique-t-elle.

Depuis bientôt cinq ans, la chercheuse s'efforce de décrypter, au niveau cellulaire et tissulaire, les phénomènes physico-chimiques et mécaniques qui déclenchent les symptômes de la DEI. Pour ce faire, elle a développé avec les autres scientifiques de son laboratoire un ingénieux système expérimental permettant de suivre le développement de cellules épithéliales de l'intestin tel qu'il se déroule dans notre tube digestif. « Avec ces puces biomimétiques, il devient possible de reproduire la structure en

*doigts de gant caractéristique du tube digestif mais aussi de moduler toute une série de paramètres physico-chimiques, ce qui était impossible jusqu'ici à partir de cultures cellulaires classiques »,* détaille Delphine Delacour.

## À la croisée de la physique et de la biologie

Après une thèse en lien avec la biochimie des cellules cancéreuses de l'intestin, soutenue en 2004 à l'université de Lille, la biologiste intègre l'université Phillips de Marbourg, en Allemagne, pour y effectuer un postdoctorat centré sur l'imagerie cellulaire. En collaboration avec le Pr Hans-Peter Elsässer, elle se familiarise par ailleurs avec les techniques d'histologie<sup>2</sup> et de microscopie électronique : « Cet éminent professeur d'histologie a su me convaincre de l'intérêt du travail sur tissu vivant, sans lequel je n'aurais pu m'approprier les techniques d'histologie de pointe que j'utilise désormais au quotidien pour caractériser les échantillons tissulaires prélevés chez les patients atteints de DEI ».

À l'issue de son séjour postdoctoral, Delphine Delacour rejoint l'Institut Jacques-Monod en 2008, où elle est très vite recrutée comme chargée de recherche CNRS. Dans les années qui suivent son retour en France, les travaux sur les voies biochimiques du développement tissulaire ou cancéreux, qu'elle mène dans l'équipe de Françoise Poirier, demeurent purement fondamentaux. En 2013, la création de l'équipe pluridisciplinaire « Adhésion cellulaire et mécanique », un étage au-dessous de son laboratoire, lui offre enfin l'opportunité de mettre en application les connaissances d'analyse des

1. Unité CNRS/Université Paris-Diderot. 2. Discipline dédiée à l'étude des tissus biologiques. 3. « Contractile forces at tricellular contacts modulate epithelial organization and monolayer integrity », J. Salomon et al., *Nature Communications*, janvier 2017, vol. 8 : 13998.



*“Il devient possible de reproduire la structure du tube digestif et de moduler ses paramètres.”*

tissus acquises en Allemagne. « *Le fait que l'hôpital Necker, situé à proximité de l'Institut, soit le centre de référence mondial pour les maladies rares digestives intestinales a évidemment beaucoup compté dans ma décision de construire un projet scientifique associé à la recherche clinique sur la DEI.* »

Dans sa nouvelle équipe, Delphine Delacour s'impose très vite comme un maillon essentiel entre les physiciens et les biochimistes de son laboratoire, avec lesquels elle conçoit les formes microscopiques destinées à mimer l'architecture de la paroi interne du tube

## Son parcours en 5 dates

- 1976** Naît à Cambrai
- 2004** Soutient sa thèse à l'université de Lille, puis effectue un séjour postdoctoral à l'université Philipps de Marbourg (Allemagne) jusqu'en 2008
- 2008** Entre au CNRS
- 2012** Débute ses travaux sur la dysplasie épithéliale intestinale (DEI)
- 2017** Lauréate du prix de recherche sur les maladies rares de la Fondation Groupama

digestif, et les gastro-entérologues de l'hôpital Necker qui réalisent les biopsies de muqueuses intestinales chez les patients atteints de DEI.

### Vers des applications thérapeutiques

En parvenant à faire croître des cellules intestinales sur ces puces biomimétiques, l'équipe de Delphine Delacour a déjà franchi une étape importante dans cette recherche à visée thérapeutique. L'article publié en janvier 2017 dans la revue *Nature Communications*<sup>3</sup>, constitue un pas de plus vers cet objectif.

Dans cette étude, les chercheurs sont en effet parvenus à démontrer le rôle essentiel, dans la structuration de la paroi intestinale, d'une molécule dont la fabrication est inhibée chez les enfants souffrant de dysplasie épithéliale. Des résultats qui permettront, à terme, de cibler des substances chimiques susceptibles de rétablir le bon fonctionnement de la paroi intestinale. « *Cette première publication dans une revue de très haut niveau nous a permis d'obtenir une visibilité internationale sur un sujet de recherche qui reste encore très marginal* », ajoute la scientifique.

Grâce au prix de la Fondation Groupama, décroché dans la foulée de cette publication, Delphine Delacour espère désormais donner une dimension plus applicative à son projet de recherche. Avec ce financement de 500 000 euros sur cinq ans, elle a embauché un spécialiste de la physique des biomatériaux, qui rejoindra le groupe en septembre. Le savoir-faire de cette nouvelle recrue sera mis à contribution pour développer une nouvelle génération de puces biomimétiques intestinales encore plus réaliste. Étoffer régulièrement les compétences de son équipe, c'est pour Delphine Delacour l'assurance de mener une recherche à la fois dynamique et fructueuse. « *La manière dont j'envisage le métier de chercheuse a beaucoup été influencée par les démarches scientifiques de Daniel Louvard ou de Philippe Sansonetti* », souligne-t-elle. Deux biologistes de renom qui ont obtenu des résultats marquants en mettant l'accent sur l'interdisciplinarité. Une source d'inspiration qui semble de bon augure pour cette biologiste inventive. ||

© S. RUJAT

# Yves Meyer reçoit le prix Abel

PAR ALBERT COHEN

NUMÉRIQUE

**Mathématiques.** La prestigieuse récompense a été attribuée à Yves Meyer pour sa contribution majeure au développement de la théorie des ondelettes. Le mathématicien Albert Cohen dresse son portrait.



**Décerné chaque année par l'Académie norvégienne des sciences et des lettres, le prix Abel 2017 a été attribué le 21 mars à Yves Meyer.** Souvent perçue comme le prix Nobel des mathématiciens, cette récompense distingue l'œuvre d'un mathématicien dans son ensemble. Elle vient s'ajouter au prix Salem reçu par Yves Meyer en 1970, ainsi qu'au prix Gauss en 2010, deux récompenses majeures décernées par l'International Mathematical Union. Ces distinctions illustrent combien l'œuvre d'Yves Meyer est unique : on y trouve des accomplissements théoriques d'une grande profondeur, en particulier dans le domaine de l'analyse harmonique, ainsi que des contributions décisives en direction des autres disciplines scientifiques, notamment par le développement d'outils innovants pour le calcul numérique, qui ont eu un impact notable dans le monde des applications.

Né en 1939, Yves Meyer est actuellement professeur émérite à l'École normale supérieure Paris-Saclay<sup>1</sup>, membre de l'Académie des sciences et membre étranger de la National Academy of Sciences des États-Unis. Il a dirigé les travaux de thèses de nombreux étudiants, qui sont devenus chercheurs au CNRS, professeurs dans les universités françaises ou étrangères.

## Des découvertes fondamentales

Ce prix Abel fait écho au prix Nobel de chimie de Dan Shechtman en 2011 pour la découverte des quasi-cristaux. En effet, dans les années 1960, Yves Meyer



© B. ETIENNE/ACADÉMIE DES SCIENCES

introduisit la théorie des ensembles modèles qui a ouvert la voie à la théorie mathématique des quasi-cristaux. Rappelons qu'un quasi-cristal est un solide issu d'un alliage chimique qui possède

des propriétés macroscopiques proches de celles d'un cristal mais dont la structure n'est pas périodique, même si elle possède un certain ordre. L'exemple par excellence d'une telle structure est donné par les pavages de Penrose, particulièrement connus pour leur esthétique. Beaucoup plus récemment, en 2011, Yves Meyer a démontré que les ensembles modèles peuvent aider à reconstruire certains signaux. Ce développement apporte une contribution importante au paradigme du « compressed sensing » (échantillonnage compressif) qui s'est largement développé en traitement du signal, de l'image et de l'information depuis 2005.

Nous devons à Yves Meyer plusieurs contributions majeures en matière d'équations aux dérivées partielles. Ainsi, ses travaux sur la théorie des opérateurs ont ouvert la voie à des développements notables et inspirent encore les jeunes mathématiciens. De même, ses recherches sur les équations de Navier-Stokes sont fondamentales pour la compréhension du comportement des fluides. Rappelons que la résolution de ces équations constitue l'un des sept problèmes mathématiques du prix du millénaire posés par l'Institut Clay en 2000.

## Le succès des ondelettes

Enfin, c'est sans doute pour ses travaux sur les ondelettes et leurs applications au calcul numérique qu'Yves Meyer est le plus connu. À partir des années 1980, on constate une convergence entre des développements scientifiques dans différents domaines visant à décomposer des fonctions : on utilise l'analyse temps-fréquence

1. Au Centre de mathématiques et de leurs applications (CNRS/ENS Paris Saclay).

*“Il a toujours cherché l'interaction et la discussion avec des experts d'autres disciplines que la sienne.”*

en traitement du signal, l'analyse multi-échelle en traitement d'image, les décompositions de Littlewood-Paley en analyse harmonique, les splines et les algorithmes de subdivision en théorie de l'approximation. La contribution fondamentale d'Yves Meyer est alors d'organiser ces découvertes disjointes en une théorie unifiée qui conduit à la construction systématique des bases d'ondelettes dans les années 1990. Cette théorie permet d'offrir un cadre général dans lequel on peut décomposer des fonctions pour analyser plus finement leurs propriétés locales. Les travaux d'Yves Meyer vont aboutir à de nombreux développements dans des domaines variés, par exemple en compression des données et en estimation statistique. Aujourd'hui, il existe de très nombreuses applications des ondelettes dont certaines sont spectaculaires – la norme JPEG 2000 fondée sur les ondelettes dites biorthogonales constitue l'état de l'art actuel en compression d'image – et se sont traduites par un grand nombre de brevets, workshops, publications.

Le rôle de leader de cette aventure scientifique revient sans conteste à Yves Meyer. Mais il fut également le premier à suggérer des alternatives aux ondelettes, permettant de mieux représenter certaines classes de fonctions, signaux et images. Cette perspective débouche aujourd'hui sur le concept de représentation parcimonieuse d'un signal, lequel joue un rôle particulièrement important dans de nombreuses applications, dont l'imagerie médicale.

Dans cette liste de contributions, la théorie des ondelettes est certainement

celle dont l'impact est le plus visible dans le monde scientifique. Elle l'a été tout récemment, le 14 septembre 2015, lorsqu'un algorithme utilisant une technique de décomposition en ondelettes a détecté en premier le signal des ondes gravitationnelles.

La diversité de l'ensemble des contributions d'Yves Meyer est révélatrice de sa façon d'aborder la recherche. Yves Meyer a toujours cherché l'interaction et la discussion avec des experts d'autres disciplines que la sienne, et nombre d'entre eux se sont engagés avec enthousiasme dans les chemins qu'il a su ouvrir. Il est aussi connu pour sa grande générosité, donnant sans compter son temps pour la direction de jeunes chercheurs et sachant s'effacer pour mettre en avant leurs travaux. La carrière d'Yves Meyer nous montre une fois de plus qu'il n'existe pas de ligne de séparation entre mathématiques pures et appliquées, et encore moins entre les mathématiques et le monde pluridisciplinaire des applications. En cela, le comité Abel a honoré un magnifique ambassadeur des mathématiques vers la société et les autres sciences.

Yves Meyer recevra son prix le 23 mai lors d'une cérémonie à Oslo.



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

### Albert Cohen

est mathématicien au Laboratoire



Jacques-Louis-Lions (CNRS/UPMC/Univ. Paris-Diderot).

DR

#### JÉRÔME PARET NOMMÉ DÉLÉGUÉ RÉGIONAL ALPES

Jérôme Paret, ingénieur de recherche au CNRS, a été nommé délégué régional pour la circonscription Alpes, à compter du 1<sup>er</sup> juin 2017. Karine Argento a été désignée déléguée régionale par intérim du 1<sup>er</sup> mars au 1<sup>er</sup> juin, en remplacement de Jérôme Vitre.

#### SÉBASTIEN FÉVRIER, PRIX JEAN JERPHAGNON 2016

Chercheur à l'Institut de recherche XLIM<sup>1</sup>, Sébastien Février a reçu le 9 mars le prix Jean Jerphagnon 2016, une distinction qui récompense un projet dans le domaine de l'optique-photonique. Sébastien Février a inventé de nouveaux types de fibres optiques permettant d'obtenir des impulsions laser ultra-brèves, dotées d'une forte puissance, et ce dans des longueurs d'onde inédites.

#### UNE RÉFÉRENTE CONTRE LES DISCRIMINATIONS

Rita Hermon-Belot, directrice de recherche à l'École des hautes études en sciences sociales (EHESS), a été nommée référente chargée de la lutte contre le racisme et l'antisémitisme placée auprès du président du CNRS Alain Fuchs. Depuis le 1<sup>er</sup> décembre 2016, elle a pour mission d'animer la politique de l'établissement en matière de lutte contre les discriminations. Cette nomination fait suite à une demande du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

1. Unité CNRS/Université de Limoges.

## Ils ont marché pour les sciences

Le 22 avril, plusieurs milliers de personnes ont défilé dans une vingtaine de villes françaises dans le cadre de la Marche pour les sciences, un mouvement mondial initié par des scientifiques américains. À Paris, plus de 5 000 personnes ont ainsi manifesté pour défendre la recherche et promouvoir le dialogue entre sciences et société.



© A. LE GALL / HAYTHAM-REA

+ Lire notre article « Pourquoi les scientifiques appellent les citoyens à marcher pour la science »  
 >> [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)

## Les récompenses du CNRS

Outre les médaillés de l'innovation (*lire ci-contre*), le CNRS a dévoilé les lauréats de ses **médailles d'argent, de bronze et de cristal**. Cette année, la médaille d'argent est attribuée à 20 scientifiques, 10 femmes et 10 hommes, reconnus sur le plan national et international pour l'originalité, la qualité et l'importance de leurs travaux. La médaille de bronze est décernée à 26 chercheurs et 14 chercheurs, pour les encourager à poursuivre leurs recherches engagées et déjà fécondes. Enfin, la médaille de cristal est attribuée à 24 ingénieurs et techniciens, 12 femmes et 12 hommes, pour leur créativité, leur maîtrise technique et leur sens de l'innovation.

+ >> [www.cnrs.fr/fr/recherche/prix.htm](http://www.cnrs.fr/fr/recherche/prix.htm)

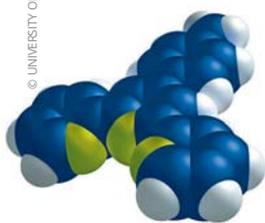
### LES LAURÉATS DES « ADVANCED GRANTS »

L'ERC a dévoilé les noms des 231 chercheurs confirmés ayant obtenu des « advanced grants » en 2016. Avec 23 lauréats hébergés, la France se classe au 4<sup>e</sup> rang des pays hôtes. Le CNRS abrite près de la moitié des lauréats menant leur projet en France.

## Les vainqueurs de la Nanocar Race

Les 28 et 29 avril, plus de 100 000 personnes ont suivi en ligne la première course de molécules-voitures au monde, organisée à Toulouse par le CNRS. Le dragster de l'équipe suisse (image) a remporté l'épreuve sur la piste d'or du Cemes. Un second vainqueur a été désigné : l'équipe austro-américaine, pour le parcours de son véhicule sur une piste d'argent.

+ >> <http://nanocar-race.cnrs.fr>



© UNIVERSITY OF BASEL, SWISS NANO DRAGSTER

## Jean-Pierre Nozières

Expert en spintronique<sup>1</sup>, ce chercheur de 54 ans est le cofondateur, avec Bernard Dieny (CEA), du laboratoire Spintronique et technologie des composants<sup>2</sup> (Spintec), qu'il a dirigé durant dix années. Ses travaux de recherche portent sur les composants magnétiques, du matériau aux concepts, et depuis une dizaine d'années, plus particulièrement sur les mémoires magnétiques (MRAM, magnetic random access memories). Son engagement pour le développement d'une valorisation des recherches en spintronique, où la France occupe un des premiers rangs mondiaux, s'est matérialisé par la création de quatre start-up : Crocus Technology (2006), eVaderis (2014), Antaios (2016) et Hprobe (2017). Il est l'inventeur de plus de vingt innovations brevetées.



## Raphaèle Herbin

Cette mathématicienne de 56 ans, spécialiste de l'analyse numérique des équations aux dérivées partielles, est la directrice de l'Institut de mathématiques de Marseille<sup>1</sup>. Les travaux, qu'elle a menés avec ses collaborateurs sur l'analyse théorique des méthodes de volumes finis et sur la modélisation et la simulation numérique des écoulements compressibles, ont permis l'élaboration d'une nouvelle classe d'algorithmes pour la mécanique des fluides, aux nombreuses applications industrielles. Ils ont notamment contribué, dans le domaine de la sûreté nucléaire, au développement du logiciel Calif3s, de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN).

© ILLUSTRATIONS : MIRIAM EL JEBARI

# Médaille de l'innovation, le palmarès 2017

Événement. Le 15 juin, la médaille de l'innovation 2017 sera remise à Raphaële Herbin, Jean-Pierre Nozières, Jean-Marie Tarascon et Jamal Tazi. Ce prix décerné par le CNRS récompense des scientifiques pour leurs travaux exceptionnels dans les domaines technologique, thérapeutique ou social.

PAR VÉRONIQUE MEDER



## Jamal Tazi

Âgé de 57 ans, ce professeur spécialisé en génomique fonctionnelle dirige une équipe de recherche au sein de l'Institut de génétique moléculaire de Montpellier<sup>4</sup>. Il est à l'origine de découvertes majeures dans le domaine de l'épissage alternatif des ARN pré-messagers – un processus qui permet d'obtenir plusieurs protéines différentes à partir d'un même gène. Ces travaux ouvrent de nouvelles pistes pour le traitement de maladies virales et génétiques. Il a fondé, en 2008, la société de biotechnologie Splicos, devenue Abivax en 2013, pour développer des candidats médicaments antiviraux. Il dirige le laboratoire coopératif CNRS-Abivax, nommé Abivax Therapeutics (ex-Splicos Therapeutics), créé en 2009 par sa société et le CNRS. Il est l'inventeur de neuf familles d'innovations brevetées. La molécule ABX464, ciblant le virus du Sida, est actuellement en phase 2 d'essai clinique.

## Jean-Marie Tarascon

Professeur au Collège de France, ce spécialiste de l'électrochimie des solides est le directeur du laboratoire Chimie du solide et de l'énergie<sup>5</sup>. Âgé de 63 ans, il s'est d'abord illustré par sa recherche sur les supraconducteurs à haute température, puis le stockage électrochimique de l'énergie, pour devenir un des pionniers des batteries lithium-ion. Ses travaux visent à inventer de nouvelles technologies pour le stockage de l'énergie et ainsi mieux gérer les ressources en énergie de la planète. On lui doit de nombreuses avancées dans la synthèse de nouveaux matériaux d'électrodes et d'électrolytes pour batteries, dans l'étude des mécanismes réactionnels du lithium et le développement de nouvelles configurations de batteries. Il lui a été confié, en 2011, la création du réseau pour le stockage électrochimique de l'énergie RS2E, qui réunit 17 laboratoires académiques et 3 centres de recherche en technologies industrielles, et de nombreux industriels. Il est également à l'origine du développement des premières batteries sodium-ion et est l'inventeur de plus de 85 innovations brevetées, dont une vingtaine de licences.

1. Lire *CNRS Le journal* n° 285, p. 44. 2. Unité CNRS/CEA/Université Grenoble-Alpes. 3. Unité CNRS/École centrale de Marseille/Université d'Aix-Marseille. 4. Unité CNRS/Université de Montpellier. 5. CNRS/Collège de France/Université Pierre-et-Marie-Curie.

# Philippe Coussot, aux confins de la matière

PAR JEAN-BAPTISTE VEYRIERAS

## MATIÈRE

**Rhéologie.** Spécialiste mondial des fluides complexes, Philippe Coussot étudie depuis vingt ans ces matières hybrides « mi-solides mi-fluides ». Il vient de recevoir le grand prix de la Société européenne de rhéologie, réunie en congrès à Copenhague début avril.



encore, côté bricolage, la peinture, le vernis, les mortiers ou les colles à carrelage.

### Des coulées de boue...

Autant de matériaux aux propriétés fascinantes que Philippe Coussot, alors élève polytechnicien, a découverts de manière plutôt spectaculaire lors d'un stage administratif dans le corps des Eaux et Forêts en 1988. « *Mon arrivée à l'ONF de Chambéry a coïncidé avec une importante coulée de boue à Modane et a causé d'énormes dégâts*, raconte-t-il. *À l'époque, on ne disposait d'aucun outil scientifique pour décrire ces écoulements et prédire les zones à risque* ». Une ignorance qui frappa sa curiosité au point d'y consacrer une thèse : « *J'ai essayé alors de classer les différents types de matériaux impliqués dans ces coulées et j'ai pu montrer qu'il s'agissait la plupart du temps de fluides à seuil* », autre nom pour ces fluides complexes.

### ... aux fluides à seuil

Sa thèse achevée, Philippe Coussot poursuit ses études sur les coulées de boue tout en menant en parallèle des travaux théoriques sur les fluides à seuil. Souhaitant élargir son champ d'exploration, il rejoint, à la fin des années 1990, le Laboratoire central des ponts et chaussées pour développer la recherche autour d'un nouvel imageur à résonance magnétique (IRM), dédié à l'étude des matériaux du génie civil et de l'environnement. « *Il y avait un potentiel d'expérimentation formidable, on allait pouvoir voir plein de choses dans la matière*

*en écoulement ou dans les milieux poreux* », explique-t-il.

Sur la base d'une intuition qui allait se révéler payante, Philippe Coussot dote alors sa discipline d'un rhéomètre de haute résolution, sans véritable équivalent à l'échelle mondiale : « *Il y avait un gros coup à jouer en insérant un rhéomètre dans l'IRM*. » Le rhéomètre est au rhéologue ce que la boussole est au navigateur : un instrument clé pour étudier le comportement des fluides complexes sous l'action de contraintes physiques maîtrisées.

### Reconnaissance internationale

En service depuis 2002, cet instrument unique a permis à Philippe Coussot et à son équipe de réaliser une première mondiale. Ils sont parvenus à caractériser l'instabilité d'écoulement, jusque-là mal comprise, des matériaux thixotropes (matériaux qui, au-delà d'une certaine contrainte, peuvent passer subitement et totalement de l'état solide à l'état liquide). Une avancée théorique qui pourrait permettre, par exemple, de rendre moins énergivore le transport du béton : « *S'il est trop pâteux, on dépense des énergies folles pour l'acheminer au travers de tuyaux. On cherche donc à avoir le béton le plus liquide possible dans les tuyaux, mais pas trop non plus, pour que les grains ne sédimentent pas* », détaille le chercheur.

Ces travaux sur les fluides thixotropes ainsi que l'ensemble de ses contributions dans le domaine lui valent aujourd'hui une reconnaissance internationale, dans la droite ligne du chimiste américain Eugene Cook Bingham, qui fonda la discipline au début du siècle. ||

Si les bandes colorées de votre dentifrice s'alignent bien sagement sur votre brosse à dents et ne se mélangent en une mousse parfumée qu'une fois dans votre bouche, c'est grâce à des rhéologues comme Philippe Coussot. La rhéologie, étymologiquement la science de ce qui s'écoule – du verbe grec « rheo » qui signifie « couler, s'écouler » – étudie en effet le comportement de toutes ces pâtes et autres matières qui peuvent se comporter tantôt comme des solides, tantôt comme des liquides, voire les deux à la fois.

Sans être nous-mêmes des rhéologues chevronnés comme Philippe Coussot et son équipe du laboratoire Navier<sup>1</sup>, nous utilisons régulièrement des matériaux qui sont autant de cas d'école pour ces physiciens et chimistes de la complexité. Par exemple, on trouve côté cuisine diverses émulsions comme la mayonnaise, la mousse au chocolat, mais aussi les yaourts ou les purées; ou

1. Unité CNRS/École des ponts ParisTech/IFSTTAR.



Lire l'article « Cette matière molle qui défie les lois de la physique » sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)

# GRAND FORMAT



*Où l'on découvre que les juristes sont  
de vrais aventuriers des temps  
modernes et que la chimie peut être  
douce pour l'environnement.*

ILLUSTRATION : VICTORIA ROUSSEL POUR CNRS LE JOURNAL



ENVIRONNEMENT,  
NUMÉRIQUE,  
SOCIÉTÉ...

# *Justice, les défis du XXI<sup>e</sup> siècle*

UNE ENQUÊTE RÉALISÉE PAR LAURE CAILLOCE ET FABIEN TRÉCOURT

Loin d'être figé, le droit doit s'adapter sans cesse aux évolutions des sociétés. La montée des préoccupations climatiques et environnementales fait émerger, dans différentes régions de la planète, une nouvelle forme de justice plus à même de protéger la nature et d'obtenir réparation lorsque celle-ci est victime des pratiques humaines. Le droit permettra-t-il de limiter le changement climatique et de mettre fin aux atteintes portées aux écosystèmes ? Autre changement marquant : la révolution numérique, qui pourrait bouleverser la pratique du droit et faire naître, notamment, une justice prédictive dans laquelle les futures décisions d'un tribunal seraient prévues grâce à l'intelligence artificielle et au big data. Les robots remplaceront-ils un jour juges et avocats ? *CNRS Le journal* est allé à la rencontre des scientifiques qui réfléchissent aux évolutions du droit face aux grands défis de notre époque.



# *Le droit peut-il sauver la nature?*

Devant les multiples dommages causés par la pollution et le dérèglement climatique, les initiatives juridiques et citoyennes se multiplient, favorisant l'émergence d'une véritable justice environnementale.

C'est une première mondiale dans l'histoire du droit. Coup sur coup, au mois de mars 2017, deux fleuves viennent de se voir attribuer une personnalité juridique. En Nouvelle-Zélande, le fleuve Whanganui, troisième plus long cours d'eau du pays, a été reconnu « entité vivante ayant le statut de personne morale » par le Parlement. À l'instar des personnes mineures, il s'est vu affecter deux tuteurs légaux qui défendront ses intérêts. En Inde, c'est le Gange et l'un de ses affluents, la rivière Yamuna, tous deux sacrés, qui sont devenus des sujets de droit. Cette décision prise par la Haute Cour de l'État himalayen de l'Uttarakhand doit permettre de

combattre plus efficacement la pollution provoquée par les rejets industriels et les égouts.

Au-delà du caractère symbolique fort que revêtent ces fleuves dans les cultures maorie et hindouiste, ces décisions sont symptomatiques des débats qui agitent la sphère juridique en ce début de troisième millénaire et pourraient se résumer en une question : comment mieux protéger la nature ? « *Le droit de l'environnement est apparu dans les années 1970*, rappelle Laurent Neyret, professeur de droit privé à l'université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines. *À l'époque, il était surtout question de respect de procédures,*

d'autorisations pour construire une autoroute, une usine, un immeuble, ou encore de seuils de rejets autorisés... Le droit de l'environnement était alors un droit de la prévention, avant tout. Aujourd'hui, la crise environnementale et climatique est d'une ampleur telle qu'il est nécessaire d'aller bien au-delà. »

Protéger la nature pour elle-même, en en faisant un sujet de droit, est l'une des voies possibles. « En France, après le naufrage du pétrolier Erika en 1999, il y avait cette tentation chez certains juristes de dire "faisons de la nature une personne", poursuit Laurent Neyret. Mais, dans l'Hexagone comme dans les droits occidentaux plus généralement, cette logique ne convainc pas. » À l'inverse, cette idée de nature-personne existe déjà en Amérique latine. La nouvelle Constitution de l'Équateur, adoptée en 2008, reconnaît la nature comme un sujet de droit : droit d'être respectée, droit d'être restaurée en cas de dommage... C'est au nom de ce droit de la nature que la société Chevron-Texaco a été condamnée à une amende record de 9,5 milliards de dollars pour des dégâts commis dans la forêt amazonienne (une sanction qui n'est toujours pas exécutée à ce jour). La Bolivie a quant à elle voté en 2011 une loi sur la « Terre Mère », la « Pacha Mama », qui envisage tous les bénéfices de la nature pour elle-même et pas seulement pour les services qu'elle rend à l'être humain.

### Réparer le « préjudice écologique »

À défaut de considérer la nature comme une entité juridique à part entière, d'autres concepts ont émergé ces dernières années, qui tendent vers le même objectif : mieux la protéger. C'est le cas de la notion de « préjudice écologique », introduite en France pour la première fois dans la loi sur la biodiversité de 2016, mais reconvenue aux États-Unis dès le début des années 1970 et la création de la très puissante Environmental Protection Agency (EPA) – une autorité administrative qui a le pouvoir de diligenter des enquêtes, mais aussi de négocier avec les industriels responsables de pollutions et de prononcer des condamnations. « Quand il y a une atteinte à l'environnement, il y a des conséquences directes pour les personnes (pêcheurs empêchés de travailler dans le cas d'une marée noire, atteinte à l'image d'une région...), mais également des atteintes majeures à la biodiversité – ce sont ces dernières que veut réparer le préjudice écologique, par la remise en état de la zone touchée

ou, si ce n'est pas possible, par le versement de dommages et intérêts », précise Laurent Neyret.

Le problème est qu'en cas de dommages irréversibles, l'évaluation du préjudice subi peut se révéler un véritable casse-tête. Comment évaluer le prix de la nature pour elle-même ? Combien pour une zone humide détruite par des travaux, pour une forêt incendiée ? « Certains ont prétexté l'infaisabilité de la réparation en matière environnementale, au prétexte que "la nature n'a pas de prix", poursuit le juriste. On a pourtant pour modèle le préjudice corporel admis depuis une centaine d'années et qui dit : la mort d'un enfant, c'est tant, la perte d'un bras, c'est tant... » Signe de ce changement d'époque, lors du procès en appel de l'Erika, les dommages et intérêts attribués aux associations et collectivités qui s'étaient constituées parties civiles se sont montés à 13 millions d'euros au titre du seul préjudice écologique – du jamais vu en France.

Mais le préjudice environnemental est-il applicable à toutes les atteintes à la nature ? « Pour établir un préjudice environnemental, il faut prouver une responsabilité, pointe Agnès Michelot, maître de conférences en droit public à l'université de La Rochelle. Or, établir des causalités, trouver des responsables, n'est pas toujours possible. » C'est notamment le cas lors de la disparition d'espèces animales. Beaucoup d'ONG aimeraient que les extinctions constatées par l'UICN (l'Union internationale de protection de la nature, qui établit notamment la liste des espèces menacées) fassent l'objet d'actions en justice. « Mais prouver la chaîne de décisions qui a abouti à ce résultat funeste s'avère bien souvent impossible, tant ces disparitions sont multifactorielles », analyse le juriste.



Le Gange, fleuve sacré pour les Indiens, a été reconnu par la justice himalayenne comme une personne morale, ce qui lui permet notamment d'être défendu juridiquement.

© A. DIEPPACIFIC - PRESSZUMARA/REA

### ... Les juges à la pointe du combat

Même s'il progresse – à pas plus ou moins comptés –, le droit produit au plus haut niveau de l'État reste lacunaire en matière environnementale, et de plus en plus de citoyens le jugent insuffisant. En conséquence, « il y a une déception par rapport à la réglementation existante, qui se traduit par une judiciarisation en réponse pour rétablir l'équilibre », indique Laurent Neyret. Comprendre : si l'État travaille mal, les citoyens n'hésitent plus à aller devant les tribunaux pour faire évoluer les règles ! Le dérèglement climatique est un formidable exemple de cette nouvelle façon de produire du droit : tout récemment, plusieurs actions menées contre des gouvernements ont abouti à des décisions de justice inédites.

En 2015, le collectif Urgenda a ainsi porté plainte contre le gouvernement des Pays-Bas pour « carence fautive ». L'ONG Urgenda et 800 citoyens néerlandais accusaient le gouvernement de ne pas agir suffisamment contre le changement climatique et de mettre en

danger les générations futures. Non seulement la plainte a été déclarée recevable par le juge – c'est la première fois au monde qu'une question climatique passait le cap de la recevabilité –, mais qui plus est, Urgenda a gagné contre le gouvernement des Pays-Bas, condamné par la justice à revoir ses engagements sur les émissions de gaz à effet de serre. « Ici, on n'est plus du tout dans la logique du pollueur-payeur, et on n'établit pas de lien de causalité directe, commente Christel Cournil, maître de conférences en droit public à l'université Paris 13 et

membre du réseau Droit et climat. *Urgenda n'a d'ailleurs pas demandé de réparations, car il n'y a pas eu de faute à proprement parler. Mais le tribunal dit que l'État néerlandais est reconnu responsable de sa mauvaise politique, et ça, c'est une première !* »

Au Pakistan, toujours en 2015, un agriculteur a saisi la Haute Cour de justice de Lahore au motif que la passivité du ministre pakistanais du Changement climatique portait atteinte à « ses droits fondamentaux ». Le Pakistan est en effet l'un des pays les plus affectés par le réchauffement climatique – inondations, sécheresses intenses... –, qui met en péril la production agricole dont dépend la moitié de la population pour sa survie. La Haute Cour a donné raison à l'agriculteur, estimant que le gouvernement n'avait pris aucune mesure concrète pour mettre en place la politique nationale d'action sur le climat annoncée en 2012.

### Vers des tribunaux spécialisés ?

Des décisions qui font boule de neige et donnent des idées. Aux États-Unis, l'organisation « Our Children's Trust », qui se bat pour le droit des générations futures à un environnement viable, a vu pour la première fois en 2016 l'une de ses actions avalisée par la justice dans l'État de l'Oregon. En France, l'association « Notre affaire à tous » prépare un recours contre l'État sur le thème du changement climatique ; en Suisse, c'est un collectif de grands-mères, les « Swiss grannies », qui attaque l'État au motif que le réchauffement climatique a des effets néfastes sur leur santé...

« Le plus incroyable, dans ces histoires, c'est que les citoyens réussissent à obtenir des condamnations à l'encontre de leur gouvernement en matière de politique climatique, alors que les traités internationaux, à commencer par les accords signés lors des COP successives, sont impuissants à réclamer des sanctions contre les États qui ne respectent pas leurs engagements », souligne Christel Cournil. Comme si un nouvel ordre mondial était en train d'émerger, où les gouvernements se feraient désormais rappeler à l'ordre par leur propre base ! Et la juriste de pointer un autre signe de cette mutation : le « verdissement » des cours régionales des droits de l'homme – Cour européenne des droits de l'homme, Cour interaméricaine des droits de l'homme, ou la toute jeune Cour africaine des droits de l'homme et des peuples.

« De plus en plus, ces cours se retrouvent en position de statuer dans des affaires ayant trait à l'environnement. En Europe, par exemple, les questions examinées vont de la liberté d'expression des militants pour la protection de l'environnement, jusqu'à la pollution au cyanure de plusieurs rivières en Roumanie suite à la catastrophe minière de Baia Mare, en 2000 (la plus grande catastrophe en Europe de l'Est après Tchernobyl, NDLR)... » Ces actions environnementales ont toutefois leurs limites. « Les outils

“Certains juristes réclament la création d'un tribunal pénal pour juger les écocides.”



Lors du procès de l'Erika, les dommages et intérêts attribués aux parties civiles ont atteint 13 millions d'euros au titre du seul préjudice écologique – du jamais-vu en France.

manquent à ces juridictions, relève Christel Cournil, qui ne peuvent statuer qu'en cas de dommage direct, certain et avéré et auront par exemple beaucoup de mal à se prononcer sur des questions climatiques. »

Faut-il alors créer des tribunaux *ad hoc*, qui ne jugeraient que les crimes et délits environnementaux ? C'est déjà le cas en Inde, mais aussi au Chili où des « tribunaux environnementaux », des tribunaux environnementaux, ont vu le jour en 2012. Certains juristes vont plus loin et réclament ni plus ni moins la création d'un Tribunal

pénal international pour juger les « écocides », les crimes contre l'environnement, à l'image de la Cour pénale internationale de La Haye pour les crimes contre l'humanité. « *J'y suis favorable, indique Laurent Neyret, mais cela prendra du temps. Pour le moment, il faut faire avec les juridictions existantes et intervenir partout où c'est déjà possible.* » Il reste également à préciser la notion même d'« écocide ». « *Pour l'heure, il n'y a pas de définition définitive de l'écocide, poursuit le juriste qui vient de publier un ouvrage sur la question. Mais on s'oriente vraisemblablement vers une infraction volontaire, un acte intentionnel perpétré dans le cadre d'une action généralisée et systématique qui cause des dommages graves et irréversibles à la sûreté de la planète.* »

### Développer des politiques préventives

Si elle reconnaît l'utilité des actions en justice, Agnès Michelot veut privilégier une approche plus en amont et milite avec le climatologue français Jean Jouzel pour un nouveau droit de la prévention qui irriguerait tous les domaines concernés par le réchauffement climatique et ses conséquences : santé, aménagement du territoire, urbanisme, agriculture, énergie, mais aussi droit des assurances, etc. « *Aujourd'hui, on ne peut plus construire nos politiques publiques sans tenir compte du réchauffement climatique, plaide la juriste. Rien que dans le domaine de la santé, on sait que les risques cardio-vasculaires augmentent avec les fortes chaleurs, que les risques respiratoires sont accrus lors des épisodes de pollution aux particules fines, que les virus tropicaux sont en train de s'acclimater aux régions tempérées...* »

L'avis sur la justice climatique, que les deux experts ont émis en septembre 2016 pour le Conseil économique, social et environnemental (CESE), établit surtout un lien direct entre précarité environnementale et précarité économique et sociale : « *Il faut que la loi tienne compte du fait que le changement climatique va affecter les plus pauvres qui n'ont pas les moyens de s'adapter* », estime Agnès Michelot. **II L. C.**



**Des écocrimes à l'écocide. Le droit pénal au secours de l'environnement,**  
Laurent Neyret (dir.),  
Bruylant, février 2015,  
468 p., 50 €

**Justice climatique. Enjeux et perspectives,**  
Agnès Michelot (coord.),  
Bruylant, octobre 2016,  
390 p., 85 €



Le 18 avril, la juridiction fictive a reconnu la firme Monsanto coupable de crime contre la nature et d'atteinte aux droits humains.

## Le « tribunal Monsanto », un procès citoyen

Le 18 avril, le tribunal Monsanto a affirmé que les pratiques de la firme américaine violaient plusieurs règles du droit international, comme le droit à un environnement sain, le droit à la santé, le droit à l'alimentation, la liberté d'expression et de recherche scientifique, et que ces pratiques pouvaient s'apparenter à un crime d'écocide. Dans un avis consultatif, ce tribunal d'initiative citoyenne composé de juges internationaux et présidé par Françoise Tulkens, ancienne vice-présidente de la Cour européenne des droits de l'homme, estime que « *depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, la multinationale Monsanto a commercialisé des produits hautement toxiques qui ont durablement contaminé l'environnement et rendu malades ou causé la mort de milliers de personnes dans le monde* ». Il cite notamment l'agent orange, un mélange d'herbicides mis au point par le fabricant de produits phytosanitaires que l'armée américaine a utilisé pendant la guerre du Vietnam, ou encore le Roundup, l'herbicide le plus utilisé au monde. Une trentaine de témoins, experts et scientifiques du monde entier ont été appelés à témoigner à la barre, lors de la séance organisée symboliquement à La Haye (siège de la Cour pénale internationale) en octobre 2016. « *S'il n'a aucune valeur juridique contraignante, l'avis rendu par le tribunal Monsanto vise à fournir un argumentaire solide à de futures actions contre la multinationale à travers le monde* », souligne Christel Cournil. En attendant la création d'une future Cour internationale contre les crimes environnementaux ?

# La justice à l'ère du numérique

Les logiciels et les robots vont-ils remplacer avocats, notaires et juges ? Pour les experts, si la tendance à l'automatisation et à l'accélération technologique change la donne, certaines prédictions relèvent encore de la science-fiction.

Une « justice prédictive », des contrats exécutés automatiquement grâce à des logiciels, des robots recrutés par des cabinets d'avocats... En quelques années, les innovations technologiques et numériques ont donné lieu à toute une série d'annonces fracassantes, laissant entendre notamment que l'ubérisation des professions juridiques et judiciaires était en marche. Mais si certaines de ces innovations bouleversent l'exercice du droit, en automatisant certaines tâches et en accélérant les procédures notamment, beaucoup ont encore un caractère exploratoire, voire s'apparentent au fantasme.

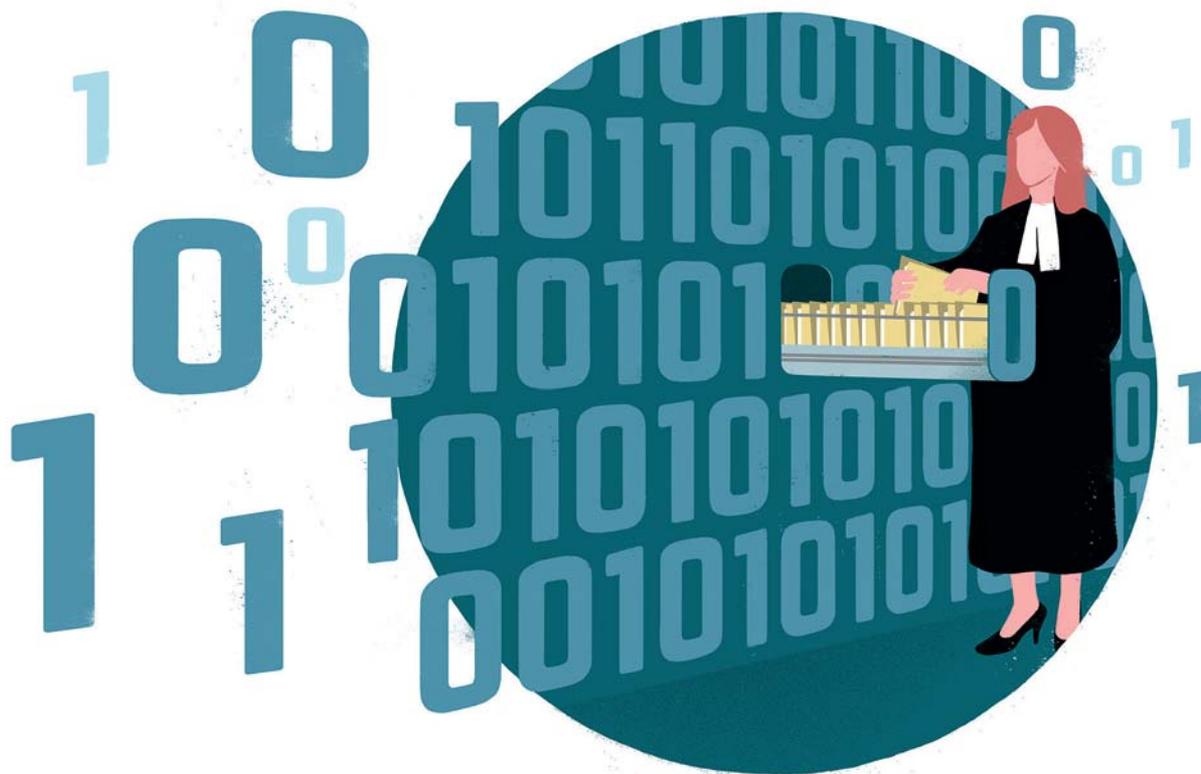
## Vers un système prédictif ?

D'une manière générale, le code informatique et l'intelligence artificielle paraissent encore loin de pouvoir se substituer à l'expertise humaine, mais ils ne sont pas pour autant sans impact sur les métiers juridiques et judiciaires. « *C'est une question d'équilibre* », résume Bruno Dondero, agrégé des facultés de droit et professeur à l'université Paris 1, estimant que beaucoup de croyances sur le sujet sont « *trop enthousiastes ou au contraire trop insouciantes* ». En pratique, ces professions comportent de nombreuses tâches paraissant pouvoir être automatisées. « *Lorsqu'un avocat rédige un contrat par exemple, il se fonde généralement sur des modèles qu'il adapte en fonction des cas particuliers. On peut envisager qu'un logiciel, auquel on fournirait quelques informations spécifiques à l'affaire, génère lui-même ce document.* » De fait, de nombreuses

start-up ont récemment développé des solutions pour rédiger des documents juridiques, analyser une affaire à partir d'une recherche documentaire, ou encore estimer la probabilité de succès d'un procès. En 2016, le cabinet américain BakerHostetler a ainsi « engagé » le système d'intelligence artificielle Ross pour assister ses avocats en répondant à des questions sur la jurisprudence et en facilitant la recherche documentaire. « *Ces systèmes ont leurs limites lorsque les affaires sont complexes ou ambiguës, poursuit Bruno Dondero, sinon une simple recherche sur Internet aurait déjà remplacé le métier d'avocat-conseil.* » Pour autant, il pense que, pour des cas classiques et bien connus, ces outils seront de plus en plus utilisés par les cabinets. « *Honnêtement, le travail d'avocat consiste rarement à imaginer LA clause à laquelle personne n'avait jamais pensé. Et dans les faits, certains n'hésitent pas à copier-coller leurs modèles en changeant juste quelques détails...* » Rien qu'une machine ne puisse effectuer.

À certains égards, la « justice prédictive » fonctionne suivant le même principe. Ces dernières années, plusieurs systèmes ont été développés, permettant de déterminer les probabilités de succès d'une affaire et de calculer les éventuels dommages et intérêts, en tenant notamment compte des décisions antérieures du juge appelé à statuer. « *Contrairement à ce qu'on entend, il ne s'agit pas de "remplacer" les avocats* », tempère Thomas Saint-Aubin, chercheur associé à l'Institut de recherche juridique de la Sorbonne et directeur de la recherche et du développement chez Seraphin Legal.

1. Centre d'études et de recherches de sciences administratives et politiques (Unité CNRS/Université Paris 2 Panthéon-Assas). 2. « Human Decisions and Machine Predictions », Jon Kleinberg et al., *NBER Working Paper* n° 23180, février 2017.



L'idée est à la fois de faciliter les recherches des particuliers ou des entreprises lorsque l'affaire est relativement classique, mais aussi de décharger les professionnels de tâches laborieuses pour « leur permettre de se concentrer sur la partie la plus intéressante : l'analyse du dossier, l'élaboration d'un argumentaire, le contact humain... » Membre du conseil d'administration de l'association Open Law, il a milité de nombreuses années pour l'accessibilité des données juridiques et administratives – textes de lois, jurisprudence... –, principe désormais acté dans la loi pour une République numérique du 7 octobre 2016. Concrètement, des milliers de textes réglementaires et de décisions de justice seront peu à peu accessibles à tous, aux simples particuliers comme aux juges les plus expérimentés... et aux machines, évidemment. « Les robots aideront les professionnels du droit à naviguer dans ces "lacs de données", s'enthousiasme Thomas Saint-Aubin. Ce sera plus rapide, moins coûteux, cela contribuera à désengorger les tribunaux et tendra probablement à harmoniser le droit, puisqu'on se basera davantage sur les décisions rendues dans les affaires précédentes. »

#### Logique du droit contre code informatique

Les technophiles les plus enthousiastes vont jusqu'à imaginer que l'intelligence artificielle puisse se substituer aux professions juridiques et judiciaires, bien qu'elle se heurte – au moins pour l'heure actuelle – à de nombreux écueils. « Je pense qu'il y a une différence fondamentale entre la logique du droit et celle du code, analyse Primavera De Filippi, chercheuse au Cersa<sup>1</sup> : un juge ou un avocat a besoin d'interpréter la loi et au besoin de la

faire évoluer, tandis que les logiciels actuels peuvent difficilement innover. Ils peuvent généralement mimer le passé ou réaliser des actions prédéfinies. » Dans une même veine, Bruno Dondero souligne deux obstacles majeurs : d'une part, le droit serait figé dans les décisions du passé et ne pourrait plus évoluer en fonction des nouveaux besoins d'une société ; d'autre part, la jurisprudence française ne semble pas adaptée à une analyse algorithmique. Contrairement à ceux d'autres pays, en effet, beaucoup de juges en France rédigent leurs décisions dans un style très littéraire, sans respecter un modèle ou une forme précise. « Tout dépendra des progrès de l'intelligence artificielle bien sûr, mais je reste sceptique quant à la capacité qu'auront ces programmes à interpréter l'ironie, une métaphore ou des allusions. » Il n'est donc pas garanti que cet obstacle lié à la langue soit franchi dans un futur proche. « Les professionnels du droit doivent rester attentifs aux évolutions pour ne pas être pris de court, conseille cependant Bruno Dondero, car il y aura forcément des substitutions de la machine à l'homme – moins spectaculaires, mais qui se traduiront néanmoins par des disparitions d'emploi. »

Une récente étude du Bureau national de la recherche économique<sup>2</sup>, aux États-Unis, a ainsi comparé les décisions de juges et d'algorithmes, lorsqu'un tribunal décidait si un accusé devait être assigné à résidence ou placé en prison en attendant son procès. ...

« L'idée est de décharger les professionnels des tâches laborieuses. »

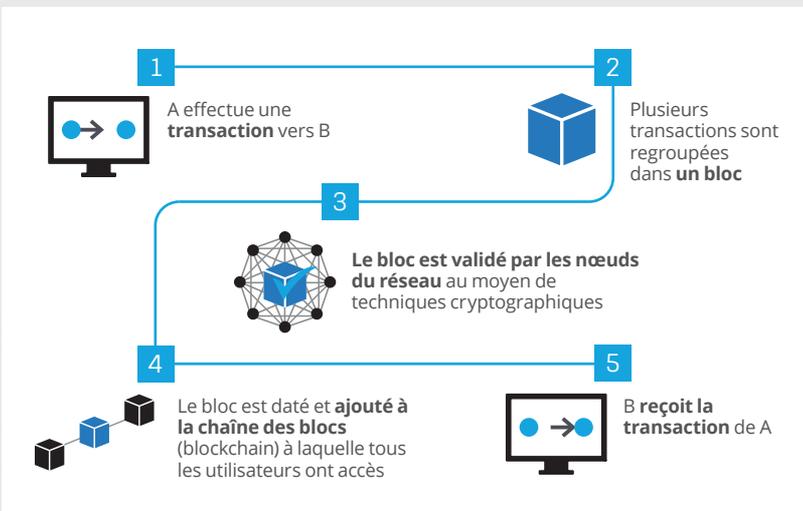
## La « blockchain » et les contrats

Dans le cadre d'un contrat, en règle générale, deux parties s'engagent à respecter un ensemble d'obligations : échanger une somme d'argent contre un bien, vivre ensemble en partageant les patrimoines, administrer une société en partenariat, etc. Les innovations numériques – comme la technologie dite « blockchain » (chaîne de blocs) – vont-elles permettre de se passer des acteurs juridiques ou judiciaires présents pour garantir que l'accord passé est conforme au droit, vérifier qu'il est bien respecté et intervenir en cas de manquement – à l'image des notaires et des juges pour un contrat de mariage ou un compromis de vente immobilière ? « La blockchain fonctionne comme

un cadastre décentralisé, explique Primavera De Filippi. C'est une façon d'enregistrer des informations et de certifier cet enregistrement à la source, sans forcément passer par un tiers. » Une fois constituées en « bloc », ces données permettent de prouver qui a fait quoi et quand, et sont en principe impossibles à modifier ou à effacer. « Une application intéressante de ce principe est le développement de "smart contracts", poursuit la chercheuse. Cela consiste à codifier informatiquement l'exécution des obligations et à les automatiser. » Imaginons que deux particuliers se mettent d'accord pour passer un contrat : la blockchain leur permet de reconstituer la procédure pas à pas – de

prouver ainsi qu'elle est bien conforme au droit – et l'exécution automatique des clauses rend impossible tout manquement de leur part. Même si les parties ne se font pas confiance, elles ont la garantie que les actions seront effectuées automatiquement. Voilà pour la théorie, mais la réalité n'est pas aussi simple. D'une part, « le notaire est aussi là pour s'assurer que les parties sont bien consentantes lorsqu'elles signent », relève la chercheuse. Pour cette raison, la blockchain pourrait à l'heure actuelle accompagner une démarche de certification ou de notariation de la preuve, mais en aucun cas s'y substituer – une appréciation subjective restant nécessaire pour évaluer la bonne foi des

parties prenantes par exemple. D'autre part, l'irréversibilité de la blockchain et l'automatisation des "smart contracts" sont à la fois la force et la faiblesse du système. « Si, pour des raisons imprévues ou des cas de force majeure, l'accord doit être rompu ou modifié, on ne peut pas revenir en arrière et les actions continuent de s'exécuter. » Une société en cessation des paiements, par exemple, continuerait de voir des virements automatiques s'effectuer au profit des créanciers. « On pourrait bien sûr anticiper de tels cas de figure, nuance Primavera De Filippi, mais il paraît impossible de tout prévoir. » En pratique, le langage naturel des contrats classiques, plus ambigu qu'un code informatique de type « si ceci, alors cela », offre une marge de manœuvre essentielle à l'exercice du droit. « Le véritable enjeu serait de bénéficier du meilleur des deux mondes, estime-t-elle. On pourrait par exemple imaginer des contrats hybrides, comportant une part d'automatisation et de certification par blockchain, mais consolidés par l'appréciation subjective et plus flexible des professionnels. »



De plus en plus utilisé dans le cadre des échanges monétaires, le système de la « blockchain » peut s'appliquer à tout type de relations contractuelles. S'il permet l'exécution automatique des clauses et la traçabilité des procédures, il comporte aussi de nombreuses limites.

... À première vue, le logiciel prédit mieux quel serait le comportement des accusés et pourrait ainsi permettre de prendre des décisions plus « objectives ». Plus généralement, l'idée que l'informatique pourrait être plus neutre qu'un humain est un argument en faveur de l'automatisation de la justice. Mais les choses ne sont pas aussi tranchées, comme l'explique Sihem Amer-Yahia, directrice de recherche au Laboratoire d'informatique de Grenoble<sup>3</sup> : « Contrairement à une idée reçue, les algorithmes peuvent aussi reproduire et amplifier les biais de l'esprit humain, notamment parce qu'ils

s'appuient sur des décisions subjectives et ne font pas de choix par eux-mêmes. » Pour prendre un exemple concret, une simple recherche sur Internet fait remonter les résultats les plus consultés, sans tenir compte de leur caractère éventuellement faussé (lire aussi le billet de David Monniaux, page 59). « Pour étudier le pouvoir discriminatoire d'un algorithme, poursuit la chercheuse, il faut modéliser l'ensemble des entrées, ce qu'il produit en sortie et l'espace de construction entre les deux – les correspondances, les approximations, les extrapolations... Si l'on ne prend pas conscience des limites de cet

3. Unité CNRS/Inria/Grenoble INP/Université Grenoble-Alpes. 4. Unité CNRS/Université Paris-Nanterre/ENS Paris-Saclay.



“Nous devrions réfléchir davantage à la justice que nous sommes en train de construire.”

Pour les chercheurs, il convient de s'interroger sur les changements induits par l'automatisation et la numérisation dans le domaine de la justice.

espace de construction, on risque de générer et d'amplifier les discriminations. » Sihem Amer-Yahia travaille notamment avec Sabrina Mraouahi et Aïda Bennini, maîtres de conférences en droit privé à l'université de Grenoble-Alpes, pour chercher comment faire respecter une véritable équité au terme du calcul sur les plateformes de crowdsourcing : si cela est possible sur le plan théorique, il n'est pas certain pour autant qu'un tel système puisse être mis en œuvre dans un futur proche.

### Le risque de la standardisation

L'ensemble de la société devrait s'interroger sur les changements induits par l'automatisation et la numérisation dans le domaine de la justice, considère Benoit Bastard, sociologue à l'Institut des sciences sociales du politique<sup>4</sup> (ISP). « L'outil s'impose, se banalise, mais il y a peu de recherches sur ses effets », regrette-t-il avant de donner un exemple simple : avant, les juges aux affaires civiles devaient convoquer les avocats pour vérifier que les procédures suivaient bien leur cours ; cette audience de “mise en état” des affaires ne durait que quelques minutes, mais des dizaines de professionnels se retrouvaient ainsi une demi-journée devant la salle d'audience en attendant leur tour. « Des échanges informels avaient lieu, raconte le sociologue. On discutait des affaires en cours, on nouait des contacts, parfois on négociait discrètement un litige... Tout cela avait un impact sur l'exercice du droit. » Aujourd'hui, l'état des procédures pouvant être contrôlé à distance via Internet, ces échanges tendent à disparaître. « Je ne sais pas si c'est bon ou mauvais pour la justice, mais nous devrions dès maintenant analyser les effets de cette transformation. » De même, s'il regarde

avec circonspection l'essor d'une justice prédictive, il constate que celle-ci s'insère dans une tendance plus profonde à la réduction des débats judiciaires. « De plus en plus de dispositifs se sont empilés, permettant par exemple de payer une amende forfaitaire plutôt que de comparaître devant un tribunal. » S'ils contribuent à désengorger les tribunaux, ces outils réduisent considérablement la prise en compte singulière de chaque affaire. « Autrement dit, l'automatisation accroît cette standardisation et cette “barémisation” de la justice : en matière de conduite, par exemple, la sanction proposée par le parquet sera proportionnelle au taux d'alcool dans le sang... « Encore une fois, cela a des avantages et des inconvénients, mais nous devrions réfléchir davantage à la justice que nous voulons et à celle que nous sommes en train de construire. » Paradoxalement en effet, cette tendance serait antérieure à l'essor de l'informatique et du numérique, ce qui tendrait à démontrer que l'outil impose moins un usage qu'il ne répond à des besoins plus profonds, et en définitive à des choix de société. ■ F. T.

### + À VOIR

La table ronde sur « Le numérique et la redéfinition des professions juridiques et judiciaires », le 31 janvier 2017, lors des États généraux de la recherche sur le droit et la justice.

► <http://bit.ly/2pqTQx1>

# “Le droit n’est jamais impuissant”



DR

À l’heure d’Internet, de la mondialisation et du terrorisme, l’historienne du droit Florence Renucci nous aide à faire le point sur l’état de la recherche dans les domaines juridiques et judiciaires.

PROPOS RECUEILLIS PAR F. T.

**Du 30 janvier au 2 février 2017, les principaux chercheurs et acteurs du droit étaient réunis lors des États généraux de la recherche sur le droit et la justice. Quels étaient les enjeux de cet événement ?**

**Florence Renucci**<sup>1</sup> : L’idée était de permettre aux acteurs du monde judiciaire de réfléchir ensemble aux grandes problématiques d’aujourd’hui et de demain. À l’origine, la « Mission de recherche droit et justice » a été créée en 1994, sous forme de groupement d’intérêt public. Il s’agissait de créer une passerelle entre le monde de la recherche et le ministère de la Justice, mais qui ne soit pas subordonnée à ce dernier – pour ne pas être « juge et partie... » Après une première manifestation en 2005 sur l’avenir de la recherche juridique, nous avons souhaité rééditer cet événement de façon plus globale, avec le secrétariat d’État à l’Enseignement supérieur et à la Recherche : durant quatre jours, nous avons dressé un bilan de ces quelque dix dernières années de recherche, mais aussi abordé les questions émergentes et les pratiques judiciaires sur de grands sujets comme la mondialisation, les nouvelles technologies ou la montée des préoccupations environnementales.

**Dans le cadre de la mondialisation, le droit national peut-il encore être respecté ?**

**F. R.** : Contrairement à une idée reçue, le droit est flexible et peut toujours s’adapter. Il est certes difficile de trouver des réponses adaptées, mais il ne faut pas croire que rien n’est possible pour autant. Depuis plusieurs années maintenant, nous constatons une augmentation des conflits entre des intérêts économiques privés et des États, comme l’illustre le développement de tribunaux arbitraux pour solder des litiges judiciaires entre des pays et de grandes entreprises. Historiquement, de telles luttes de pouvoir ne sont pas neuves, mais elles se sont

multipliées au fil de la mondialisation, de l’accroissement des échanges transnationaux ou de l’ouverture des frontières. Cette globalisation du droit a entraîné l’émergence de nouveaux acteurs, comme les tribunaux arbitraux donc, mais aussi des institutions telles que la Cour européenne des droits de l’homme ou la Cour pénale internationale. Nous disposons déjà d’une jurisprudence, d’un droit international et de codes de gouvernance, mais il semble nécessaire de les repenser pour faire face à l’ampleur que prennent ces questions aujourd’hui.

**Y a-t-il plus généralement un recul du droit étatique face à des revendications privées ?**

**F. R.** : Traditionnellement, en effet, il existe un contrôle fort de l’État sur les individus par l’entremise d’un droit coercitif. Or on assiste depuis plusieurs années à une plus grande prise en compte des injonctions individuelles. Pour prendre un exemple concret, l’état civil d’une personne – son identité juridique – est longtemps resté immuable. On pouvait, par exemple, changer de nom lorsqu’il était jugé préjudiciable... Aujourd’hui, le droit de changer de nom, de sexe, d’être reconnu comme parent lorsqu’on est beau-parent ou homosexuel, etc., tout cela se voit peu à peu reconnu au fil des revendications. Cette meilleure prise en compte des demandes individuelles se traduit également par la montée en puissance de règles relevant davantage du conseil et de la bonne pratique que de l’interdiction stricte. Sur Internet par exemple, on assiste de façon parallèle à une perte de contrôle de l’État et à une intervention croissante des acteurs privés, notamment pour tout ce qui touche à la diffamation, l’injure ou la diffusion de fausses informations. Plutôt que de recourir à une procédure judiciaire, on laisse les entreprises du Net régler elles-mêmes les problèmes au cas par cas. Il faut toutefois préciser que les pouvoirs publics tentent parallèlement d’établir des

1. Directrice de recherche au Centre d’histoire judiciaire de Lille (unité CNRS/Université de Lille 2) et directrice adjointe de la Mission de recherche droit et justice.

règles générales dans ce secteur : ainsi, la loi du 7 octobre 2016 pour une République numérique offre des outils de protection des citoyens face aux réseaux sociaux, posant les bases d'un « droit à l'oubli numérique ». D'une manière générale, le respect de la vie privée suscite de nombreuses interrogations depuis l'émergence du Web social. Nous nous demandons par exemple comment le droit peut encadrer de nouveaux dispositifs comme la reconnaissance faciale : si vous êtes filmé dans la rue à votre insu, un logiciel pourrait vous reconnaître, géolocaliser votre position, identifier ce que vous faites, et le mettre en ligne contre votre gré.

#### Qu'en est-il des événements liés au terrorisme ?

**F. R. :** Sur ce sujet, il est intéressant d'élargir la réflexion à toutes les formes de violences ou d'attentats, et de ne pas se limiter à celles qui ont frappé la France ces dernières années. Les notions de « radicalisation » et de « dangerosité » sont de plus en plus présentes alors qu'elles ne sont pas réellement des concepts juridiques. Jusqu'à récemment, on retrouvait l'idée de « dangerosité » tout au plus en filigrane et appréhendée de manière objective, par exemple à travers l'idée qu'un crime témoigne d'une plus grande dangerosité qu'un délit. Depuis les années 1990, cette notion a tendance à s'immiscer dans des textes de droit. En 2008, par exemple, a été introduite la rétention de sûreté : un individu ayant purgé sa peine pouvait néanmoins être placé dans un centre social médico-judiciaire s'il était considéré comme particulièrement dangereux. Cette évolution tend à substituer une logique de contrôle permanent à un

système fondé sur la peine et la remise en liberté. Nous devons là aussi y réfléchir, car il y a un risque réel d'atteinte aux libertés fondamentales. Les pénalistes tentent d'alerter le grand public depuis plusieurs années, mais ils peinent à se faire entendre dans le contexte actuel.

#### Et sur les peines alternatives à l'incarcération ?

**F. R. :** Nous savons depuis longtemps que l'incarcération n'est pas nécessairement la meilleure façon de permettre à un individu de sortir de la délinquance ou de la criminalité, a fortiori dans un contexte de surpopulation carcérale. Lors des États généraux, les spécialistes ont pu faire le point sur les traitements en milieu ouvert en lieu et place de l'incarcération, et notamment évoquer la « contrainte pénale » mise en place par Christiane Taubira, soit la possibilité pour un condamné de bénéficier d'un accompagnement spécial. D'un point de vue global, il ne faut pourtant pas croire que l'exécution des peines en milieu ouvert constitue une solution miracle : le véritable enjeu reste l'accompagnement. Sur ce plan, les chercheurs ont montré que la méthode canadienne dite « RBR » (risque, besoin, réceptivité), qui repose sur un protocole de suivi d'individus sortant de prison en vue de prévenir la récidive, mériterait d'être davantage diffusée et appliquée en France. ||

---

*“Il y a une augmentation des conflits entre des intérêts économiques privés et des États.”*

---

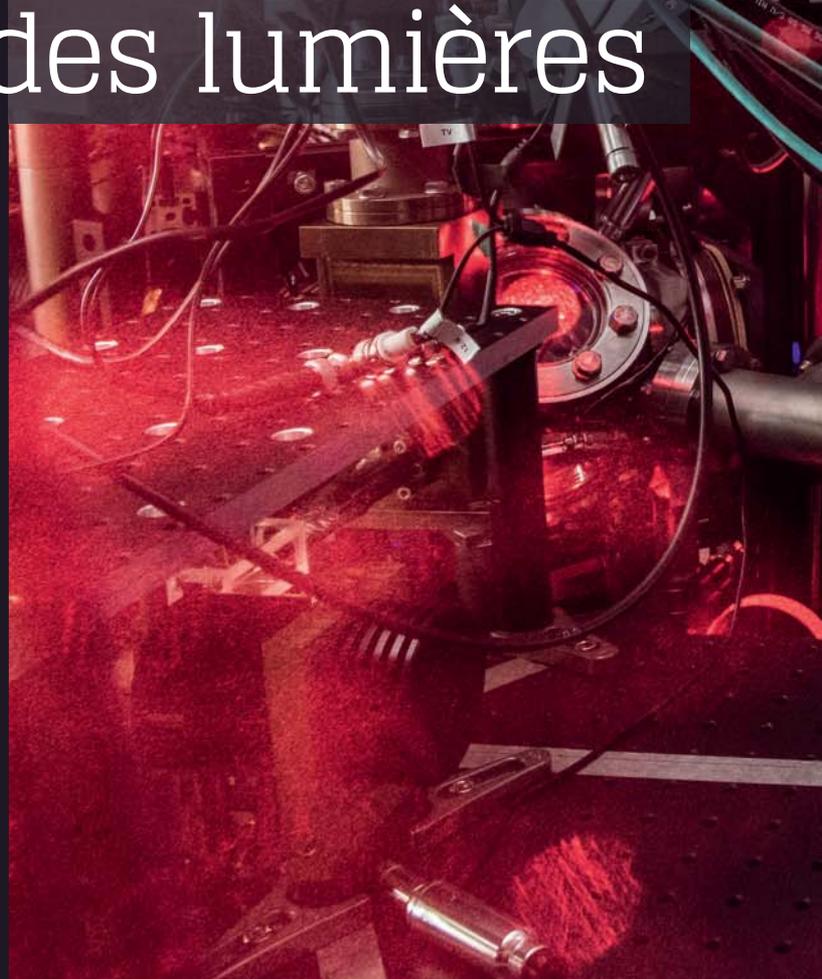


## MATIÈRE

Physique. Véritable fabrique de prix Nobel, le laboratoire Kastler-Brossel<sup>1</sup> voit se succéder des physiciens à l'origine de découvertes capitales. Ici, les chercheurs ouvrent la voie à de nouvelles méthodes d'expérimentation afin de repousser les limites de la physique quantique.

TEXTE MARIE MABROUK ET CHRISTELLE MERCIER PINEAU

PHOTOS H. RAGUET/LKB/CNRS PHOTOOTHÈQUE ;  
ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE FONDS A. KASTLER



# Au royaume des lumières

1. Sur cette photo datant de 1966 figurent notamment Alfred Kastler (au centre), l'un des fondateurs du laboratoire, Claude Cohen-Tannoudji (à sa droite) et Serge Haroche (tout à droite), nobélisés respectivement en 1966, 1997 et 2012.

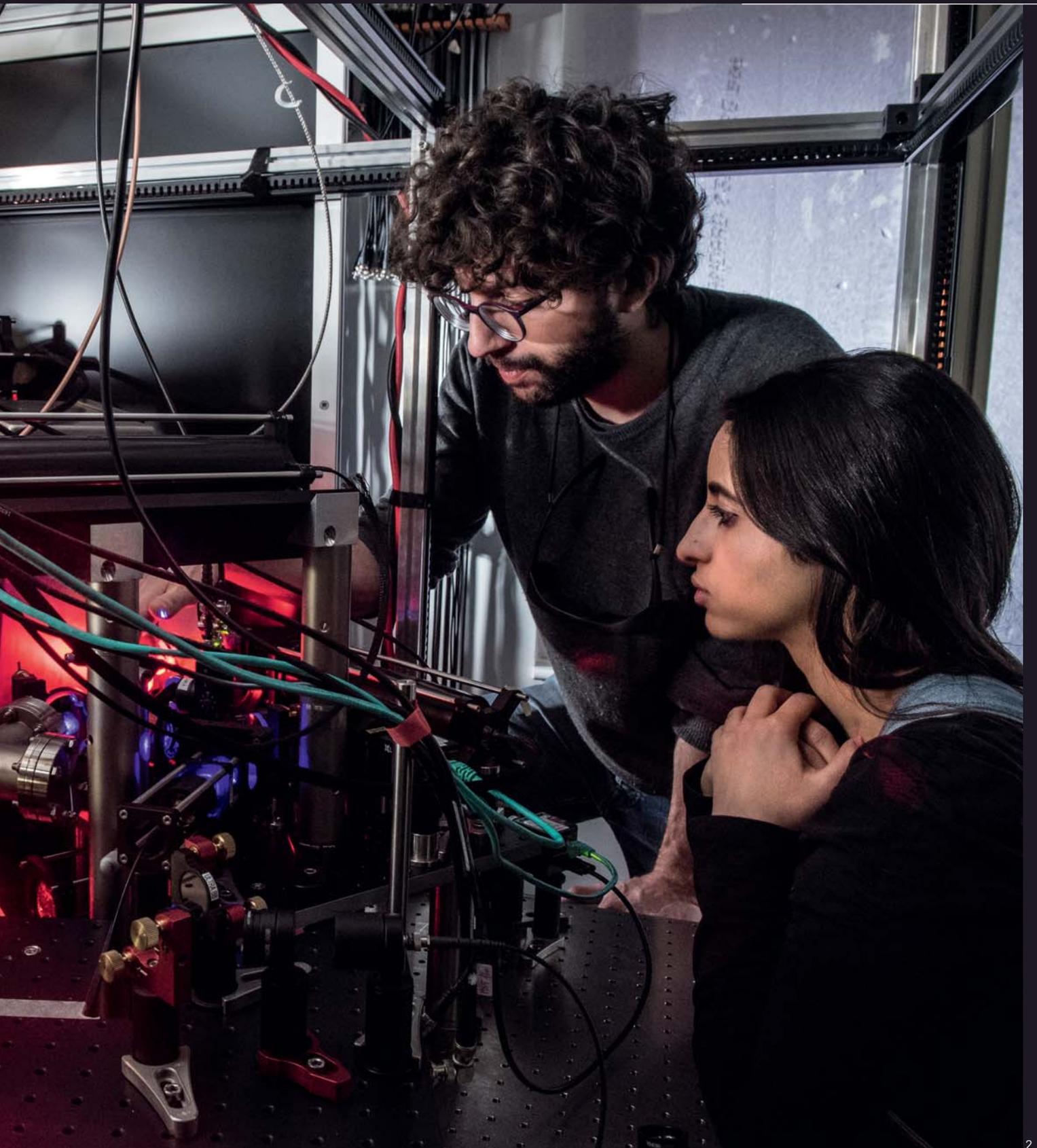
2. Les chercheurs essaient de créer les conditions de formation de particules exotiques, c'est-à-dire peu connues (ici, les particules de Majorana). Pour cela, ils refroidissent des atomes de dysprosium, un métal à la structure électronique riche. Ces recherches pourraient être utilisées pour concevoir un futur ordinateur quantique.

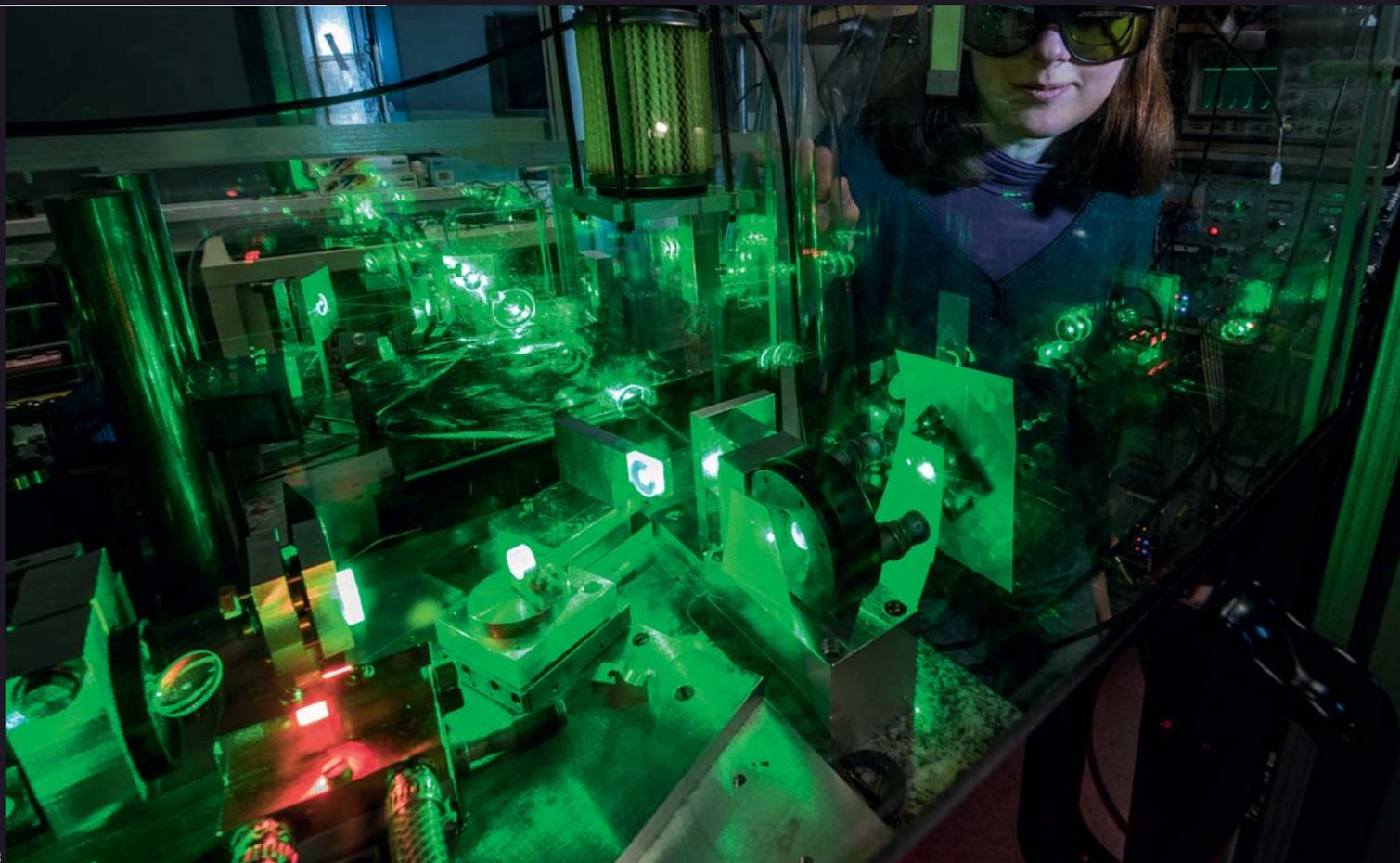


© ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE - FONDS A. KASTLER

1

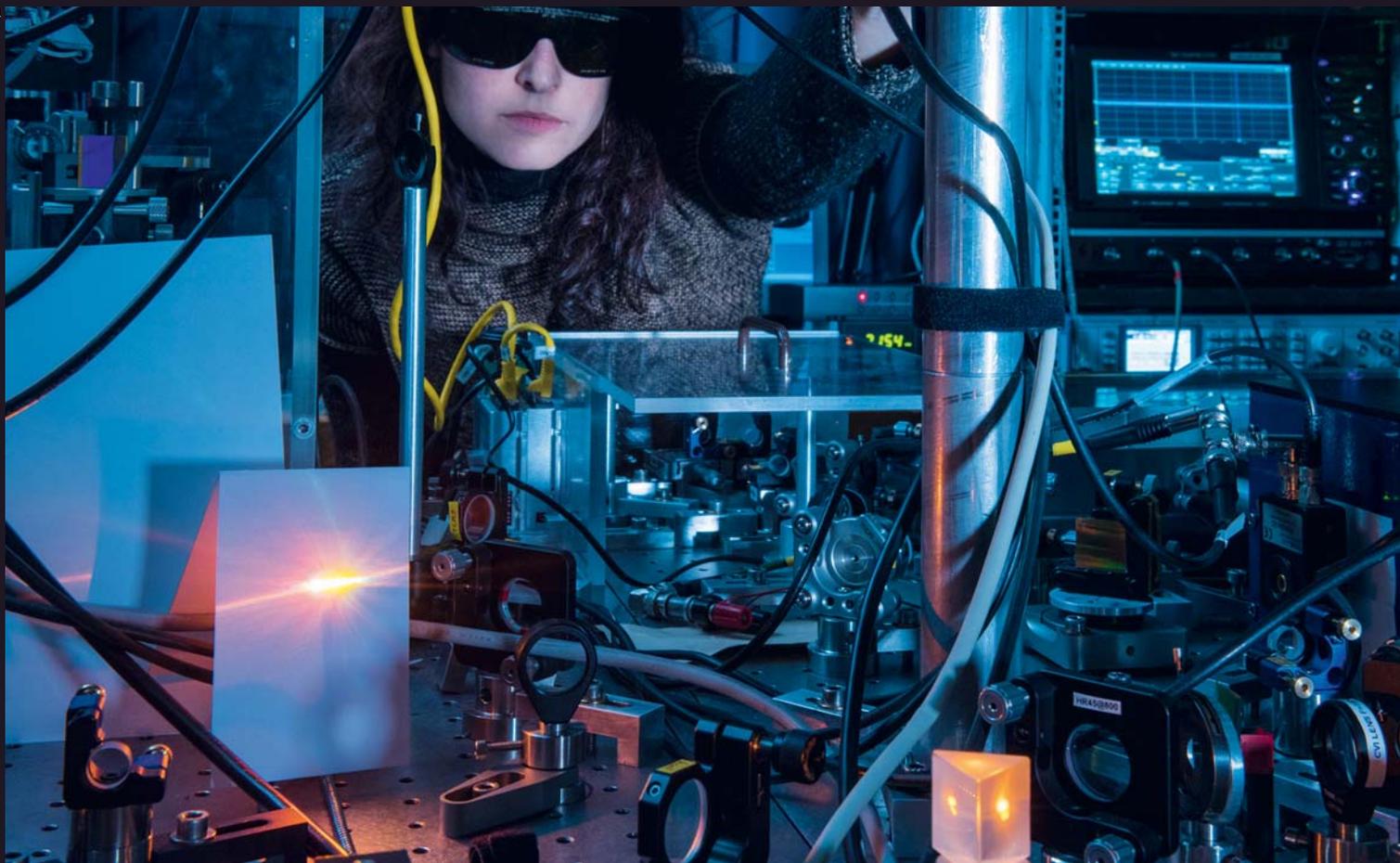
1. Unité CNRS/ENS Paris/UPMC/Collège de France.





3

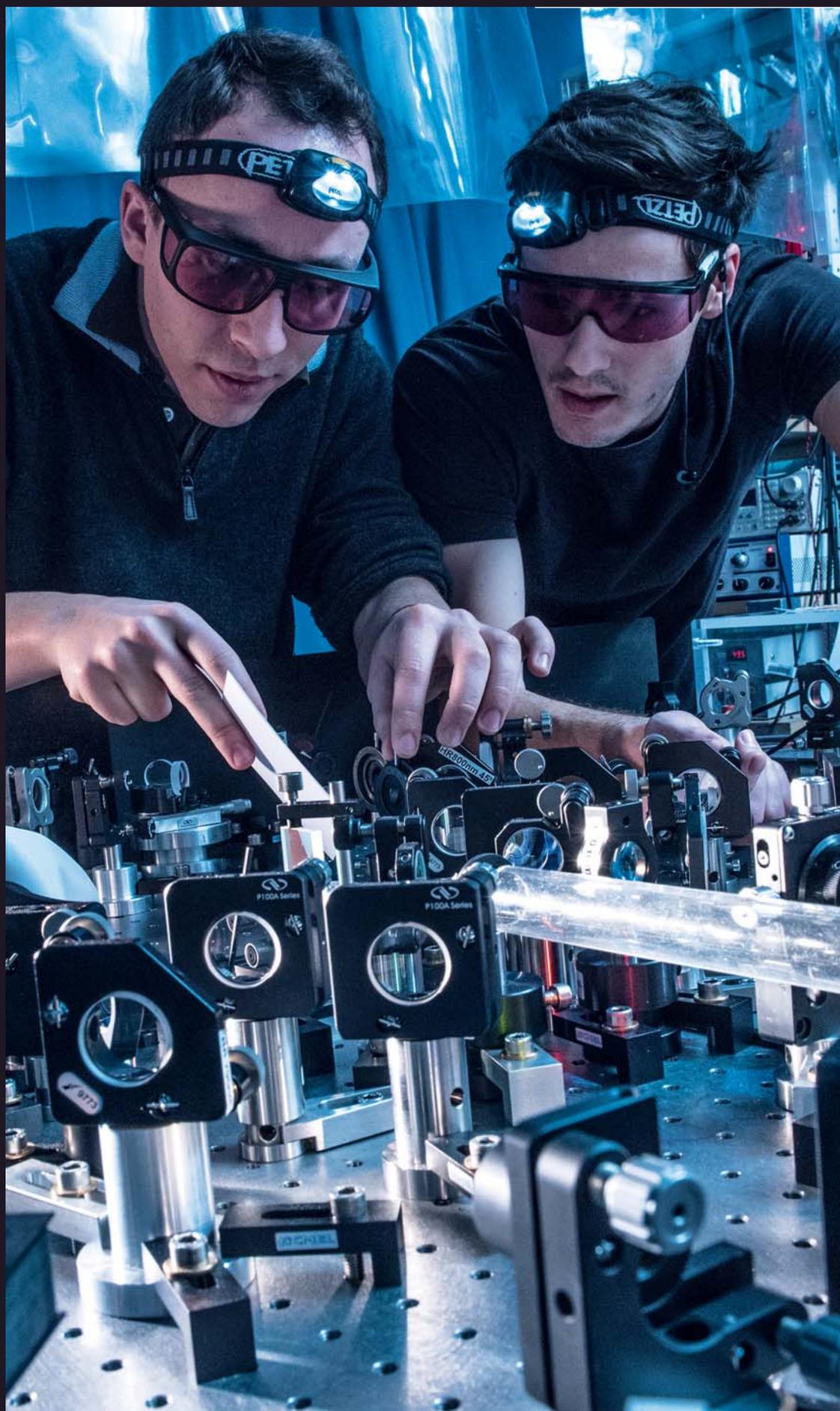
4



3. La lumière laser envoyée sur un atome d'hydrogène permet de mesurer sa structure. La comparaison entre cette mesure et sa valeur théorique aidera à déterminer des constantes fondamentales. C'est sur celles-ci que s'appuiera en 2018 la redéfinition de quatre unités du système international : le kelvin, la mole, l'ampère et le kilogramme.

4. Parmi les instruments développés au laboratoire, ce laser ultrarapide peut être utilisé comme une règle très précise. Le passage du rayon dans un prisme fait apparaître (à gauche) les multiples couleurs qui le composent et qui correspondent à des « raies » de longueurs d'onde différentes.

5. Les raies du laser ultrarapide sont utilisées comme canaux pour propager la lumière dans différents états quantiques. L'objectif est d'augmenter les possibilités de calcul et de transmission de l'information, et d'améliorer les moyens de communication.







6. Expérience sur les gaz de fermions ultrafroids, dont les étonnantes propriétés ne s'expliquent que grâce à la mécanique quantique. Les chercheurs les étudient pour comprendre une grande variété de systèmes, qui vont des métaux aux étoiles à neutrons.



La version originale de ce portfolio a été publiée dans le premier numéro de **Carnets de Science**

# Vers une chimie plus écologique

MATIÈRE

VIVANT

Depuis quelques années, se développent dans les laboratoires de nouvelles pratiques plus respectueuses de l'environnement. Illustration avec la chimie douce et la mécano-chimie, deux champs de recherche aux nombreuses applications.

PAR HUGO LEROUX

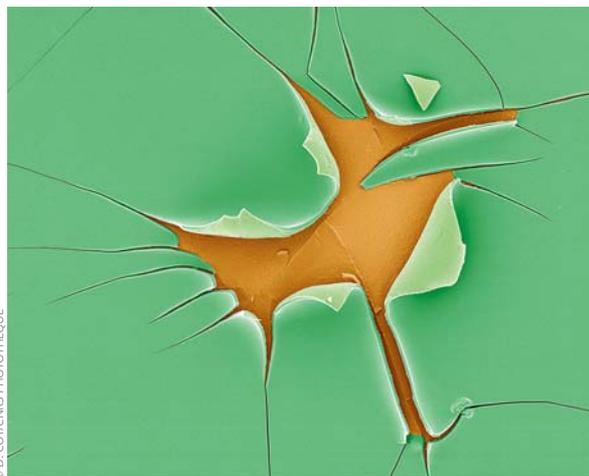
La diatomée est un organisme fascinant. Abondante dans les lacs et les rivières, cette algue unicellulaire microscopique dont la structure avait déjà séduit Charles Darwin en son temps, est capable de se confectionner une carapace de verre à partir de la silice dissoute dans l'eau. Et contrairement à nos verriers, elle réalise cela à température ambiante.

## Le choix de basses températures

Cet exemple a largement inspiré Jacques Livage, membre de l'Académie des sciences. Dès la fin des années 1970, il devient l'un des contributeurs majeurs du développement scientifique des procédés sol-gel (contraction des termes solution-géification), dont le principe de base n'est pas différent de celui de la diatomée. Prenez de la silice – principal constituant du sable –, dissolvez-la dans l'eau puis procédez à une simple opération de polymérisation en présence de catalyseurs et en jouant sur le pH. Vous obtiendrez du verre dans des conditions beaucoup plus douces que

celles traditionnellement utilisées par l'industrie, qui consistent à chauffer du sable à 1 500 °C pour le faire fondre. « *Un procédé breveté en 1939 par l'entreprise Schott, mais curieusement ignoré par le monde académique jusque dans les années 1980!* » souligne Jacques Livage.

Ainsi est née la première déclinaison de la « chimie douce », terme inventé



Vue grossie d'une craquelure d'un dépôt d'oxyde de titane obtenue par procédé sol-gel, une méthode très utilisée pour la préparation de membranes céramiques.

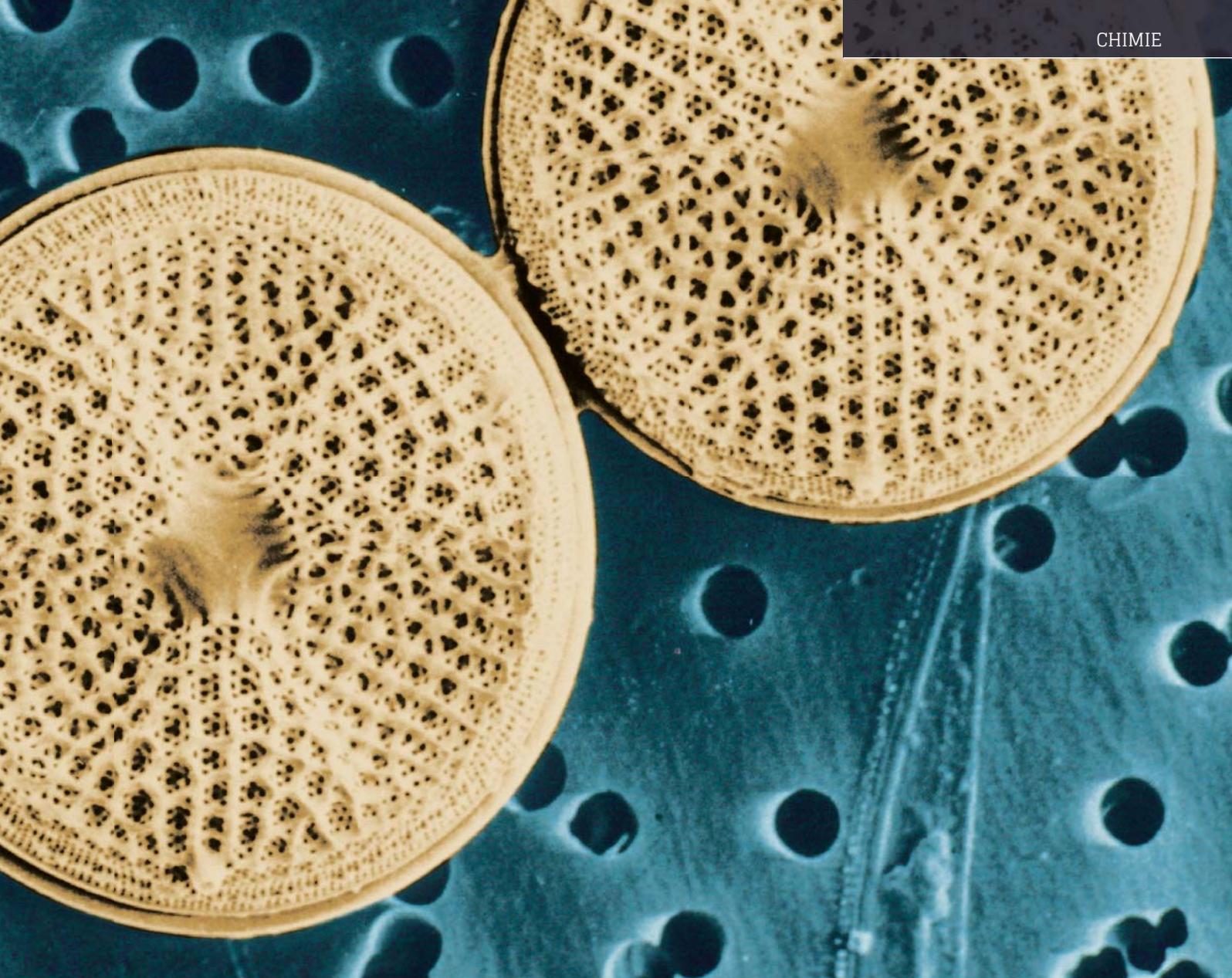
La diatomée, cette algue microscopique capable de se forger une coquille de verre à partir de la silice présente dans l'eau, inspire chercheurs et industriels (vue microscopique colorisée).

© M.-J. CHRETIENNOT-DINET/CNRS PHOTO THÈQUE

par ce chercheur en 1977. Dès cette époque il plaide pour une chimie « *qui s'intègre de façon plus harmonieuse dans les processus naturels* ». Jacques Livage en livre une définition plus précise : « *Il s'agit d'un ensemble de méthodes d'élaboration de matériaux inorganiques ou hybrides mettant en jeu des réactions de polycondensation à des températures peu élevées – de 20 °C à 200 °C. Le tout à partir de particules en suspension dans un milieu aqueux ou organique.* »

## Des matériaux sur mesure

L'avantage d'opérer à basse température est évident sur le plan de l'économie d'énergie. Mais ce n'est pas le seul. Comme les particules en suspension s'agrègent petit à petit, le procédé permet un contrôle très



fin de la structure créée. En clair, il donne la possibilité de fabriquer des matériaux sur mesure en fonction de l'application désirée ! « *Les procédés sol-gel ne permettent pas d'obtenir un produit massif car on travaille en solution, et l'évaporation totale de l'eau conduit à une poudre, précise Jacques Livage. En revanche, ils sont particulièrement adaptés au dépôt de films minces.* »

Et les applications s'accumulent depuis les années 1980. Ainsi, les verriers ont développé ce procédé pour déposer des revêtements anti-reflets sur les vitrages des bâtiments ou les pare-brise d'automobiles. Même les secteurs de haute technologie comme l'industrie spatiale en ont bénéficié, avec notamment les tuiles réfractaires de la navette Columbia, qui sont élaborées à partir

de fibres céramiques obtenues par un procédé sol-gel.

Mais il y a mieux. Les chercheurs ont poussé plus loin la possibilité d'opérer à basse température et avec précision en créant des matériaux inédits : les matériaux hybrides organo-minéraux.

Ces matériaux, qui combinent parties minérales et organiques, seraient invisibles par les voies

chimiques traditionnelles. Ainsi, les films en oxyde de titane ont permis de mettre au point des vitres auto-nettoyantes, comme celles équipant la toiture du Grand Théâtre national de Pékin. Les particules d'oxyde de titane ont pour propriété de décomposer les particules organiques (comme les saletés) par photocatalyse, tandis que la microstructure, hydrophobe, permet de chasser l'eau. Parfait exemple d'un matériau sur mesure ! Aujourd'hui, les matériaux hybrides ont envahi notre quotidien, depuis la semelle de nos fers à repasser jusqu'aux textiles, en passant par l'optique et l'automobile.

#### **Encapsuler des bactéries**

Pas étonnant, donc, que le concept de chimie douce ait fait école. À tel point que la littérature internationale ...

*“La chimie douce s'intègre de façon plus harmonieuse dans les processus naturels.”*

... cite la plupart du temps le terme en français dans le texte ! Mais outre les applications passées, elle continue d'élaborer des matériaux répondant aux enjeux futurs, au premier rang desquels les biomatériaux et des matériaux « vivants ». « *Tout comme la diatomée se recouvre de verre, on parvient maintenant à encapsuler des micro-organismes vivants* », explique Jacques Livage. Des bactéries, des champignons, des microalgues, des cellules végétales et même des cellules animales ont ainsi été immobilisés au sein de gels de silice, tout en conservant leur activité biologique.

En contrôlant finement la porosité de cette capsule, les chercheurs parviennent à conserver les échanges du micro-organisme avec le milieu extérieur. Avec, à la clé, des applications allant de la médecine jusqu'à l'environnement.

Grâce à ce procédé, des bactéries sensibles à certaines espèces chimiques sont utilisées comme capteurs antipollution, ou comme tests immunitaires pour les analyses médicales, tandis que d'autres sont exploitées pour leur capacité à éliminer certaines substances ou produire des molécules médicaments. Des équipes développent donc des réacteurs sol-gel fixant ces micro-organismes afin d'augmenter leur productivité.

En médecine, l'encapsulation peut également servir à protéger certaines cellules. Des chercheurs sont ainsi parvenus à injecter chez des diabétiques des cellules de pancréas impliquées dans la production d'insuline. La carapace protège alors ces cellules étrangères contre le système immunitaire du patient ! Une voie prometteuse concerne enfin les nanomédicaments, assez petits pour pénétrer des cellules malades, notamment cancéreuses, et les détruire de l'intérieur. Grâce à l'encapsulation, les chercheurs peuvent doter ces nanomédicaments de



Ces verres de silice ont été préparés par procédé sol-gel et contiennent des colorants organiques.

© H. BAGUET/ONIS-PHOTOTHEQUE



Faisceaux de nanotubes de lanthanéite (vus au microscope en lumière polarisée), un peptide dont la faculté de s'auto-assembler intéresse les nanotechnologies.

© C. TABABOUT, F. ARTZNER

domaine, les chercheurs se sont inspirés des éponges. Certaines d'entre elles élaborent en effet des fibres de silice, appelées spicules, pour s'ancrer aux fonds marins. L'équipe de Franck Artzner, chercheur à l'Institut de physique de Rennes<sup>1</sup>, a tenté de reproduire la protéine qui, au cœur de ces spicules, a la faculté d'agréger des couches successives de silice en suspension dans l'eau. Ils ont ainsi obtenu des nanofibres de silice capables de s'auto-assembler ! En modifiant les propriétés de cette protéine, d'autres équipes sont parvenues à fixer des films d'oxyde de cobalt sur ces nanofilaments. Créant de cette manière des électrodes qui permettent de doubler la capacité énergétique d'une batterie au lithium !

Éponges, algues... Notre environnement constitue une banque d'idées inépuisable. « *La chimie douce est avant tout une chimie bio-inspirée* », insiste Jacques Livage. Cette approche biomimétique, basée sur l'observation de procédés naturels jusqu'ici insoupçonnés, rejoint d'ailleurs une autre discipline d'avenir : la chimie verte<sup>2</sup>. Toutes deux dessinent les contours d'une chimie d'avenir, à la fois respectueuse de l'environnement et porteuse des matériaux de demain. La chimie douce n'a pas fini de faire l'actualité. ||

“Notre environnement constitue une banque d'idées inépuisable.”

fonctions de furtivité et de ciblage qui vont leur permettre d'atteindre plus directement les cellules visées. D'où l'espoir de thérapies mieux ciblées et plus efficaces.

#### Produire des nanomatériaux

Autre grand espoir de la chimie douce : les nanomatériaux. Dans ce

1. Unité CNRS/Univ. Rennes 1. 2. Concept lancé au début des années 1990 par des chimistes américains, la chimie verte a pour but de concevoir des produits et procédés chimiques permettant de réduire ou d'éliminer l'utilisation de substances dangereuses.

# Une chimie sans solvants, c'est possible

## MATIÈRE

En revisitant la technique traditionnelle du mortier et du pilon, les chercheurs ont développé des procédés de mécanochemie permettant de se passer des solvants et de leur toxicité. Les explications du chimiste Frédéric Lamaty.



Matières plastiques, médicaments, produits cosmétiques... Par ses activités de synthèse, la chimie dite organique, qui se consacre aux composés contenant des atomes de carbone, contribue à la préparation d'un grand nombre de produits du quotidien. Cette activité, à l'heure du développement durable, se doit de limiter son impact environnemental tout en restant viable économiquement. Or, l'un des problèmes cruciaux que ne soupçonne pas le consommateur, c'est que produire ces composés nécessite une grande quantité de solvants organiques, volatils, souvent toxiques, et délétères pour l'environnement. Pour limiter ces effets, les solvants peuvent être récupérés et recyclés. Mais il existe aussi une approche totalement différente, prometteuse et innovante : mettre au point des procédés complètement nouveaux qui s'affranchissent de l'utilisation de solvants, en recourant... au broyage.

### Le broyage, technique ancestrale

Depuis la nuit des temps, pour survivre, se nourrir et développer leurs activités, les humains ont développé des techniques de broyage qui permettent par exemple de réduire des graines en farines plus faciles à manipuler et à cuisiner, ou bien de préparer des pigments utilisés dans les peintures rupestres. Ils faisaient appel pour cela à des outils comme la meule ou le mortier-pilon. Ces outils très simples, actionnés par

une personne, vont générer une force mécanique pour presser des fruits en jus ou transformer des mélanges de sable, argile et autres matériaux en mortier. Cette action mécanique favorisant ou engendrant en elle-même des réactions chimiques, on parle alors de mécanochemie.

Avec l'essor d'une industrie chimique performante, la technique de mécanochemie a été tout d'abord développée, et acceptée en tant que telle, pour préparer des composés inorganiques comme les ciments ou les oxydes métalliques destinés aux

nouvelles batteries. Il faudra plus de temps pour que le monde de la synthèse organique et les chimistes envisagent sérieusement l'utilisation de techniques mécaniques pour synthétiser des médicaments, des matériaux ou des colorants en se passant des solvants.

### Le « dogme » du solvant

Classiquement, le chimiste organicien a besoin du solvant qui permet de dissoudre, de faciliter le contact entre différents composés et parfois de favoriser une réaction grâce à des « effets de solvant » positifs. Le ...



Poudre de borane obtenue par mécanosynthèse. Dans le récipient, on distingue les billes en acier ayant servi au broyage.

... dogme « pas de synthèse sans solvant » s'est installé chez les scientifiques, et ce depuis l'Antiquité, quand des erreurs de traduction du grec au latin ont conduit à extrapoler une phrase d'Aristote postulant que les liquides se mélangeaient mieux que les solides. En conséquence, la chimie organique sans solvants ne connaîtra que peu de développements. Pourtant, des travaux isolés utilisant des outils aussi sommaires que le mortier et le pilon témoignaient déjà de la possibilité d'effectuer des réactions chimiques organiques par mécanochemie. Pour encore mieux mélanger les solides, selon l'expression d'Aristote, les chimistes se sont récemment tournés vers des équipements de type broyeur à billes capables de générer une plus grande efficacité de broyage, une meilleure reproductibilité, des efforts moindres de la part du manipulateur et des quantités plus importantes de produit.

Cette approche contribue au développement d'une chimie verte et durable, car elle permet de s'affranchir ou de diminuer considérablement l'usage de solvants organiques très souvent néfastes. En outre, on sait que l'utilisation d'un solvant entraîne une dilution des molécules mises en réaction. Or la vitesse d'une réaction est liée à cette dilution : généralement, plus la dilution est grande, plus la réaction est lente, les réactifs ayant une probabilité diminuée de se rencontrer et de réagir. Le broyage permet alors d'éviter cette dilution par le solvant, car il favorise la mise en contact constante des réactifs jusqu'à leur réaction complète.

### De futurs médicaments

En France, une équipe de l'Institut des biomolécules Max-Mousseron de Montpellier est engagée depuis une quinzaine d'années dans le domaine de la mécanochemie. Elle a

Le mortier et le pilon sont des outils simples et efficaces pour obtenir des composés chimiques en échappant aux effets néfastes des solvants.



© E. PERRINCHES PHOTOTHÈQUE

*“À la différence du solvant, le broyage favorise la mise en contact constante des réactifs.”*

notamment obtenu des résultats inédits dans un domaine phare : la synthèse de biomolécules de type peptides.

Parce qu'elles ont un index thérapeutique élevé et une faible écotoxicité, les molécules à base de peptides suscitent un énorme intérêt de la part des chercheurs et des entreprises pharmaceutiques. De plus en plus de ces composés pharmaceutiques sont actuellement mis sur le marché ou en phase d'évaluation clinique. Les techniques classiques permettant de les synthétiser sont certes éprouvées, et pour certaines automatisées, mais elles consomment de grandes quantités de solvants et de réactifs toxiques. Or, l'approche mécanochemie a permis, en broyant deux dérivés d'acides aminés, de générer une liaison peptidique puis de construire pas à pas de plus longs peptides ;

tout cela en réduisant quasiment à néant les quantités de solvants habituellement nécessaires ! Des études plus complètes permettent désormais d'envisager à brève échéance la production de médicaments peptidiques préparés selon ce nouveau procédé.

### Une technologie de rupture

La même équipe a également mis à profit l'expérience ainsi acquise en mécanochemie pour optimiser la préparation de composés organométalliques, c'est-à-dire possédant simultanément une structure organique et un métal. Ces derniers peuvent avoir des actions thérapeutiques ou encore servir de catalyseur pour la préparation de matériaux ou de polymères. Là encore, réduction du volume de solvant utilisé, efficacité de synthèse rapide et propre des composés d'intérêt en font une méthode de choix pour préparer de nouveaux composés.

La mise au point d'une mécano-synthèse produisant des composés de structures variées promet de nombreuses applications dans un futur proche. Ainsi, la nécessité de s'inscrire dans une optique de développement durable a permis l'émergence d'une technologie de rupture entraînant des retombées scientifiques originales. Il ne reste plus qu'à convaincre un plus grand nombre de chimistes organiciens des bénéfices scientifique, technique, économique et écologique de la méthode. ||



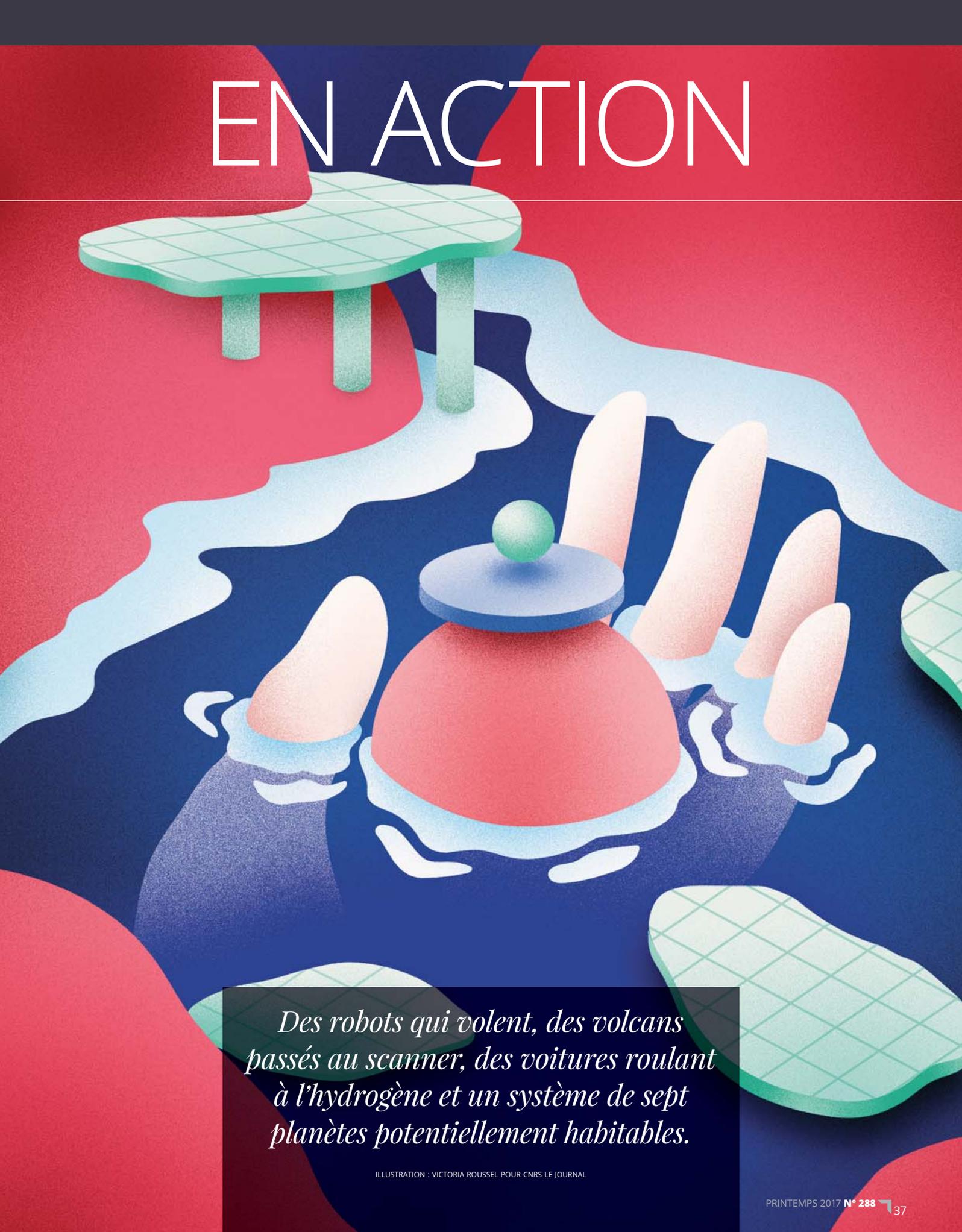
© M. LAMATY/BRANDT

**Frédéric Lamaty** est directeur de recherche à l'Institut des biomolécules Max-Mousseron<sup>1</sup>,

responsable de l'équipe Chimie verte et technologies innovantes.

1. Unité CNRS/Univ. Montpellier/Univ. Avignon Pays de Vaucluse/ENSC Montpellier/Univ. Nîmes/CHU Nîmes.

# EN ACTION



*Des robots qui volent, des volcans passés au scanner, des voitures roulant à l'hydrogène et un système de sept planètes potentiellement habitables.*

ILLUSTRATION : VICTORIA ROUSSEL POUR CNRS LE JOURNAL

# Les premiers pas de la robotique aérienne

PROPOS RECUEILLIS PAR SAMAN MUSACCHIO

## NUMÉRIQUE

**Entretien.** Des robots aériens capables de manipuler des objets pourraient bientôt être déployés dans plusieurs secteurs industriels. Ces recherches, menées notamment en France dans le cadre d'un projet européen, ont permis de créer les prototypes les plus avancés au monde. Rencontre avec Juan Cortés, directeur de recherche au Laas<sup>1</sup>, qui participe au projet.

### La manipulation aérienne, est-ce vraiment si nouveau ?

**Juan Cortés :** Oui, la manipulation aérienne est une thématique qui commence à prendre de l'importance seulement depuis 2012 environ. Nous connaissons déjà bien les robots manipulateurs fixes – comme ceux qui font de la soudure dans l'industrie automobile. Nous avons aussi des plateformes mobiles au sol – des plateformes autonomes qui roulent équipées d'un ou de plusieurs bras. Ces recherches-là ont commencé dans les années 1970-1980, et cela se développe énormément aujourd'hui dans le cadre de l'usine du futur (aussi appelée industrie 4.0). Il existe également des robots manipulateurs sous-marins. Il y a un parallèle entre l'air et l'eau, mais un robot aérien doit être beaucoup plus réactif, car le milieu est bien moins dense, et ne laisse pas le droit à l'erreur : le robot aérien ne peut pas flotter en cas de problème. Notre laboratoire est spécialisé en robotique aérienne – des plateformes qui volent et qui ont des capacités de manipulation et d'interaction avec l'environnement.

### Pourquoi avons-nous besoin de robots aériens ?

**J. C. :** Il y a de nombreuses applications possibles, comme faire des prélèvements dans des endroits inaccessibles ou dans des zones à risques. Dans le cadre du projet européen Aeroarms auquel nous participons<sup>2</sup>, nos partenaires travaillent dans le domaine de l'inspection d'installations industrielles, plus précisément dans le secteur du pétrole et du gaz. Ils ont des milliers de kilomètres de tuyaux métalliques à inspecter manuellement. Cela représente

un coût, chiffré à 58 milliards d'euros à l'échelle mondiale pour la seule année 2008. Plus important encore, il s'agit de la plus grande source d'accidents dans ces industries. Ce travail est réalisé aujourd'hui en installant des échafaudages, ou avec des personnes suspendues par des câbles, et il y a beaucoup de risques. L'idée du projet est de pouvoir faire ce type d'inspection – mesurer des fissures ou la corrosion en déplaçant un capteur sur un tuyau – avec des robots aériens.

### Quelles sont les difficultés principales de ce champ de recherche ?

**J. C. :** Ce qui nous pousse vraiment, c'est le défi scientifique que pose ce type de robot. Le fait d'ajouter un bras manipulateur à un robot aérien pose des problèmes avant tout théoriques. Il faut repenser la conception sur le plan de la mécanique (la géométrie du robot, les matériaux, le type d'actionneurs, etc.). Il faut aussi développer de nouvelles méthodes de calcul de trajectoires et de commande, car ce qui fonctionne pour les robots fixes ou à roues est inutile lorsqu'on l'applique à un manipulateur aérien.

### Surtout en matière de stabilisation ?

**J. C. :** Pour un manipulateur mobile qui est au sol, il est habituel de découpler la commande du bras et la commande de la plateforme mobile – les perturbations liées au mouvement du bras sont négligeables, ou facilement contrôlables. En vol, si le bras bouge, la plateforme doit s'adapter en temps réel. D'ailleurs, elle doit même prédire les changements qu'elle aura à faire avant même que le bras commence à bouger. Il faut qu'elle anticipe l'impact que le mouvement du bras va avoir sur la dynamique de l'ensemble.

### Donc on envoie une commande, et avant même que le robot la réalise, la plateforme doit ajuster sa position de vol ?

**J. C. :** Oui, c'est un système qui est bien plus couplé. En

1. Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS, équipe « robotique et interactions ». 2. Le projet Aeroarms (2015-2019) regroupe dix partenaires académiques et industriels. Il fait suite à un autre projet européen auquel le Laas participait : Arcas (2012-2016).



© LAAS-CNRS

fait, on ne peut pas voir la plateforme volante et le bras comme deux systèmes, mais comme un ensemble. Si on commande chaque partie individuellement, le comportement du robot n'est pas bon. Cela nécessite le développement de nouvelles méthodes de commande. Le problème se pose aussi quant à la planification de mouvements, et même quant à la conception du système pour faciliter la commande.

#### Revenons à vos robots chargés d'inspecter les tuyaux des installations pétrolières. Quelles tâches doivent-ils réaliser ?

**J. C. :** Les mesures de corrosion, par exemple, se font en analysant les parois des tuyaux, ce qui n'est pas possible avec l'œil ou une simple caméra. Il faut un contact physique entre le capteur et le tuyau. La réelle difficulté est que pour maintenir le contact, il est nécessaire de contrôler la force d'interaction entre le robot et le tuyau. Sur ce type de recherche, nous sommes vraiment en avance. Nos robots aériens peuvent non seulement manipuler des objets, mais aussi maintenir un contact physique avec l'environnement.

#### S'agit-il de plusieurs types de robots ?

**J. C. :** On construit et on teste en parallèle quatre prototypes. Le premier est un quadrirotor classique, comme ceux disponibles commercialement pour de la prise d'image, où tous les moteurs sont alignés. Nous avons donc embarqué des capacités de manipulation : un petit bras. C'est un système peu coûteux, mais assez limité en matière de capacité de mouvement et de charge utile. Le deuxième est une plateforme avec plus de quatre rotors – six ou huit – où les axes ne sont pas alignés. Ce sont des plateformes dites « complètement actives », qui peuvent être commandées à la fois en position et en orientation. Pour comparer, un quadrirotor normal est comme une voiture capable de se déplacer en marche avant, en marche arrière et de tourner, mais pas de se déplacer latéralement. Un robot aérien complètement actif a une liberté totale – on peut lui dire de rester sur une position fixe, mais avec un angle de tangage de 30°

par exemple. Cela permet d'installer le capteur directement sur un organe terminal fixe, sans avoir besoin d'ajouter un bras articulé.

#### Et les deux autres ?

**J. C. :** L'un de nos partenaires travaille sur un hélicoptère autonome d'environ trois mètres d'envergure, doté d'un bras manipulateur de type industriel. Ce modèle est un peu plus délicat pour les normes d'aviation civile et assez coûteux, mais il peut porter des charges beaucoup plus lourdes. Le quatrième type est un système complètement différent développé au Laas, que nous avons appelé « FlyCrane ».

#### Une grue volante ?

**J. C. :** Oui, c'est un système composé de trois quadrirotors normaux qui portent une plateforme suspendue par six câbles. Cette plateforme va nous permettre d'amener un autre type de robot sur les tuyaux – un robot d'une vingtaine de centimètres avec des roues magnétiques qui pourra sonder les tuyaux avant de remonter sur la plateforme volante.

#### À terme, ces robots aériens pourraient aussi servir à réparer ?

**J. C. :** Nous n'en sommes pas encore là. Pour ce type de tâches, il faudrait des forces assez conséquentes – plusieurs dizaines de newtons – qui sont hors de portée de nos plateformes actuelles. Remplacer un capteur, ou même changer la batterie d'un émetteur, nous pouvons le faire. Peut-être même une petite soudure locale. Mais remplacer un tuyau, c'est plus compliqué. Ceci dit, les robots manipulateurs aériens n'en sont qu'à leurs débuts. ||

► Ce prototype développé au Laas est équipé d'un bras léger avec deux articulations.

*“Un robot aérien doit être beaucoup plus réactif, car le milieu ne laisse pas le droit à l'erreur.”*

# Paris, capitale mondiale des maths en 2022 ?

**Mathématiques.** Paris a posé sa candidature à l'organisation de l'édition 2022 du Congrès International des Mathématiciens, la plus importante manifestation de la discipline. Quels en sont les enjeux, et quels sont les atouts de la France ?

PAR YAROSLAV PIGENET

Tous les quatre ans depuis 1897, l'Union mathématique internationale (UMI) organise le plus grand rassemblement de la communauté mathématique mondiale : le Congrès international des mathématiciens (ICM). En 2014, la précédente édition à Séoul avait notamment été marquée par l'attribution d'une médaille Fields au Franco-Brésilien Artur Ávila, douzième lauréat français dans l'histoire de cette récompense. Alors que le prochain congrès se tiendra du 1<sup>er</sup> au 9 août 2018 à Rio au Brésil, Paris et Saint-Pétersbourg se sont portées candidates pour accueillir l'ICM 2022. La France n'a pas accueilli cette manifestation depuis 1970, ni la Russie depuis 1966.

## Les J.O. des maths

Pour le grand public, l'ICM est avant tout connu comme l'événement où sont remises les récompenses parmi les plus prestigieuses des mathématiques : la médaille Fields bien sûr, mais aussi le prix Gauss qui récompense une recherche mathématique ayant eu une application dans un domaine technique, le prix Nevanlinna qui honore un jeune mathématicien ayant contribué à l'avancement des sciences de l'information, et enfin la médaille Chern. Pour la communauté mathématique, c'est aussi un grand

colloque durant lequel près de 5 000 mathématiciens venus du monde entier assistent à une vingtaine d'exposés pléniers – présentés notamment par les lauréats de la médaille Fields – et près de 200 conférences consacrées aux travaux les plus en vue et aux domaines les plus actifs des mathématiques. L'ICM constitue ainsi pour les chercheurs une occasion unique de se rencontrer, d'échanger et de révéler les dernières avancées et les nouveaux défis portant sur l'ensemble des thématiques de la recherche mathématique contemporaine.

## Une candidature très soutenue

Le projet d'organisation de l'ICM à Paris en 2022 a été formellement lancé lors d'une réunion qui a rassemblé en mai 2014 les principaux acteurs institutionnels des mathématiques en France. Un comité de préparation de la candidature présidé par François Loeser, professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie et médaille d'argent du CNRS, a été constitué dans la foulée. La candidature de la France a ainsi été présentée à l'assemblée générale de l'UMI à Gyeongju (Corée) en août 2014, juste avant le congrès de Séoul. En novembre 2016, date limite de dépôt des dossiers de candidature, deux villes étaient en compétition : Paris et Saint-Pétersbourg (Russie).

Face à la candidature russe, la France bénéficie de sérieux atouts : le prestige de Paris, une excellente infrastructure de transport et d'hébergement, et une position

## L'ICM en quelques dates



**Août 1897**

Créé sur l'idée des mathématiciens allemands Felix Klein et Georg Cantor, le premier ICM est suivi par 208 mathématiciens à Zurich.

Au Congrès de l'ICM à Paris, David Hilbert énonce la célèbre liste des 23 problèmes non résolus, dont certains continuent de faire cogiter les chercheurs.

**Août 1900**



**Août 1936**

À Oslo, sont décernées les deux premières médailles Fields, du nom du mathématicien canadien qui les a créées.



© SEUL ICM 2014

centrale en Europe. « Cette candidature est un projet collectif porté par l'ensemble de la communauté mathématique française, rappelle François Loeser. Elle bénéficie ainsi du soutien du pouvoir politique (présidence de la République, ministère, Ville de Paris, Région Île-de-France), du CNRS et d'autres institutions scientifiques comme Inria (Institut national de recherche en informatique et en automatique) ou l'Académie des sciences, des trois sociétés savantes de mathématiques (Société française de statistiques, Société de mathématiques appliquées et industrielles, Société mathématique de France), ainsi que du Medef, sans oublier les nombreux laboratoires, instituts de recherche et associations avec lesquels seront organisés des projets et opérations spécifiques pour 2022. »

La candidature retenue sera décidée en juillet 2018 lors d'un vote de l'assemblée générale de l'UMI à São Paulo (Brésil), juste avant l'ICM 2018.

### Quel intérêt pour la France ?

Mais qu'apporterait concrètement l'organisation de l'ICM 2022 en France ? « Cela aurait tout d'abord l'avantage de permettre à plus de chercheurs français d'y assister, pour des raisons évidentes de proximité. C'est un événement extrêmement stimulant pour les chercheurs, notamment les jeunes ! argumente Clotilde Fermanian, de l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions du CNRS. Ensuite, quand 5 000 mathématiciens de

► Remise de la médaille Fields à Artur Ávila, lors du dernier congrès de l'ICM, à Séoul en 2014.

haut niveau débarqueront à Paris, la presse va s'emparer du sujet et ce sera une occasion unique de faire parler des maths, et de permettre aux gens de les (re)découvrir. » D'autant qu'autour du congrès et durant toute l'année 2022, plusieurs événements seront organisés partout en France, non seulement dans des laboratoires, mais aussi en direction du grand public. « Il y a un double enjeu dans cette organisation, ajoute Clotilde Fermanian. Un enjeu national, qui est de vivre un moment stimulant mathématiquement, parler des mathématiques et donner envie aux jeunes d'en faire. Mais aussi un enjeu international qui est de montrer que l'on fait des maths intéressantes en France. »

Plusieurs actions spécifiques seront ainsi organisées dans l'Hexagone, avant et après le congrès lui-même. Tout d'abord, en direction de jeunes mathématiciens provenant notamment des pays en voie de développement : des colloques thématiques, des écoles d'été leur permettront d'apprendre les développements les plus récents dans leur domaine. Parallèlement, des opérations destinées au grand public se dérouleront tout au long de l'année : conférences, ateliers, interventions dans les écoles, performances artistiques etc. « Nous comptons pour cela nous associer avec les nombreuses structures impliquées dans la diffusion des mathématiques et de la culture scientifique en France, et en particulier nous aimerions pouvoir nous appuyer sur le futur musée des mathématiques, indique François Loeser. Notre objectif est de sensibiliser le plus grand nombre à l'intérêt des mathématiques, à leur utilité, à leur beauté... et à la compréhension des enjeux économiques, scientifiques et humains du monde qui nous entoure ». Enfin, un troisième type d'intervention « hors congrès » visera à faire connaître au monde industriel l'état de la recherche mathématique et de ses applications potentielles, notamment via le Labex AMIES (Agence pour les mathématiques en interaction avec l'entreprise et la société). II

Alexandre Grothendieck refuse d'aller recevoir sa médaille Fields à Moscou.

**Août 1966**



© IHÉS

La France reçoit l'ICM une deuxième fois, à Nice. Sergueï Novikov, lauréat Fields, n'est pas autorisé à sortir d'URSS pour s'y rendre.

**Août 1970**

**Août 2014**

L'Iranienne Maryam Mirzakhani est la première femme à recevoir la médaille Fields, à Séoul. La France se porte candidate pour accueillir l'ICM en 2022.

© SEUL ICM 2014

# Des particules cosmiques pour ausculter les volcans

MATIÈRE

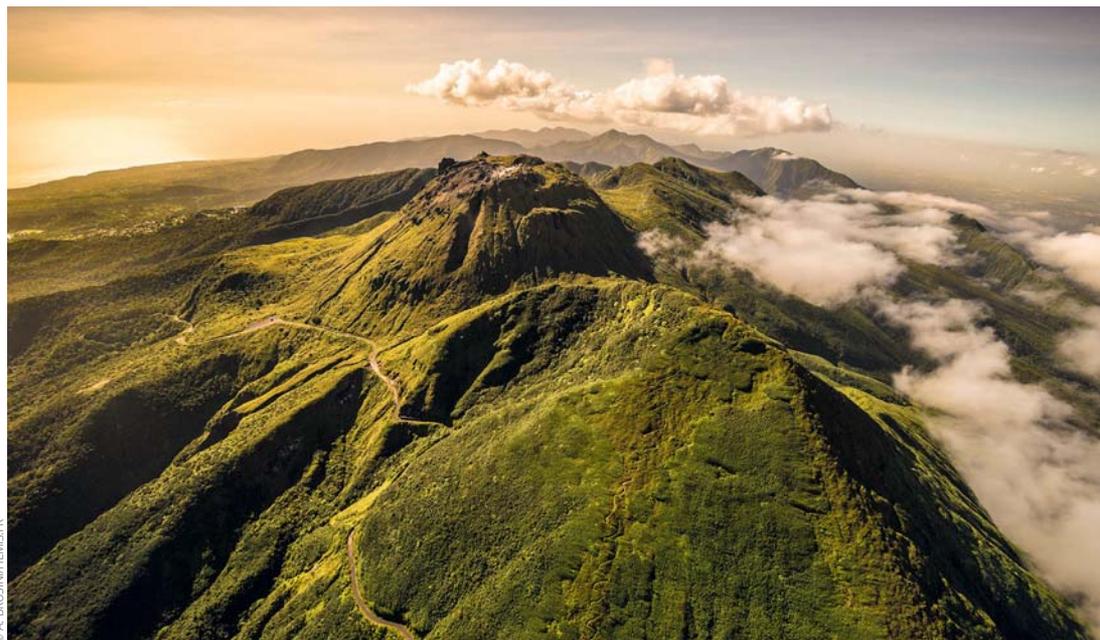
TERRE

**Géophysique.** Radiographier les volcans pour mieux identifier leurs fragilités : c'est l'incroyable défi des télescopes à muons, une technologie mise au point il y a dix ans à peine et installée notamment sur le volcan de la Soufrière, en Guadeloupe.

PAR LAURE CAILLOCE

Quel point commun y a-t-il entre les muons cosmiques et les volcans ? Aucun, en apparence... L'incroyable pouvoir de pénétration dans la matière de ces particules issues du rayonnement cosmique – il peut aller jusqu'à plusieurs centaines de mètres dans la roche – a pourtant mis la puce à l'oreille des géophysiciens, toujours à l'affût de nouveaux instruments pour ausculter notre planète. « Le muon est le produit de la collision entre une particule cosmique et un atome de gaz dans la haute atmosphère de la Terre, explique Dominique Gibert, spécialiste des méthodes d'imagerie au laboratoire Géosciences<sup>1</sup>. Si l'on connaît le muon depuis les années 1940, c'est un peu par hasard que les physiciens des particules ont découvert son incroyable potentiel énergétique, lorsqu'ils ont commencé à enterrer les accélérateurs de particules pour échapper, croyaient-ils alors, au bombardement cosmique... En pure perte : les muons les plus énergétiques arrivaient quand même à traverser des dizaines de mètres d'épaisseur de sol et de béton ! »

De là à utiliser les muons pour radiographier les volcans, comme on passerait n'importe quel objet aux rayons X... L'idée a germé il y a une dizaine d'années chez le géophysicien français. « La surface de la planète est soumise à une pluie continue de muons – chaque centimètre carré recevant environ un muon par



© A. BRUSTINHEMIS.FR

▼ La Soufrière de Guadeloupe. Son dôme est scanné grâce aux muons, comme notre corps est traversé de rayons X lors d'une radiographie.

minute – et ceux-ci arrivent de toutes les directions, ce qui permet de faire des images sous tous les angles possibles », indique Dominique Gibert. Les premiers télescopes à muons, mis au point avec l'Institut de physique nucléaire de Lyon, ont été installés sur le volcan de la Soufrière en Guadeloupe au début des années 2010. Ils ont aussitôt suscité l'enthousiasme de la communauté des volcanologues.

## Repérer les cavités et les fractures

Car si l'on connaît bien les principes généraux de fonctionnement du volcanisme, les volcans disséminés sur la planète restent de véritables boîtes noires pour les scientifiques, qui rêvent de savoir ce qu'il se passe

à l'intérieur. « Au-delà des montées de magma qui peuvent donner lieu à des coulées de lave, les volcans sont avant tout des systèmes hydrothermaux pouvant emmagasiner une énergie considérable, détaille Dominique Gibert. Ils sont remplis de cavités et de fractures où circulent en continu de l'eau et de la vapeur rendues très acides par les gaz volcaniques provenant de la chambre magmatique. Ce phénomène ronge littéralement les dômes volcaniques de l'intérieur. » À telle enseigne que, pour la plupart des volcans en activité, le risque le plus important n'est pas celui d'une éruption, mais bel et bien celui de l'effondrement d'une partie, voire de la totalité du dôme volcanique.

1. Unité CNRS/Université de Rennes 1.



© D. GIBERT/GÉOSCIENCES RENNES/CNRS PHOTOPIQUE

► Six télescopes à muons ont été installés autour du volcan de la Soufrière. Il faut deux semaines à un télescope pour réaliser une image.

Le grand intérêt de la tomographie muonique est qu'elle renseigne précisément sur la densité des matériaux rencontrés à l'intérieur du volcan et permet aux chercheurs d'en déterminer la nature (roche, liquide, gaz), de repérer les cavités présentes mais aussi les zones moins denses du volcan, où les fragilités sont les plus probables. Attention, on ne parle pas ici de clichés pris quotidiennement : sur le volcan de la Soufrière, large d'environ un kilomètre, il faut deux semaines à un télescope pour réaliser une image ; sur des volcans plus étendus comme l'Etna ou le Vésuve, il faudrait une année avec les détecteurs utilisés actuellement – « *trois mois si l'on augmentait leur surface* », précise Dominique Gibert.

### Plongée dans l'intimité du volcan

Malgré la (relative) rareté des clichés, la tomographie muonique révèle déjà des aspects inattendus de la vie intime des volcans. « *Il y a deux ans, le rejet de fumerolles par la Soufrière a commencé à s'intensifier alors qu'elle portait cinq télescopes à muons sur son flanc sud* », raconte Dominique Gibert qui, pour la toute première fois dans l'histoire de la volcanologie, a pu observer les phénomènes alors qu'ils étaient en train de se produire à l'intérieur du volcan.

« *En l'espace de quelques mois, on a assisté à des changements extrêmement rapides, s'étonne encore le géophysicien. On a vu le volcan devenir moins dense, moins opaque*

*sur les clichés ; des poches de vapeur se sont formées et ont chassé l'eau liquide présente sous le cratère sud.* » Les masses mises en jeu n'ont pas manqué de surprendre les chercheurs : en deux mois, durant l'été 2014, pas moins d'un million de tonnes de fluides se sont déplacées dans le volcan ! Des résultats si probants qu'il est désormais envisagé d'intégrer de façon permanente les télescopes à muons au réseau de surveillance de la Soufrière, afin de prédire les risques d'effondrement et les potentielles éruptions phréatiques – ces explosions liées à une production soudaine de vapeur d'eau dans le volcan.

L'expérience menée à la Soufrière fait en tout cas des envieux autour de la planète. La Nouvelle-Zélande a demandé à s'équiper de télescopes à muons, et les scientifiques du laboratoire Géosciences et de l'Institut de physique nucléaire de Lyon devraient bientôt poser leurs appareils sur la Soufrière de Montserrat, cette île toute proche de la Guadeloupe qu'une éruption a ravagée en 1995, donnant naissance à un nouveau dôme volcanique. Attention, cependant : les télescopes à muons ne permettent pas de détecter la survenue d'éruptions magmatiques. « *Pour déceler la montée de lave dans le volcan, il faudrait placer nos détecteurs sous le volcan, ce qui est évidemment impossible* », explique Dominique Gibert. ▀

## En bref

### APPEL EUROPÉEN

Le 7 mars, les présidents du CNRS et de la Max-Planck-Gesellschaft (Société Max-Planck) ont réuni des présidents et représentants de plusieurs grandes universités européennes, académies de pays de l'Est et organismes de recherche prestigieux, ainsi que de groupes industriels. Ils ont signé un appel commun adressé aux instances politiques, nationales et européennes, pour promouvoir la recherche européenne de haut niveau, « *base de la compétitivité, de la productivité et de la prospérité de l'Europe* ».



» [www.cnrs.fr/fr/pdf/Added\\_Value\\_of\\_Excellence\\_in\\_European\\_Research.pdf](http://www.cnrs.fr/fr/pdf/Added_Value_of_Excellence_in_European_Research.pdf)

### PARTENARIAT

Le 30 mars, le grand prix AEF Recherche et Innovation a été attribué à Pierre Fabre Dermo-Cosmétique pour son partenariat avec l'université Pierre-et-Marie-Curie et le CNRS, consacré depuis plus de 20 ans à la recherche de molécules issues des micro-organismes pour la dermo-cosmétique.

### CULTURE SCIENTIFIQUE

Le 9 mars, a été présentée la « stratégie nationale de culture scientifique, technique et industrielle ». Conçu pour cinq ans et issu d'une large concertation entamée en 2013, ce document propose différents axes de travail et des actions à mener sur tout le territoire.



» [www.enseignementsup-recherche.gouv.fr](http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr)

### HANDICAP

Le Fonds pour l'insertion des personnes handicapées dans la fonction publique (FIPHFP) a renouvelé pour la troisième fois son soutien au CNRS pour sa politique en faveur du handicap, en lui attribuant 5 millions d'euros en accompagnement du nouveau plan d'action 2016-2019.



» <http://handicap.cnrs.fr/>

### RESSOURCES HUMAINES

Le 10 février, le CNRS a reçu de la Commission européenne le label « HR Excellence in Research » pour sa mise en œuvre de la « stratégie européenne des ressources humaines pour les chercheurs » (HRS4R).

# De l'égyptologie aux robots, les sciences humaines innovent

**Événement.** Les 17 et 18 mai, Marseille accueille la troisième édition des Innovatives SHS, salon de la valorisation en sciences humaines et sociales organisé par le CNRS. Soixante-dix équipes de recherche sont attendues pour présenter leurs réalisations, souvent développées avec des partenaires industriels, des collectivités territoriales ou le monde associatif. Gros plan sur trois de ces projets phares.

PAR MARTIN KOPPE

## LES SECRETS DU PATRIMOINE AU BOUT DU SMARTPHONE

Aioli est une plateforme collaborative conçue par le laboratoire MAP<sup>1</sup> et soutenue par la SATT<sup>2</sup> Sud-Est. Elle permet aussi bien de modéliser en 3D des éléments du patrimoine culturel que de partager des informations *in situ*. En suivant un protocole relativement simple, chacun peut prendre une série de photographies d'un bâtiment que la plateforme utilise pour générer automatiquement un modèle en 3D. Des spécialistes peuvent y ajouter des commentaires de manière participative.

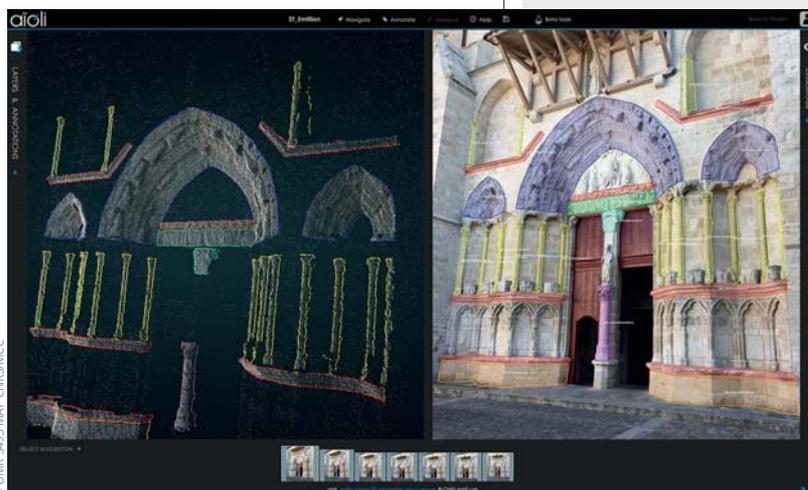
« Aioli fait apparaître aussi bien des termes de vocabulaire de l'architecture que le détail d'une stratigraphie décrite par un archéologue, précise Livio de Luca, directeur du MAP. On peut également mesurer les phénomènes de dégradation grâce aux différentes notes laissées. »

Devant un monument ou n'importe quel objet présent dans la base de données, un touriste, un étudiant ou un chercheur peut prendre une photo avec son smartphone et voir

automatiquement tout une série de calques graphiques et d'informations s'y surimprimer. Chacun participe au passage à l'amélioration du modèle, puisque les photos sont réutilisées pour affiner les représentations en 3D.

« L'idée est de former un écosystème numérique autour du patrimoine culturel, ajoute Livio de Luca. De multiples contributions de diverses disciplines s'y intègrent. La quantité d'informations qui peut être stockée et délivrée en direct est extraordinaire. Cela

permettrait de mieux saisir les tendances sur de vastes territoires et de les insérer dans le contexte local : qu'elles soient stylistiques ou liées aux dégradations. »



▼ L'église collégiale de Saint-Émilion (Gironde), modélisée sur la plateforme Aioli.

© UMR 3465 MAP CNRS/MCC



Retrouvez d'autres projets sur  
 >> [lejournald.cnrs.fr](http://lejournald.cnrs.fr)

1. Modèles et simulations pour l'architecture et le patrimoine (CNRS/Ministère de la Culture et de la Communication). 2. Société d'accélération du transfert de technologies. 3. Archéologie et histoire de la Méditerranée et de l'Égypte ancienne, fédérée autour de l'UMR Archéologie des sociétés méditerranéennes (CNRS/Université Paul-Valéry Montpellier 3/Ministère de la Culture et de la Communication). 4. K pour kinésithérapie. 5. Laboratoire de psychologie : cognition, comportement, communication (Université Rennes 2). 6. Centre mutualiste de rééducation et de réadaptation fonctionnelles. 7. Laboratoire d'intégration de systèmes et des technologies (CEA de Paris-Saclay).

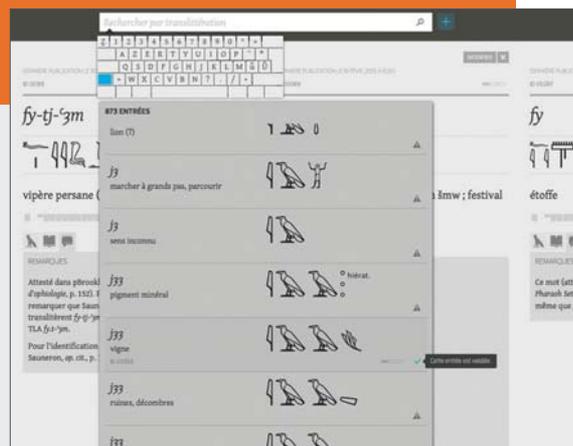
## LA POINTE DE L'ÉGYPTOLOGIE À PORTÉE DU PUBLIC

VÉgA, Vocabulaire de l'égyptien ancien, est une plateforme conçue par le Labex Archimède<sup>3</sup> et l'entreprise Intactile Design. Cette langue antique ayant couvert une période de 3 000 ans, soit davantage que le temps qui sépare le latin classique du langage SMS, on imagine bien que son étude réclame des outils conséquents.

« Le seul vrai dictionnaire global, celui de l'Académie de Berlin, a demandé un travail colossal sur plusieurs décennies », relate Frédéric Servajeau, professeur d'égyptologie à l'université Paul-Valéry de Montpellier et responsable de VÉgA.

Publié au début du xx<sup>e</sup> siècle, ce dictionnaire est devenu obsolète. VÉgA, lui, fonctionne davantage comme un outil collaboratif que comme un dictionnaire : il peut être modifié et augmenté au fil des découvertes. Sa mise en ligne est prévue cette année. VÉgA comprend pour l'instant environ 4 500 mots et atteindra à terme 18 000 entrées. Les traductions, disponibles en français, allemand, anglais et arabe, sont accompagnées de notices et d'une étude lexicographique en français.

« Le public n'a d'habitude pas accès aux parties les plus pointues de l'égyptologie, note Frédéric Servajeau. Lors du salon, nous lui montrerons comment se servir de VÉgA, même avec des connaissances limitées. »



► Chaque notice lexicographique du VÉgA recense les connaissances les plus récentes sur le sujet.

► ROBO-K, testé en salle de rééducation, au CHU de Rennes.

## PRÉPARER L'ARRIVÉE DES ROBOTS

La médecine est aussi l'un des thèmes forts du salon. Dans le projet ROBO-K<sup>4</sup>, des psychologues sociaux, appartenant au LP3C<sup>5</sup>, ont participé à la conception d'un robot mobile dédié à la rééducation de la marche.

Des partenaires aussi bien cliniques que techniques ont également été mobilisés : le CHU de Rennes, le CMRRF<sup>6</sup> de Kerpape, BA Systèmes, le List<sup>7</sup> et InvenSense.

ROBO-K est doté de roues avec des changements de direction en temps réel et d'un système de suspension, qui permet de répartir la part de poids que le patient supporte. Testé durant cinq mois auprès de trente-huit patients et de quatre kinésithérapeutes, il facilite la réalisation d'exercices de rééducation habituels ou plus novateurs, liés à sa grande mobilité.

« Le prototype est perçu comme étant sécurisant et favorisant la progressivité, autant de dimensions qui participent à son acceptation à court et moyen termes », estime Nathalie Pichot, maître de conférences en psychologie sociale à l'IUT de Rennes et membre du LP3C.

Ce succès doit beaucoup à l'orientation des spécifications techniques et fonctionnelles définies selon la perception des usagers potentiels. Les réticences qu'aurait pu causer l'arrivée d'un tel robot sur les plateaux de rééducation ont pu être anticipées dès le début du projet.



© BA SYSTEMES

innovatives

# SHS

innovatives.cnrs.fr

## Salon de la valorisation en sciences humaines et sociales

17 et 18 mai 2017, Marseille

## MATIÈRE

Chimie. Début mars, le Colloque européen sur les véhicules à piles à combustible réunissait chercheurs et industriels à Orléans. L'occasion de faire le point sur cette technologie aux sérieux atouts.

PAR KHEIRA BETTAYEB

La voiture à hydrogène, c'est la promesse de véhicules « zéro émission ». Appelée plus précisément « véhicule électrique à pile à combustible », elle fonctionne à l'électricité. Comme la voiture électrique classique, dont le nom exact est « voiture électrique à batterie ». Mais la grande différence, c'est que dans un véhicule à hydrogène, l'électricité est produite directement à bord, à partir d'hydrogène, par une pile à combustible (PAC).

Ce module, de 10 à 30 litres, est composé de plusieurs cellules comprenant deux électrodes – une anode et une cathode – séparées par une membrane en polymère, qui fait fonction d'électrolyte. Les réactions électrochimiques entre l'hydrogène injecté à l'anode et l'oxygène à la cathode, conduisent à la production d'électricité, de chaleur et d'eau. Au final, le véhicule à PAC ne rejette que de l'eau, ce qui en fait une alternative « propre » aux véhicules diesel et essence. Comme toute voiture électrique.

Mais comparés aux voitures à batterie, les véhicules à PAC présentent plusieurs atouts pratiques. Ainsi, leur rechargement en hydrogène prend aussi peu de temps qu'un plein d'essence : 3 à 5 minutes, contre quelques heures pour recharger une voiture à batterie. Par ailleurs, leur autonomie est similaire à celle d'un véhicule

# Les ambitions de la voiture à hydrogène



© S. DALLEY/THE NEW YORK TIMES/REDAUX/REA

▼ Le temps de rechargement est un des points forts de la voiture à hydrogène: de 3 à 5 minutes.

diesel : un plein d'hydrogène permet de parcourir jusqu'à 600 kilomètres, soit deux à trois fois plus que les voitures à batterie.

## Un début de commercialisation

Quelques modèles de voitures à PAC sont déjà commercialisés : la Toyota Mirai lancée en Europe fin 2015, la Hyundai ix35 vendue depuis 2015, et la Honda Clarity disponible depuis septembre 2016. Par ailleurs, les facteurs d'Audincourt (Doubs) et de Périgny (Jura) distribuent le courrier depuis 2013 au moyen de voiturettes à PAC, développées dans le cadre du projet « MobyPost » par la fédération de recherche CNRS FCLAB<sup>1</sup>. Enfin, Toyota a livré en mars dernier à la municipalité de Tokyo son premier bus à hydrogène.

Toutefois, la commercialisation à grande échelle des véhicules à PAC se heurte encore à plusieurs obstacles rédhibitoires, notamment leur coût qui reste élevé. Par exemple, il faut compter pas moins de 79 200 euros pour s'offrir la Mirai, quand les Français dépensent en moyenne 25 000 euros pour une voiture neuve. De plus, la durée de vie moyenne de ces piles à combustible ne dépasse pas 4 100 heures – ce qui permet néanmoins de parcourir plus de 150 000 km.

Pour égaler l'espérance de vie d'un moteur diesel (300 000 kilomètres), les véhicules à PAC devraient fonctionner 7 000 heures sans dégradation. Autre hic : l'hydrogène est à l'heure actuelle très majoritairement obtenu à partir de ressources fossiles

1. Fuel Cell Lab : Vers des systèmes à pile à combustible efficaces - [www.fclab.fr](http://www.fclab.fr) 2. Du Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés (Unité CNRS/Université d'Orléans). 3. De l'Institut de chimie moléculaire et des matériaux - Institut Charles-Gerhardt Montpellier (Unité CNRS/Université de Montpellier/ENSC Montpellier).

comme le charbon ou le gaz. Enfin, il n'existe pour l'instant en France qu'une quinzaine de stations permettant le remplissage en hydrogène.

### Rendre l'hydrogène compétitif

Cependant, la recherche n'a pas dit son dernier mot. Et à ce jour, plusieurs centaines d'équipes dans le monde – notamment au Japon, aux États-Unis et en Europe –, travaillent à rendre la technologie PAC plus compétitive. « Cette recherche est l'une des plus actives au monde », commente le physicien Pascal Brault<sup>2</sup>, organisateur du colloque qui a réuni, du 1<sup>er</sup> au 3 mars 2017 à Orléans, 80 chercheurs européens et plusieurs représentants de grands industriels : Toyota, BMW, Volkswagen, Audi, Daimler...

Dans l'Hexagone, ce champ de recherche mobilise pas moins de 77 équipes du CNRS et des universités, 30 équipes issues du CEA ou des industriels, toutes rassemblées au sein d'un groupement de recherche CNRS baptisé « HySPaC ». Il bénéficie par ailleurs d'un soutien important de l'Union européenne. Ainsi, pour la période 2014-2020, il s'est vu attribuer pas moins de 665 millions d'euros par l'agence européenne FCH-JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking). Parmi les objectifs fixés par l'agence : faire passer le prix des véhicules à PAC, de plus de 70 000 euros actuellement, à 50 000 euros en 2020, puis à 30 000 euros en 2023 ; et augmenter leur durée de vie, de 4 000 heures à 6 000 heures en 2020, puis à 7 000 heures en 2023.

Pour réduire le coût, une des solutions consiste à se passer de certains composants utilisés actuellement dans les PAC, dont le prix s'avère très élevé. C'est notamment le cas du platine, un métal noble utilisé comme catalyseur pour accélérer la réaction chimique survenant dans la PAC. « Cet élément est quasiment aussi cher que l'or : il revient à 30,50 euros le gramme, contre 30,70 euros pour

*l'or. De plus, c'est un métal rare et stratégique : les ressources sont essentiellement localisées en Afrique du Sud et en Russie »,* précise la chimiste Deborah Jones<sup>3</sup>, coorganisatrice du colloque d'Orléans.

Plusieurs équipes au CNRS et dans le monde s'attachent ainsi à diminuer la quantité de platine utilisée dans les PAC ou même à le remplacer totalement par des catalyseurs efficaces sans métaux nobles, en particulier à base de fer, un élément près de deux cent fois moins cher.

“La recherche sur les véhicules à hydrogène est l'une des plus actives au monde.”



© S. BOZONWAP

Mais il n'y a pas que le platine : le prix élevé des véhicules à PAC actuels s'explique également par le fait que les composants des piles sont encore fabriqués en petite quantité. Une production plus importante, via des méthodes automatisées, permettrait des économies d'échelle, avec une réduction significative du prix à l'unité.

### Vers une filière européenne ?

C'est justement l'objectif de l'ambitieux projet européen « Volumetriq », coordonné par Deborah Jones.

▼ Depuis 2013, les facteurs d'Audincourt (Doubs) roulent en voitures à PAC mises au point par le FCLAB.

Celui-ci vise à développer une filière européenne pour la fabrication de tous les éléments d'une PAC (membranes, électrodes, assemblages membrane-électrodes...), ainsi que leur production par des procédés optimisés. « Lancé en 2015 et doté d'un financement de 5 millions d'euros, ce projet implique de nombreux fabricants de composants, et le constructeur automobile BMW », détaille la chercheuse montpelliéraine.

Reste l'autre grand obstacle actuel au développement de cette filière hydrogène : la durée de vie limitée des piles. « Elle est notamment due à deux facteurs liés au fonctionnement même de la PAC : l'alternance des cycles d'hydratation et de déshydratation, qui nuit à la stabilité mécanique de la membrane ; ensuite, la production d'éléments chimiques appelés radicaux libres, qui altèrent sa stabilité », explique Deborah Jones. La solution consiste ici à introduire des renforts mécaniques et à incorporer des éléments chimiques pour piéger les radicaux libres.

Enfin, un enjeu important de la recherche sur les voitures à PAC concerne le développement de techniques de production de l'hydrogène « propres » et économiquement viables. Il est en effet possible d'obtenir l'hydrogène sans gaz naturel : par « électrolyse » d'eau via l'électricité « verte » produite par éoliennes ou panneaux solaires. Or pour l'instant, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau revient 30 % à 65 % plus cher que celle à partir de gaz naturel. Pour corriger ce problème, les chercheurs doivent parvenir à optimiser le rendement des systèmes électrolyseurs et de stockage de l'hydrogène. Ce à quoi s'attendent, par exemple, Daniel Hissel et ses collègues du FCLAB à Belfort.

On l'aura compris, la recherche sur la voiture à hydrogène est en pleine effervescence, et selon les chercheurs, plus d'une centaine de milliers de véhicules à PAC devraient rouler dans le monde en 2025. ||

# L'extraordinaire sens de l'orientation des fourmis

PAR FUI LEE LUK

## VIVANT

**Éthologie.** Qu'elles se déplacent en avant, à reculons ou de côté, les fourmis ont une étonnante aptitude à s'orienter. Une étude récente nous permet de mieux comprendre comment certaines espèces allient perception visuelle et capacités de mémorisation pour retrouver leur chemin.

Comment s'oriente un être dont la taille se compte en millimètres et dont les yeux rasant le sol ? Les scientifiques ont longtemps été intrigués par la capacité des fourmis à retrouver leur chemin après s'être éloignées de dizaines de mètres de la fourmilière. D'après une étude récente<sup>1</sup> menée par des entomologistes spécialisés en neurosciences, des informaticiens et des éthologues du Canada, d'Australie, du Royaume-Uni et de France, certaines espèces s'orienteraient en alliant perception visuelle et capacités de mémorisation de façon bien plus poussée que nous le pensions jusqu'à présent. Les chercheurs ont également montré, en observant des fourmis du désert espagnoles se déplaçant de diverses façons (vers l'avant, à reculons ou de côté), que leur sens de l'orientation n'était pas influencé par la position de leur corps, ce qui suggère des capacités de traitement de l'information surprenantes pour un si petit cerveau.

### Une excellente mémoire visuelle

S'il existe plus de 12 000 espèces de fourmis aujourd'hui, c'est notamment grâce à la diversité de leurs stratagèmes de survie, qui leur a permis de coloniser tous les continents, excepté l'Antarctique. Cette diversité s'observe par exemple dans les stratégies employées pour retourner à la fourmilière après avoir trouvé de la nourriture.

Certaines fourmis laissent une trace de leur passage sous forme de phéromones. D'autres, telle la *Cataglyphis velox*, une fourmi du désert andalou, font appel à la vision offerte par la multitude de lentilles interconnectées composant leurs yeux à facettes et la combinent à une impressionnante capacité à mémoriser les images perçues durant un trajet. Jusqu'à présent, les scientifiques



considéraient que les fourmis s'orientaient en faisant correspondre les éléments présents dans leur champ de vision avec ceux qu'elles avaient mémorisés de façon égocentrée, c'est-à-dire en faisant face au chemin. Or, ces fourmis se sont montrées capables de retourner à la fourmilière en se déplaçant à reculons.

Des expériences ont été menées par les chercheurs dans la région de Séville, en Espagne, auprès de fourmis du désert. « Ces fourmis partent à la recherche de nourriture en été, alors que la température du sol peut atteindre 70 °C, relate Antoine Wystrach, éthologue spécialisé en neurosciences du Centre de recherches sur la cognition animale<sup>2</sup>. Avec une telle chaleur, les cadavres d'arthropodes grillés par le soleil – leur principale nourriture – peuvent être trouvés un peu partout, aussi se

1. « How ants use vision when homing backward », S. Schwarz, M. Mangan, J. Zeil, B. Webb et A. Wystrach, *Current Biology*, 2017, vol. 27 : 1-7. 2. Unité CNRS/Université Paul-Sabatier.



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

dispersent-elles pour mener leurs recherches individuellement plutôt que de se rendre en groupe aux mêmes endroits. » Une telle stratégie explique l'aptitude de cette espèce à s'orienter lorsqu'elle est seule, et donne aux chercheurs l'opportunité de comprendre comment chaque individu fait pour retrouver son chemin.

Dans le cadre de leur première expérience, ils ont placé

des barrières autour d'une fourmilière pour guider les fourmis chercheuses de nourriture le long d'un trajet précis, en échange de morceaux de cookie. Une fois les fourmis familiarisées avec l'itinéraire, les scientifiques les ont relâchées sur un tronçon de la route nécessitant d'accomplir un virage à 90° pour retourner à la fourmilière. Les individus ayant reçu un morceau de cookie assez léger pour être porté en marche avant ont été capables de retrouver leur chemin sans problème, tournant au moment où ils le devaient. Par contre, les fourmis transportant des morceaux plus lourds, et donc forcées de traîner leur butin en marche arrière, ont continué tout droit et ignoré le virage, ce qui indique que les images perçues dans cette position ne trouvaient pas écho dans leurs souvenirs. « Ce résultat est venu renforcer la thèse selon laquelle une fourmi se souvient de la scène visuelle selon une perspective égocentrée, explique l'éthologue. Mais une question persistait : comment faisaient les fourmis pour s'orienter en marche arrière ? »



© A. WYSTRACH/CNRS

► Cette fourmi du désert (*Melophorus Bagoti*) rentre seule au nid en transportant sa nourriture.

### Un sens « versatile »

Une réponse est apparue durant l'expérience. Faisant preuve d'une intelligence surprenante, certaines fourmis qui marchaient à reculons ont lâché leur charge et se sont tournées pour observer la route dans l'autre sens, preuve qu'elles faisaient appel à leurs souvenirs égocentrés de l'itinéraire. Ensuite, elles se sont retournées pour récupérer leur butin et se remettre en marche, cette fois dans la bonne direction. Ce comportement implique l'imbrication d'au moins trois types de mémoires : les mémoires visuelles de la route, la mémoire de la nouvelle direction à suivre et celle de l'existence du cookie laissé derrière. C'est la preuve « d'une impressionnante capacité à coordonner plusieurs informations », clé permettant aux fourmis de développer un sens de l'orientation « aussi versatile ».

Les chercheurs ont également été surpris de constater qu'en marche arrière, les fourmis empruntaient une

trajectoire rectiligne. « En général, les fourmis qui marchent à reculons coordonnent leurs six pattes d'une façon assez chaotique, note Antoine Wystrach, aussi étions-nous certains qu'elles se servaient d'un repère externe pour maintenir une trajectoire rectiligne. » Les chercheurs ont alors procédé à une deuxième expérience : ils se sont servis d'un miroir pour montrer à ces fourmis un reflet du soleil. L'illusion du soleil apparaissant de l'autre côté du ciel a eu un impact sensible sur leur comportement : « Les fourmis ont changé de direction, raconte le chercheur, ce qui nous a confirmé que la position du soleil jouait un rôle déterminant sur leur capacité à maintenir un même cap lorsqu'elles ne peuvent s'aligner vers l'avant pour reconnaître la route. »

### Un système nerveux complexe

« Les recherches menées jusqu'à maintenant suggèrent que le déplacement des fourmis est lié à l'orientation de leur corps, précise l'éthologue. Mais nos observations tendent à prouver le contraire : les fourmis sont capables de se déplacer dans une certaine direction tout en étant tournées vers un axe différent. Cette dissociation implique que leur représentation des directions n'est pas centrée sur leur propre corps mais sur le monde extérieur : un système particulièrement flexible puisqu'il leur permet de tenir compte d'une grande variété d'informations. »

Cette étude met en évidence la grande complexité du système nerveux des insectes. « Imaginez un peu le degré de coordination motrice nécessaire pour marcher de côté en ligne droite ! » s'enthousiasme Antoine Wystrach. De plus, le comportement des fourmis prouve l'existence « d'une synergie inattendue entre plusieurs parties de leur cerveau ». Par exemple, quand une fourmi regarde vers l'avant pour vérifier sa position avant de continuer en marche arrière, cela implique « un transfert d'informations » entre les corps pédonculés (la partie du cerveau responsable chez l'insecte du stockage des souvenirs visuels) et le complexe central (qui lui permet d'appréhender la position du soleil). Le but à long terme des chercheurs est de « déterminer dans quelle mesure ces deux parties du cerveau travaillent ensemble » et permettent aux fourmis de retrouver leur chemin.

Mais dans l'immédiat, les scientifiques ont des projets moins ambitieux. « Quand une fourmi qui marche à reculons lâche son morceau de cookie pour se retourner et vérifier sa position, elle se souvient de l'endroit où elle doit ensuite le récupérer, indique Antoine Wystrach. Mais à quel point se souvient-elle vraiment du cookie ? Comment réagirait-elle si nous remplacions un gros morceau de cookie par un plus petit ? » Ce nouveau test permettra aux scientifiques d'évaluer avec quelle précision les fourmis mémorisent les informations du monde qui les entoure. ||

# Comment se préparer à une crue de la Seine ?

PROPOS RECUEILLIS PAR BRUNO CAÏETTI

SOCIÉTÉS



TERRE



**Gestion de crise.** Peu avant la crue de la Seine de juin 2016, un exercice de grande ampleur, « EU Sequana », avait lieu en Île-de-France pour se préparer à une prochaine « crue du siècle ». Une équipe de chercheurs était présente, parmi lesquels Valérie November<sup>1</sup>, qui publie un ouvrage sur cette expérience exceptionnelle.

## Pouvez-vous nous présenter « EU Sequana » ?

**Valérie November :** Il s'agit d'un exercice de gestion de crise, simulant une crue majeure en Île-de-France, organisé du 7 au 18 mars 2016 par le Secrétariat général de la zone de défense et de sécurité de Paris (SGZDS). Il a réuni 87 opérateurs publics et privés. Quatre pays européens (Belgique, Espagne, Italie et République tchèque) ont participé à l'exercice et une trentaine de pays étaient observateurs. En effet, la zone de défense a proposé l'exercice à l'Union européenne dans le cadre du déclenchement du Mécanisme européen de protection civile.



© S. JAMBERT/HAVTHANAREA

## Comment s'est déroulé concrètement cet exercice ?

**V. N. :** Il s'est joué dans les salles de gestion de crise des partenaires mobilisés. Les acteurs devaient faire face à la crise, en temps réel, et réagir à des « surprises », des événements inattendus impulsés régulièrement au cours de la journée par les animateurs. Le scénario de l'exercice a en effet été écrit, puis animé, par le SGZDS et l'Institut national des hautes études de la sécurité et de la justice (INHESJ). La première semaine a été consacrée à la montée des eaux et la seconde à la décrue, ce qui est une vraie nouveauté.

## Comment votre équipe a-t-elle pu observer l'exercice au plus près ?

**V. N. :** Le programme de recherche

▼ Cinq pays européens ont participé à l'exercice (ici, la protection civile espagnole, sur le bassin de la Villette à Paris).

Euridice<sup>2</sup>, que je dirige, s'intéresse aux risques et à la gestion de crise et pratique la recherche-action, ou recherche embarquée. En 2015, le préfet, secrétaire général de la zone de défense et de sécurité de Paris, a souhaité accueillir des chercheurs pour avoir un regard extérieur sur la gestion de crise, dans la perspective d'un calendrier parisien chargé : la COP21 fin 2015, EU Sequana en mars 2016 puis l'Euro de football en été. Nous venions juste de commencer la recherche lorsque les attentats du 13 novembre 2015 se sont produits. Malgré ces circonstances dramatiques, la préfecture a tenu ses engagements de nous ouvrir ses portes et nous nous sommes retrouvés plongés au cœur de l'action. Nous avons été habilités « confidentiel défense ».

## Quels types de données avez-vous pu recueillir ?

**V. N. :** Nous savions que l'exercice attirait l'attention de nombreux chercheurs, aussi avons-nous lancé un appel à ceux qui voulaient observer avec nous. Nous avons constitué une équipe d'une quarantaine de chercheurs (géographes, sociologues, ingénieurs, chercheurs en science de la gestion) issus d'institutions diverses : ENS, Dauphine, la Sorbonne, l'École des ponts, Sciences Po, ou encore les Mines d'Alès et jusqu'à des observateurs venant de Norvège et d'Angleterre. Cela nous a permis d'être présents sur tous les sites, en observant chaque jour 5 à 12 salles de gestion de crise simultanément. Cela représente une base de données considérable !

## Quels sont les principaux enseignements de l'exercice ?

**V. N. :** Cela a été un moment de

1. Directrice du Laboratoire techniques, territoires, sociétés (CNRS/École des ponts ParisTech/Univ. Paris-Est). 2. Équipe de recherche sur les risques, dispositifs de gestion de crise et des événements majeurs - <https://euridice.hypotheses.org> 3. Un documentaire d'Éric Beauducel sur la crue de juin 2016, *Journal d'une crue*, sera diffusé en juin sur les chaînes RMC Découvertes et Science et Vie.



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

partage où les acteurs ont réalisé à quel point ils étaient interdépendants. Un exemple : la RATP doit fermer des stations pour préserver ses infrastructures mais, dans le même temps, la préfecture appelle à ne plus circuler en voiture, ce qui soulève des questions : faut-il faire venir les travailleurs en ville ou les laisser à l'extérieur pour éviter davantage de congestion ? Ils ont aussi réalisé qu'il y a des actions urgentes et d'autres qui peuvent attendre. Par exemple, si un hôpital possède un générateur d'une durée de 12 heures, il n'est pas nécessaire de l'évacuer tout de suite.

La connaissance du fonctionnement de chaque infrastructure est primordiale. Beaucoup de travail a été fait également sur la façon de communiquer avec les citoyens : à travers le « point information » mis en place sur le Champ-de-Mars, le week-end des 12 et 13 mars, mais aussi par la mise en ligne de vidéos montrant des simulations en 3D de la montée des eaux. La chaîne France 3 a même enregistré de faux journaux télévisés. Le but était de faire prendre conscience aux Franciliens de la réalité du risque d'une inondation.

Enfin, la participation de partenaires comme les hôpitaux, les services pénitentiaires ou les services sociaux a permis d'analyser des problématiques de maintien d'activité, d'évacuation, d'approvisionnement, etc. Le fonctionnement urbain est un équilibre fragile. Dès lors qu'il n'y a plus d'électricité, toute une série de services ne sont plus disponibles. De même, des problèmes nouveaux apparaissent si l'évacuation des déchets n'est plus assurée.

**Quelques semaines après EU Sequana, l'Île-de-France a connu une vraie crue de la Seine<sup>3</sup> : la réponse apportée a-t-elle bénéficié de l'exercice ?**

**V. N. :** Cela a énormément aidé. Nous étions présents en salle de crise durant tout l'événement. L'exercice a contribué à ce que les acteurs se

rencontrent ou se connaissent mieux. Les participants avaient aussi étudié le séquençage de la réponse à la crue et cela leur a permis d'être réactifs au bon moment. Ils ont cependant été surpris par la vitesse de la montée des eaux. Aucune catastrophe ne ressemble à une autre. Un bon gestionnaire de crise doit pouvoir s'adapter à tout instant à une situation mouvante et imprévue.

**Un an après EU Sequana, vous publiez un ouvrage atypique, codirigé avec Laurence Créton-Cazanave...**

**V. N. :** Un des axes de recherche du projet Euridice est la capitalisation des connaissances. Très peu d'ouvrages ont été écrits sur les exercices et, de surcroît, nous avons choisi une écriture croisée chercheurs-opérationnels. L'ouvrage est également original du point de vue de sa structure, car on peut le lire de façon chronologique ou thématique.

**Vous posez la question dans le livre : est-ce que l'exercice fera date ? Préfigure-t-il une nouvelle façon de se préparer à la gestion de crise ?**

**V. N. :** J'espère que ce ne sera pas une expérience unique, mais cet exercice a demandé tellement de préparation qu'il ne peut pas être reproduit facilement. Le financement, ici européen, n'est pas aisé à collecter. Une simulation de cette ampleur, avec ces moyens et autant de participants, c'est très rare. D'où l'intérêt d'en tirer les enseignements les plus complets possible. **II**



*La gestion de crise à l'épreuve de l'exercice EU Sequana,*  
Valérie November  
et Laurence  
Créton-Cazanave (dir.),  
La Documentation  
Française, mars 2017,  
237 p., 15 €

## En bref

### START-UP

Le 17 mars, la start-up Biopic s'est vu décerner le prix coup de cœur Start-up Connexion 2017 lors de ce concours organisé par le CNRS et le Groupe AEF (*lire* CNRS Le journal, n° 286, p. 50-51). Elle remporte ainsi une dotation de 5 000 euros et un accompagnement personnalisé en propriété industrielle, alloués par le cabinet de conseil en propriété intellectuelle Plasseraud.

### INNOVATION

Fin mars, l'Institut national de la propriété industrielle (Inpi) a dévoilé le palmarès 2016 des plus gros déposants de brevets en France. Avec 373 demandes de brevet, le CNRS reste à la 6<sup>e</sup> place de ce classement, dominé cette année par l'équipementier automobile Valeo.

Par ailleurs, l'organisme se situe au 8<sup>e</sup> rang du classement des 25 institutions de recherche mondiales les plus innovantes, publié le 1<sup>er</sup> mars par Reuters-Clarivate. Le CEA occupe la seconde place, derrière le HHS (Département de la santé et des services sociaux des États-Unis).

### UN INSTITUT SUR LES MIGRATIONS

Dans l'élan des appels à projets « Instituts Convergences » lancés pour fédérer la recherche autour de sujets émergents ou prioritaires, le CNRS et l'Inserm ont initié le grand projet Migrations en s'associant à l'Ined, l'IRD, l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, l'EHESS et l'EPHE. Dirigé par François Héran, directeur de recherche à l'Ined, ce projet bénéficiera d'un budget de 13,6 millions d'euros cumulés sur 10 ans, et s'installera sur le futur campus Condorcet. Une coopération interdisciplinaire à même de coordonner les recherches et de former spécifiquement de futurs chercheurs sur ce phénomène contemporain majeur.



>> <http://cnrsinfo.cnrs.fr/intranet/actus/170420-convergences.html>

### ACCUEILLIR LES CHERCHEURS EXILÉS

Début 2017 a été lancé le Programme d'aide à l'accueil en urgence des scientifiques en exil (PAUSE). Géré par le Collège de France, ce programme – dont le CNRS est partenaire – accorde des subventions aux établissements publics d'enseignement supérieur et de recherche s'engageant à accueillir et à soutenir des scientifiques étrangers en situation d'urgence.



# Ce système de sept planètes pourrait être habitable

UNIVERS

**Astronomie.** Une équipe internationale a mis au jour un système de sept planètes de la taille de la Terre, dont plusieurs semblent potentiellement habitables. Les résultats de cette étude ont été publiés le 23 février dernier dans *Nature*<sup>1</sup>.

PAR JULIEN BOURDET

Jamais, auparavant, un système exoplanétaire n'avait suscité autant d'enthousiasme de la part des astronomes. Car parmi les sept planètes, toutes quasiment de la taille de la Terre et probablement rocheuses comme elle, qui ont été détectées par une équipe internationale autour d'une étoile relativement proche de nous (à 40 années-lumière), plusieurs réunissent les conditions pour abriter de l'eau liquide. De quoi faire de ce système une des cibles les plus prometteuses à ce jour dans la recherche à distance de traces de vie hors du système solaire.

## Trappist-1, une étoile naine ultrafroide

Les sept planètes orbitent autour d'une étoile bien particulière : une naine ultrafroide. Beaucoup plus petits et bien moins chauds que le Soleil, ces astres sont habituellement délaissés dans la recherche d'exoplanètes car ils sont peu lumineux et donc peu visibles. Mais après cinq ans passés à scruter une soixantaine de ces petites étoiles, le télescope belge Trappist, installé au Chili, a déniché la perle rare : l'étoile baptisée Trappist-1, d'une taille équivalente à seulement 12 % de celle du Soleil, et n'émettant que 0,05 % de sa luminosité.

En observant la lumière infrarouge émise par la minuscule étoile, les chercheurs menés par Michaël Gillon, de l'université de Liège, en Belgique, ont détecté des baisses de luminosité caractéristiques du passage de corps célestes devant celle-ci – ou transit. Dès 2015, trois premières planètes (numérotées b, c et d) sont alors mises en évidence. Puis un suivi systématique de l'étoile par le télescope Trappist et le télescope spatial Spitzer permet ensuite d'en révéler quatre autres (e, f, g et h) en 2016. De la périodicité des transits et de l'intensité des baisses de luminosité de l'étoile, ils ont pu alors déduire que ces sept planètes sont toutes de taille comparable à celle de la Terre (à 15 % près), et tournent très près de leur étoile. Les six planètes les plus proches en font ainsi

1. « Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1 », M. Gillon et al., *Nature*, 2017, vol. 542 : 456-460. 2. Unité CNRS/Univ. de Bordeaux.



© NASA/JPL, EPLÉ

“Jamais un système exoplanétaire n'avait suscité autant d'enthousiasme de la part des astronomes.”

► Vue d'artiste des sept planètes du système Trappist-1, ordonnées selon leur distance croissante à l'étoile hôte.

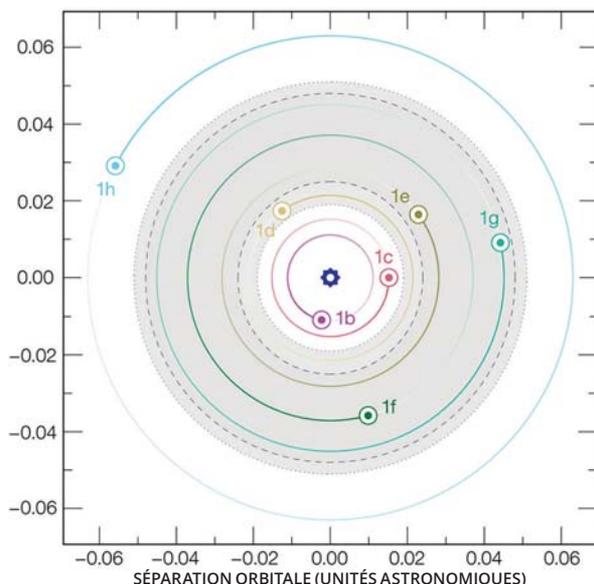
le tour en respectivement 1,5 jour, 2,4 jours, 4, 6, 9 et 12 jours. Quant à la septième, sa période n'a pas pu encore être déterminée.

### À la recherche de l'eau

À quoi ressemblent ces mondes ? Et sont-ils éventuellement propices à héberger la vie ? S'il est impossible aujourd'hui de répondre avec certitude à ces questions – aucune de ces planètes n'ayant pu être photographiée –, les astronomes disposent toutefois de suffisamment d'informations pour commencer à en dresser un premier portrait. Tout d'abord, en raison de leur taille, les sept planètes ont toutes les chances d'être rocheuses

comme la Terre. Il ne s'agit donc pas de ces géantes gazeuses où toute forme de vie semble impossible.

Ensuite, étant donné la distance des planètes à leur étoile et la luminosité émise par l'astre, les astronomes ont pu estimer l'énergie qu'elles reçoivent. Conclusion : « Trois d'entre elles (e, f et g) sont situées dans la zone dite "habitable" de leur étoile, cette région où il ne fait ni trop froid ni trop chaud pour permettre à l'eau, si elle est présente à leur surface, de rester sous forme liquide »,



► Orbites des sept planètes avec leurs tailles relatives. La partie grisée représente l'extension de la zone habitable.

précise Franck Selsis, un des auteurs de la découverte au Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux<sup>2</sup>. Un élément indispensable au développement de la vie.

La configuration particulière de ces planètes donne d'ailleurs aux scientifiques de bonnes raisons d'espérer que l'eau soit bien présente à leur surface. Leurs orbites sont en effet en résonance les unes avec les autres : lorsque la planète g, par exemple, accomplit une orbite autour de Trappist-1, les planètes plus proches de l'étoile en accomplissent 6 (pour la planète b), 5 (c), 3 (d) et 2 (e). « Or, ces résonances seraient le résultat d'une migration collective des planètes vers l'étoile peu de temps après leur formation, explique Franck Selsis. Celles-ci seraient donc nées plus loin qu'elles ne le sont actuellement. Et à plus grande distance de l'étoile, l'eau, plus abondante, aurait pu ainsi entrer en proportion importante dans leur composition. »

Autre indice de la présence possible d'eau : la masse des planètes, estimée là encore grâce à la configuration atypique des sept objets. Parce que ces derniers sont à la fois très proches les uns des autres et en résonance, leurs interactions gravitationnelles font que les transits ne se succèdent pas de façon parfaitement périodique mais se produisent avec des avances ou des retards, parfois de plus d'une heure. C'est ce phénomène qui a permis d'évaluer la masse des planètes et donc, connaissant par ailleurs leur taille, leur densité. Résultat : les données actuelles semblent indiquer que les planètes de Trappist-1

sont peu denses, et donc riches en eau. « Mais ces mesures ne sont pas encore assez précises, d'autres observations seront nécessaires pour pouvoir arriver à une conclusion définitive », tempère Franck Selsis.

### Des planètes aux situations extrêmes

En attendant, les astronomes explorent tous les scénarios climatiques possibles pour le cortège de planètes, en fonction de la quantité d'eau présente à leur ...

*“Il est plus facile de voir une planète passer devant une toute petite étoile que devant un énorme soleil.”*

... surface ainsi que de la taille et de la composition de leur atmosphère. À cela, les scientifiques doivent ajouter un autre élément clé : étant donné la proximité des planètes à leur étoile, les effets de marée gravitationnelle de l'étoile ont très probablement « bloqué » ces planètes, dont la rotation est désormais égale à la révolution autour de Trappist-1. Du coup, celles-ci présentent perpétuellement la même face à leur étoile. Du côté tourné vers l'étoile, il fait jour en permanence et du côté opposé, il fait toujours nuit.

Le résultat de ces modèles donne des cas extrêmes, même pour les planètes évoluant dans la zone habitable de Trappist-1. On peut ainsi avoir des planètes totalement sèches comme Vénus. Mais dans de nombreux cas, dès qu'il y a une atmosphère, l'eau se retrouve fréquemment à l'état liquide en surface. Certains de ces mondes virtuels semblent exotiques, avec un hémisphère diurne totalement aride et un hémisphère nocturne couvert d'une banquise et d'une mer. Parfois, même, un océan recouvre toute la planète, avec une banquise partielle ou sans la moindre présence de glace.

Quant aux planètes qui ne se trouvent pas dans la zone habitable, il est néanmoins possible qu'elles contiennent de l'eau elles aussi. Les deux planètes les

plus proches (b et c), par exemple, reçoivent de leur étoile respectivement quatre et deux fois plus d'énergie que la Terre n'en reçoit du Soleil. Côté jour, ce doit être la fournaise. Côté nuit, le froid sidéral. Mais au terminator – ces régions se trouvant au crépuscule et à l'aube éternels de ces planètes –, les températures pourraient être suffisamment clémentes pour que de l'eau s'y trouve à l'état liquide.

### D'autres découvertes en perspective

Bien qu'aucun de ces scénarios ne puisse aujourd'hui être privilégié, ils constituent des prédictions qui pourront être confrontées aux observations futures. Certes, aucune de ces planètes ne pourra être photographiée directement au télescope avant longtemps, car elles sont trop proches de leur étoile. En revanche, les astronomes pourront bientôt, grâce notamment au télescope spatial de la Nasa James-Webb (qui doit être lancé en 2018), détecter les éventuelles atmosphères de ces astres, vérifier s'ils contiennent de l'eau et déterminer leur température. Et ainsi trancher sur leur habitabilité.

Avec la planète située autour de Proxima, découverte en août 2016, les planètes de Trappist-1 constituent aujourd'hui les seules exoplanètes rocheuses dont on va pouvoir caractériser les atmosphères. Et par là même les cibles les plus prometteuses dans la recherche de vie ailleurs dans l'Univers. *« L'étude des naines ultrafroides présente un double intérêt, estime Franck Selsis. D'abord il est plus facile de voir une planète passer devant une toute petite étoile que devant un énorme soleil. Ensuite ce flux lumineux plus faible émis par l'étoile permet d'analyser plus facilement la lumière qui traverse l'atmosphère de ces planètes et donc d'en déduire la composition. »* Quand on sait que 15 % des étoiles proches du Soleil sont des étoiles naines ultrafroides, on peut s'attendre à bien d'autres découvertes encore dans le futur. Avec peut-être, parmi elles, des jumelles de la Terre. ▀



▀ Le petit télescope Trappist, installé au Chili, est à l'origine des premières découvertes du système Trappist-1.

# LES IDÉES



*On embarque avec des pirates,  
on s'interroge sur le danger  
des algorithmes et on se passionne  
pour les langues sifflées.*

ILLUSTRATION : VICTORIA ROUSSEL POUR CNRS LE JOURNAL



# Mais qui sont vraiment les pirates ?

► La capture du pirate Barbe-Noire en 1718 (peinture du XIX<sup>e</sup> siècle).

## SOCIÉTÉS

**Histoire.** Loin de l'image romantique construite par la littérature et le cinéma, les pirates et les corsaires – avec lesquels on les confond trop souvent –

dévoilent une réalité bien plus complexe. Gilbert Buti et Philippe Hrodej, spécialistes d'histoire maritime, tordent le cou à quelques clichés.



Gilbert Buti

Philippe Hrodej

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURE CAILLOCE

### Depuis quand y a-t-il des pirates ?

**Philippe Hrodej :** Les pirates existent depuis que la navigation existe. La piraterie n'est ni plus ni moins que du brigandage des mers, qui s'attaque aux navires de commerce, sans distinction de nationalité, même si certains pirates ont parfois des scrupules à piller leurs compatriotes... Dès l'Antiquité, en Méditerranée, de petites galères à voile rapides s'en prenaient aux navires marchands, et les Romains n'avaient de cesse de les traquer, déjà. Certaines zones sont d'ailleurs des zones

endémiques de la piraterie : les Cyclades en mer Égée, l'Adriatique ou encore la mer Noire. Tout ce qui peut se monnayer intéresse le pirate : le bateau en lui-même, sa cargaison, les armes qu'il transporte, mais aussi l'équipage qu'il peut enrôler de force ou rançonner...

### Qu'est-ce qui distingue le pirate du corsaire ?

**Gilbert Buti :** Un pirate travaille pour son compte, et ne partage son butin avec personne si ce n'est son propre équipage. Un corsaire opère surtout en temps de guerre et sert les intérêts de son pays en s'attaquant aux ennemis de celui-ci. Il agit avec l'autorisation de son État. Lorsqu'il y a capture, le corsaire doit ramener le bateau pris dans un port ami, où la cargaison fait l'objet d'un inventaire en bonne et due forme et où les capitaines des deux navires ainsi que des membres d'équipage sont auditionnés pour connaître les conditions de la capture. En France, dès le XVII<sup>e</sup> siècle, ces documents sont envoyés au Conseil des prises, qui décide s'il s'agit d'une « bonne prise » ou d'une « mauvaise prise », faite sur un État allié ou neutre... Dans le cas d'une bonne prise, le navire et sa marchandise sont vendus aux enchères, et le produit de ces ventes est réparti entre le roi, qui en récupère 10 %, les veuves de marins et œuvres diverses, et enfin l'équipage et l'armateur du bateau qui se partagent les 80 % restants. Il faut ajouter que pirates et corsaires ne bénéficient pas du même statut

1. Chercheur au Centre de recherches historiques de l'Ouest (CNRS/Univ. de Rennes 2/Univ. du Maine/Univ. de Bretagne Sud/Univ. d'Angers).

2. Chercheur au laboratoire TELEME, Temps, espaces, langages, Europe Méridionale - Méditerranée (CNRS/Univ. Aix-Marseille).



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

juridique s'ils se font prendre. Le pirate est généralement exécuté après un procès rondement mené, le corsaire est, lui, considéré comme un prisonnier de guerre et, à ce titre, peut être échangé.

### **Vous le disiez : la piraterie est aussi vieille que la navigation... Qu'en est-il des corsaires ?**

**G. B. :** La course commence à s'institutionnaliser autour du xv<sup>e</sup> siècle et se précise au xvi<sup>e</sup> siècle. On connaît tous le nom de Francis Drake, qui a beaucoup fait pour le règne de la reine Élisabeth I<sup>re</sup> d'Angleterre en la dispensant de passer par le Parlement pour lever l'impôt – celle-ci a d'ailleurs fini par l'anoblir pour le remercier de ses services. Mais l'âge d'or des corsaires, c'est vraiment le xvii<sup>e</sup> siècle et la période du règne de Louis XIV. Trois nations sont particulièrement actives : la France, l'Angleterre et les Provinces-Unies – les actuels Pays-Bas. Les corsaires, pour un État, sont bien souvent le moyen de compenser une marine de guerre insuffisante... Il existe d'ailleurs des « armements mixtes ». Dans ce cas, c'est l'État qui loue ou prête ses bâtiments militaires à un armateur privé. René Duguay-Trouin, le célèbre corsaire malouin, a d'abord été corsaire sur des navires de commerce armés pour la course, puis comme officier sur des navires de la marine royale. Il en est de même pour Jean Bart. Surcouf, en revanche, n'a jamais voulu intégrer la marine d'État...

### **Que dire des flibustiers ?**

**P. H. :** La flibuste se définit d'abord par une zone géographique. Elle apparaît au xvi<sup>e</sup> siècle avec la colonisation de l'Amérique par les Espagnols, et se concentre sur les galleons espagnols revenant d'Amérique chargés d'or, d'argent, mais aussi de tabac ou de sucre de canne... Au départ, les flibustiers français, mais aussi anglais, font des allers-retours entre l'Europe et l'Amérique pour s'emparer de ces richesses. L'établissement de colonies françaises et anglaises dans les Antilles, à partir du xvii<sup>e</sup> siècle, ouvre la page de la flibuste antillaise – les marins ayant décidé d'établir leur base arrière dans ces îles.

### **Les flibustiers sont-ils pirates ou corsaires ?**

**P. H. :** Dans le cas de la flibuste, on parle davantage de « corso-piraterie ». Si ces gens opèrent certes avec des commissions délivrées par les gouverneurs locaux, le butin est partagé de façon plus « personnalisée » que sur le Vieux continent – on est loin des inventaires exhaustifs réalisés en Europe ! D'ailleurs, les flibustiers ne ramènent pas toujours leurs prises... Versailles ou Londres ferment les yeux car tout ce qui affaiblit l'Espagne, leur ennemi juré, sert leurs intérêts. Dans un premier temps, les flibustiers comme l'Olonnois ou Henry Morgan permettent aux colonies françaises et britanniques de se développer et de se défendre. Mais

arrive un moment où ils deviennent plus un handicap qu'un atout. Les États réalisent que la production de sucre et d'indigo dans les Antilles a besoin de la paix pour prospérer, et qu'il est plus intéressant de faire du commerce avec l'Espagne, en lui vendant notamment des esclaves ramenés d'Afrique. La flibuste est bannie.

### **Il existe toute une imagerie autour des pirates et des corsaires : le bandeau sur l'œil, le perroquet, et surtout des scènes d'abordage aussi spectaculaires que sanglantes... Cela correspond-il à une réalité ?**

**P. H. :** Cette image a été construite dès les xviii<sup>e</sup> et xix<sup>e</sup> siècles par des écrivains comme Daniel Defoe ou Robert Louis Stevenson, et a été largement exploitée au cinéma depuis. En réalité, les abordages ont toujours été l'exception, car personne n'a envie d'abîmer son navire ou de perdre des hommes dans un assaut. Certains pirates ont été présentés comme des Robin des bois, ou des esprits indépendants épris de liberté – c'est tout le mythe autour de Libertalia, la colonie libertaire censée avoir été bâtie par des pirates à Madagascar... Mais dans les faits, pirates et corsaires sont plutôt des chefs d'entreprise qui gèrent au mieux leur petite affaire !

### **Quand les corsaires ont-ils disparu ?**

**G. B. :** Le traité de Paris, en 1856, a mis fin à la guerre de course. Ce n'est plus vraiment productif, d'autant que les ennemis d'antan ont arrêté de se faire la guerre. Cet accord coïncide également avec une vraie spécialisation des flottes, avec des navires de commerce d'un côté, et des navires de guerre de l'autre. Mener des opérations de guerre à bord d'un bateau de commerce n'est plus à l'ordre du jour.

### **En revanche, la piraterie, elle, n'a pas disparu...**

**G. B. :** Il y a quelques années, elle était très pratiquée le long des côtes somaliennes où transitent les bateaux à la sortie du canal de Suez, près du golfe Arabo-Persique et sur la route du Sud-Est asiatique à la sortie du détroit de Malacca. Les cibles privilégiées par ces pirates : les porte-conteneurs, les cargos et les bateaux de plaisance. Depuis deux-trois ans, ces attaques qui s'assortissent de demandes de rançon et de la saisie de matériel électronique, sont en baisse le long des côtes de Somalie du fait de la mise en place par les armateurs d'une police de surveillance et d'accords internationaux. En revanche, les actes de piraterie se multiplient dans le golfe de Guinée, à l'ouest du continent africain. Là, ce sont les plates-formes pétrolières et les pétroliers qui sont principalement visés. Le pétrole saisi est directement revendu à proximité grâce à des réseaux organisés. On soupçonne des complicités de certains pouvoirs locaux, qui voient dans la piraterie une soupape pour des populations locales plongées dans une grande pauvreté. ||



*Histoire des pirates et des corsaires, de l'Antiquité à nos jours, Gilbert Buti et Philippe Hrodej (dir.), CNRS Éditions, septembre 2016, 686 p., 26 €*

## À lire

## CERVEAU

Après avoir passé en revue la moisson de découvertes des quinze dernières années sur le cerveau, Pierre-Marie Lledo livre son regard de neuroscientifique sur ce qui fait la spécificité de l'espèce humaine, puis évoque les bouleversements que pourrait provoquer l'utilisation des nouvelles technologies pour augmenter nos capacités mentales. Démontrant que « *le cerveau est bien plus que cette matière grise lovée dans notre boîte crânienne* », l'auteur appelle à réagir face à « *la banalisation des idées portées par le transhumanisme qui font prendre un risque majeur à l'humanité* ».

*Le Cerveau, la Machine et l'Humain*, Pierre-Marie Lledo, Odile Jacob, mars 2017, 272 p., 23,90 €



## AMAZONIE

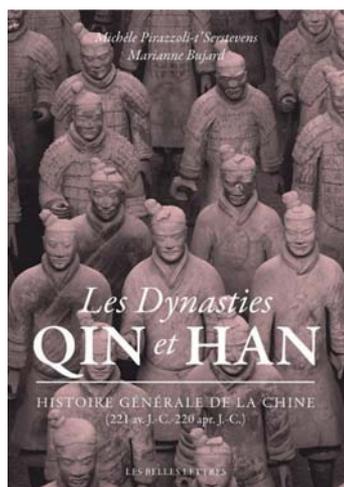
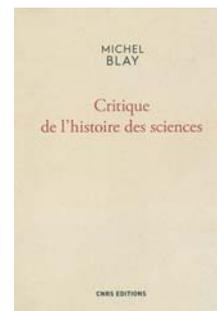
C'est une démarche originale qu'adopte l'archéologue Stéphen Rostain pour nous parler des sociétés d'Amazonie avant l'arrivée des Européens. Les douze travaux d'Hercule lui servent de fil conducteur pour nous faire découvrir les réalisations impressionnantes des Indiens : les écuries d'Augias sont évoquées pour les terrassements colossaux ; les pommes d'or du jardin des Hespérides renvoient à la fertilité de la « terre noire », qui intrigue encore les agronomes ; quant à la biche de Cérynie, elle permet à l'auteur d'évoquer les nombreuses innovations des premiers habitants de l'Amazonie. Un voyage captivant et instructif.

*Amazonie. Les 12 travaux des civilisations précolombiennes*, Stéphen Rostain, Belin, coll. « Science à plumes », mars 2017, 336 p., 22 €

## HISTOIRE DES SCIENCES

Président du Comité pour l'histoire du CNRS, Michel Blay propose ici d'en finir avec la vision de la science des Anciens « *comme l'enfance de notre belle "science"* ». Plutôt que de relater une prétendue croissance du savoir au fil des siècles, les historiens des sciences doivent s'attacher selon lui à saisir le sens des mondes imaginés et créés par les humains à toutes les époques, comme autant de systèmes de pensée ayant leur propre cohérence. Si la question traditionnelle du progrès continu est ici remise en cause, l'auteur insiste néanmoins sur un « chemin » qui a traversé la pensée depuis les Grecs : celui de la démonstration, qui trouve ses racines dans les *Eléments* d'Euclide.

*Critique de l'histoire des sciences*, Michel Blay, CNRS Éditions, avril 2017, 302 p., 22 €



## CHINE

Retracer en dix volumes l'histoire de la Chine, de l'Antiquité à nos jours : c'est l'ambition de la série coordonnée par l'historien Damien Chaussende. Dans ce premier opus, les deux auteures, Michèle Pirazzoli-t'Serstevens et Marianne Bujard, nous font partager les connaissances actuelles sur les

deux premiers empires chinois, les dynasties Qin et Han, qui couvrent plus de quatre siècles. Après en avoir retracé les évolutions politiques, les historiennes consacrent plusieurs chapitres à la vie quotidienne, la religion ou encore la littérature. Un ouvrage accessible et nourri des découvertes récentes.

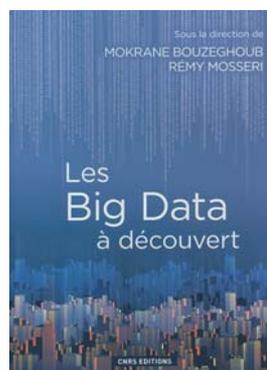
*Les Dynasties Qin et Han. Histoire générale de la Chine (221 av. J.-C. - 220 apr. J.-C.)*, Damien Chaussende (dir.), Michèle Pirazzoli-t'Serstevens et Marianne Bujard, Les Belles Lettres, coll. « Histoire », février 2017, 544 p., 29,50 €

## BIG DATA

D'Internet aux grands instruments de recherche, en passant par les objets connectés, le volume mondial des données numériques ne cesse d'augmenter de manière exponentielle. Ce qui ne va pas sans soulever d'importantes questions technologiques, scientifiques mais aussi sociales. Comment stocker, traiter ces données et leur donner du sens ? Comment évaluer leur qualité et la transparence des algorithmes qui les traitent ? Quels bénéfices peut-on en espérer pour la médecine, l'astronomie, la connaissance de notre planète ou de nos sociétés ? Quelles sont les conséquences sur l'économie ? Enfin, quels sont les risques potentiels, liés par exemple à la monétisation des données personnelles ? Près de 150 articles synthétiques, rédigés par

un large panel d'experts, permettent de dresser un état de l'art sur toutes ces questions. Une somme référence sur un sujet majeur de notre temps.

*Les Big Data à découvert*, Mokrane Bouzeghoub et Rémy Mosseri (dir.), préface d'Alain Fuchs, CNRS Éditions, mars 2017, 350 p., 39 €





© C. MAIZA

# Des algorithmes contre la démocratie?

**David Monniaux**

Chercheur en informatique au laboratoire Verimag<sup>1</sup>



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

**Naguère inconnu du grand public, le terme « algorithme » cristallise maintenant sur lui les espoirs et les craintes suscitées par la révolution du big data.**

Pourtant, la notion d'algorithme a été définie et utilisée par les mathématiciens et les informaticiens bien avant de devenir un fantasme médiatique.

Un algorithme n'est ni plus ni moins qu'une suite finie d'instructions permettant de résoudre un problème. Dans notre vie quotidienne, nous utilisons tous des algorithmes sans forcément nous en rendre compte : par exemple, quand nous changeons une roue de voiture ou lorsque nous préparons une pâte à crêpes à partir d'une recette.

Un exemple simple d'algorithmes auxquels mathématiciens, informaticiens et plus récemment moteurs de recherche ont toujours prêté une attention particulière : les algorithmes de tri. Ce sont des méthodes permettant de trier et d'ordonner de manière automatique les éléments d'une liste selon des critères prédéterminés : ordre alphabétique, taille des mots ou toute autre propriété associée aux éléments de la liste, tel un score de popularité.

## Le choix des critères

Le tri des éléments d'une liste par ordre alphabétique est une opération parfaitement définie mathématiquement. Pourtant, nous attendons de l'informatique des réponses à des questions bien plus floues : quelles sont les pages Web les plus pertinentes sur le gratin dauphinois ? ou sur l'Holocauste ? Qui est probablement un terroriste ou non ? Comment bien répartir les étudiants dans les filières ?

L'élaboration et la sélection de méthodes de tri adaptées à de grandes masses de données ont leur importance,

mais le choix du critère de tri est peut-être encore plus crucial. Quel score attribuerons-nous à une page Web pour dire qu'elle est plus pertinente qu'une autre ? Chaque moteur de recherche a sa propre recette. Parmi les critères les plus utilisés, il y a le nombre et la réputation des pages pointant dessus – l'idée étant qu'un document est probablement intéressant si de nombreux documents intéressants le mentionnent.

Un tel classement donne une impression d'objectivité, mais il ne faut jamais oublier qu'à un moment ou à un autre, ce sont des gens qui choisissent les critères de classement en fonction de leurs intuitions... et de leurs préjugés. L'apparente technicité du procédé peut ainsi masquer des choix politiques, ou encore des bricolages peu réfléchis. Des entreprises spécialisées en stratégie de référencement proposent d'ailleurs des méthodes pour améliorer artificiellement le classement des pages, et les moteurs changent continuellement leurs critères afin de les contrer. D'autant que, même pour des spécialistes, les critères retenus ne sont pas forcément évidents.

## Une transparence nécessaire

L'État de droit suppose que le citoyen connaisse d'avance les règles qui lui seront appliquées et qu'il puisse contester la façon dont elles sont appliquées, ce qui devrait exclure l'utilisation d'algorithmes opaques opérant sur des données indisponibles. Pourtant, il existe quantité de cas où un traitement automatisé obscur détermine ce à quoi nous avons accès, qu'il s'agisse par exemple de l'admission des étudiants après le baccalauréat ou du choix des passagers aériens soumis à un contrôle de sécurité approfondi. Le citoyen est alors privé de tout contrôle.

Le principal danger réside dans l'attrait que les solutions magiques ont pour les décideurs... mais aussi parfois pour les citoyens. On promet une méthode automatique, où il suffirait de collecter des données et d'appuyer sur un bouton pour avoir les réponses. La perspective de traiter de grands volumes avec de faibles coûts en personnel est alors si séduisante qu'on en omet les biais possibles, et les ajustements qu'ils nécessitent ! Ainsi, dans le cas du repérage automatique de comportements suspects, on oublie souvent que, pour de simples raisons statistiques, une méthode même très précise appliquée à une population non ciblée, où les personnes recherchées sont rares, tend à produire beaucoup trop de faux positifs (innocents soupçonnés à tort).

L'application aveugle de critères déduits par apprentissage automatique peut conduire à des résultats indésirables. Par exemple, l'apprentissage pourrait établir que les auteurs de vols avec violence sont plus souvent issus de milieux défavorisés que de milieux fortunés, et donc qu'il faut éviter d'embaucher les personnes issues de milieux défavorisés. À grande échelle, il s'agirait évidemment d'une politique contre-productive.

Il est vrai que nos administrations n'ont pas attendu l'informatique pour exiger des informations non pertinentes ou appliquer des décisions arbitraires, et qu'un moteur de recherche, malgré ses imperfections, est une solution incomparablement plus puissante que les catalogues d'antan. Néanmoins, la transparence des critères de choix est une condition nécessaire du débat démocratique. Dans ce contexte, l'algorithme, le « c'est la machine qui a décidé », ne doit pas conduire à dissimuler des choix politiques inavoués. **II**

1. Unité CNRS/Grenoble INP/Univ. Grenoble-Alpes.

# Comment rapprocher la science des citoyens

**Entretien.** Chargée de mission Sciences en société auprès du président du CNRS, la philosophe Sandra Laugier dresse un premier bilan des actions conduites dans ce domaine. Elle annonce notamment la création d'un groupe de travail pluridisciplinaire sur les controverses centrées sur des questions scientifiques.

PROPOS RECUEILLIS PAR FABRICE IMPÉRIALI



**Vous avez été nommée chargée de mission Sciences en société en mai 2016. Quels sont l'objet et la feuille de route de cette mission ?**

**Sandra Laugier :** Les dernières années ont vu une évolution vers une implication plus forte des chercheur(e)s et du CNRS dans la société. Cela a commencé par un passage à de nouveaux modes de communication et de nouvelles opérations (le site de *CNRS Le journal*, le forum « Que reste-t-il à découvrir ? », la revue *Carnets de science*), destinés à transmettre au public la science fondamentale, qui inclut les sciences sociales. Cette méthode a des conséquences, puisqu'elle suppose de donner ou reconnaître aux citoyen(ne)s la capacité de s'approprier ces contenus, de changer notre rapport au « public », désormais acteur plus que récepteur. Ensuite, le CNRS a répondu aux grands défis de société à travers les actions de la Mission pour l'interdisciplinarité (numérique et big data, transition énergétique et climat, genre et inégalités, comportements sociaux...). Et, depuis 2015, par sa contribution à la lutte contre le terrorisme et pour la sécurité humaine (rapport Athena concernant la recherche sur la radicalisation, appel Attentats-recherche, Défi science des comportements humains collectifs...), le CNRS a pris un nouveau rôle public, tout en consolidant celui de référence nationale – scientifique et éthique.

Il s'agit maintenant de réfléchir collectivement aux enjeux, limites et conséquences de ce positionnement. Comment un organisme de science fondamentale peut-il avoir une place et une action dans la société ? Notre mission consiste donc à montrer comment cette science fondamentale peut et doit être mise en œuvre – mise en société – notamment en humanités et sciences sociales. D'où un certain nombre de nouveaux défis pour nous : décroiser les structures, impliquer les citoyen(ne)s dans les questions qui les concernent, trouver des relais et partenaires dans la société – que

ce soit dans le monde politique, associatif, ou celui des entreprises.

**Le CNRS cherche à valoriser ses recherches, tout particulièrement dans les politiques publiques. Comment votre mission peut-elle y contribuer ?**

**S. L. :** Paradoxalement, les chercheur(e)s et enseignant(e)s-chercheur(e)s en sciences humaines et sociales ne sont, guère plus que les autres, prêts à s'engager dans le domaine des politiques publiques. Il y a beaucoup de raisons à cela, dont le refus des compromissions, mais d'autres moins explicitées, telle cette tendance à se positionner hors sol, à se protéger dans un espace propre à la recherche, en négligeant le contexte local ou les « besoins » de sa société. Mais ce sont les budgets des États qui financent la recherche de base. La pertinence de la recherche n'est pas détachée du bien-être des acteurs qui l'environnent.

Récemment, nous avons pris conscience de la faiblesse des processus de transfert des connaissances vers les pouvoirs publics. Il faut sortir du modèle « think tank », « conseiller du prince » ou « comité d'experts », où politiques et scientifiques se confortent et se valorisent mutuellement pour, au final, ne rien proposer de nouveau. Tout ce système a montré son inefficacité, avant et depuis les attentats de 2015. Il s'agit maintenant de trouver, dans la continuité des propositions du rapport d'Alain Fuchs concernant les recherches sur la radicalisation, des formules nouvelles où chercheur(e)s, citoyen(ne)s, administrations et élu(e)s travaillent ensemble et co-construisent des solutions.

Le climat est un domaine où, de façon exceptionnelle, les politiques ont été capables de décider d'agir en fonction de ce que la science pouvait établir. Dans une période où l'obscurantisme scientifique peut être un outil de répression et d'injustice, il importe de faire reconnaître la science, l'explication, l'analyse comme moyens de décision et d'action.

**Dans le cadre de votre mission, vous venez de lancer un groupe de travail sur les controverses. Quel est son objectif ?**

**S. L. :** Ce que les controverses centrées sur des questions scientifiques mettent en évidence – par exemple, le nucléaire ou les OGM –, c'est la difficulté pour certains sujets à établir une position unique « du CNRS », qu'on nous réclame rituellement. On voit parfois les controverses comme fragilisant la science, mais la réflexion du groupe semble montrer qu'elles sont aussi signe de santé et d'inventivité. Il faut également prendre en

“La pertinence de la recherche n’est pas détachée du bien-être des acteurs qui l’environnent.”

compte le fait que les sciences humaines et sociales, reconnues en tant que sciences comme les autres – et pas seulement comme suppléments éthico-juridiques ou comme services après-vente des autres domaines –, conduisent à intégrer de nouveaux éléments dans la connaissance. C’est un des effets d’une interdisciplinarité véritable. Une expertise collective sur certaines controverses peut et sans doute doit être pluraliste pour être utile et pertinente pour un débat public.

**Bien que toute récente, la mission Sciences en société a déjà été sollicitée sur plusieurs sujets importants, comme la prise en compte des personnes en situation de pauvreté dans les programmes de recherche qui les concernent, et les sciences participatives...**

**S. L. :** Nous avons démarré avec le cas de la radicalisation, mais nous avons aussi travaillé avec le ministère des Familles, de l’Enfance et des Droits des femmes, sur la violence et les femmes dans le contexte du djihadisme,

ou encore, au-delà de la question du terrorisme, sur les violences incestueuses touchant les enfants, sujet sur lequel nous avons produit une expertise collective.

Il est nouveau que le CNRS soit saisi pour une expertise collective et c’est significatif d’un déplacement. On peut espérer que la réflexion sur le transfert des connaissances sera étendue à tous les domaines où la science peut agir sur la société. De même, le récent colloque organisé au CNRS avec ATD Quart Monde a montré de façon inédite l’importance de la prise en compte des compétences des personnes en situation de grande pauvreté dans les politiques, et dans l’élaboration des savoirs. C’est une façon d’aborder les sciences participatives par leurs enjeux fondamentaux : utiliser les connaissances et expériences des citoyen(ne)s pour les questions qui les concernent. C’est une bonne entrée en matière ! II

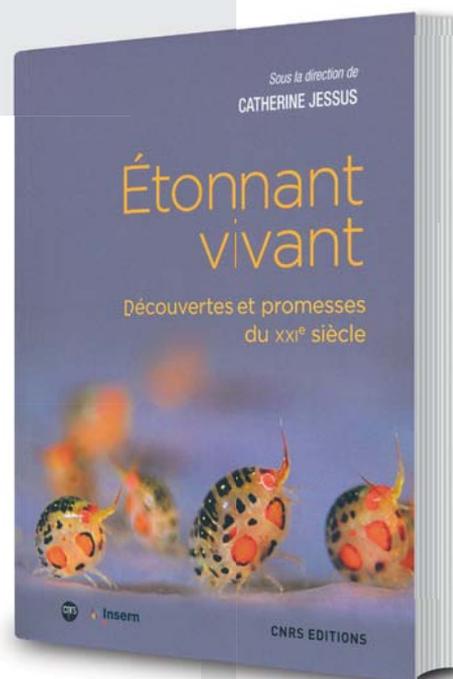
À lire

## Voyage en terre du vivant

C’est LE livre blanc des sciences du vivant au XXI<sup>e</sup> siècle : une centaine de scientifiques y livrent leur regard sur les découvertes récentes et leurs espoirs pour les décennies à venir. Qu’est-ce que la vie ? Quelle est son histoire sur la Terre ? Comment fonctionnent les organismes ? Quelles sont les interactions entre les êtres vivants ? Comment expliquer la conscience de soi ? Ces questions et bien d’autres, formulées – pour certaines – il y a de cela plusieurs siècles, pourraient trouver de nouvelles explications grâce notamment aux révolutions technologiques récentes, telles que la métagénomique ou

Crispr-Cas9. Mais pour y arriver, comme le soulignent les auteurs, la recherche requiert du temps, des prises de risque, de l’imagination, de la créativité et de la liberté. Un ouvrage référence très documenté mais accessible au plus grand nombre, dont l’avant-propos est cosigné par Alain Fuchs, président du CNRS, et Yves Lévy, président-directeur général de l’Inserm, et dont l’Inra et le CEA sont également partenaires.

*Étonnant vivant. Découvertes et promesses du XXI<sup>e</sup> siècle, Catherine Jessus (dir.) avec le concours de Thierry Gaude, CNRS Éditions, mars 2017, 328 p., 20 €*





## Fascinante parole sifflée

Julien Meyer, linguiste et bioacousticien au GIPSA-Lab<sup>1</sup>

Imaginez-vous en train de travailler votre potager ou de surveiller des animaux : des activités de subsistance que l'humanité pratique depuis des siècles, à la campagne comme à la montagne. Mais voilà qu'il vous faut communiquer avec votre ami, là-haut, sur la colline d'en face. Oubliez le téléphone portable : en montagne, les réseaux ne fonctionnent pas toujours bien. Le rejoindre pour lui parler de vive voix ? Trop fastidieux. Crier alors ? Cela suffirait juste à attirer son attention : lorsqu'elle se propage, la voix est vite dégradée. Sans compter que vos cordes vocales vont rapidement fatiguer. Et pourquoi pas... en sifflant ? Un bon sifflement pourrait l'atteindre facilement. Il porte bien plus loin que le cri, jusqu'à plusieurs kilomètres en montagne si le terrain et le temps sont dégagés. C'est un concentré d'énergie sonore dans une bande étroite de fréquences situées au-dessus des bruits de fond les plus communs de la nature. De là à tenir un dialogue complet à distance, il n'y a qu'un pas... que de nombreuses populations du monde ont déjà franchi il y a des milliers d'années.

Fascinante parole sifflée ! Tout comme le cri, le chuchotement ou le chant, c'est une forme dérivée de la langue parlée aux alentours. Elle se maintient dans des milieux écologiques très contraignants pour la communication humaine, comme les forêts tropicales denses ou les vallées de montagnes escarpées. Aujourd'hui, elle intrigue les sciences du langage et les neurosciences : elle permet de transmettre des mots et des phrases complexes tout en n'utilisant qu'une portion très réduite des sons de la voix.

### Une pratique millénaire

Cro-Magnon sifflait-il à Solutré pour organiser ses chasses ? Nous savons que le

langage sifflé est une tradition très ancienne. Hérodote, au V<sup>e</sup> siècle avant notre ère, l'évoque déjà dans son *Melpomène*. Et plusieurs traités chinois du II<sup>e</sup> au VIII<sup>e</sup> siècle de notre ère en font mention. Le *Traité du sifflement* ou *Xiaozhi* décrit ainsi l'art de siffler. C'est l'un des tout premiers ouvrages de phonétique. On y trouve même une ébauche de description articulaire de la différence entre voix et sifflement : « *L'air forcé vers l'extérieur depuis la gorge en des notes graves est appelé voix, alors que l'air forcé vers l'extérieur depuis la langue en des notes aiguës est appelé xiao (sifflement)* ».

La parole sifflée n'utilise plus la vibration des cordes vocales comme source sonore mais un flux d'air compressé et turbulent qui forme des vortex au niveau des lèvres. Tout comme dans la parole ordinaire, la langue et la mâchoire bougent pour former les mots, mais de manière plus contrainte afin de maintenir la pression nécessaire au sifflement.

Lors d'une enquête que j'ai menée avec une équipe internationale durant treize ans, nous avons répertorié plus de 70 langues encore sifflées à travers le monde : le mazatèque ou le chinantèque au Mexique par exemple, le wayãpi ou le gavião en Amazonie, le banen ou le ari en Afrique, le turc ou le grec autour de la Méditerranée, le akha et le hmong en Asie du Sud-Est, le béarnais dans les Pyrénées ou même le yupik de Sibérie dans le détroit de Béring...

### Mieux comprendre le langage

Publiée en 2005 dans le journal *Nature*, une étude neurophysiologique par IRM fonctionnelle, menée par le professeur Manuel Carreiras, a montré que la parole sifflée active les aires cérébrales associées traditionnellement au langage pour des locuteurs chevronnés d'espagnol sifflé des îles Canaries, mais pas pour les



▼ La tradition du langage sifflé est parfois relancée dans les villages, comme ici à Laruns (Pyrénées-Atlantiques).

novices. Un résultat toutefois à nuancer : une étude que j'ai publiée en janvier 2017 avec Laure Dentel et Fanny Meunier dans le journal *Frontiers in Psychology* montre en effet que des personnes écoutant pour la première fois des voyelles espagnoles sifflées parviennent tout de même à les identifier, sans entraînement. Autre résultat étonnant : les participants espagnols étaient plus précis dans l'identification que les participants français, qui eux-mêmes étaient plus performants que les participants chinois, dont les voyelles sont plus éloignées de celles de l'espagnol.

C'est notre « flexibilité perceptive », la capacité de reconnaître des unités linguistiques dans des prononciations nouvelles comme des accents régionaux ou des registres de parole différents, qui expliquerait les résultats que nous avons obtenus. Cette flexibilité est essentielle pour le développement du langage chez l'enfant, mais aussi lors de l'apprentissage d'une langue seconde ou pour comprendre une prononciation particulière. Elle

**Libération**

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. Laboratoire Grenoble images parole signal automatique (CNRS/Grenoble INP/Univ. Grenoble Alpes).



© L. GAZDAR/AFIP

expliquerait pourquoi nous sommes tous capables d'apprendre à parler en sifflant.

Plus surprenant encore, une étude publiée dans le journal *Current Biology* en 2015 par le professeur Güntürkün montre que la compréhension de syllabes sifflées (pa, ba, ta, da, ka, ga) engage autant l'hémisphère gauche que l'hémisphère droit de siffleurs turcs de Kusköy alors que les mêmes syllabes dans leur forme parlée engageaient majoritairement leur hémisphère gauche.

Chez les bergers berbères ou les Indiens wayāpi, on sait jouer de ces spécificités depuis longtemps pour utiliser ce langage. Il devient même un langage secret vis-à-vis des personnes étrangères à leur milieu. Cette langue rebelle est évoquée par Le Clezio, prix Nobel de littérature, dans son roman *Désert* (1980), où il décrit deux bergers dialoguant en parole sifflée berbère. Mais ces « langues sifflées » sont menacées par la dynamique des modes de vie urbains. Ce sont autant de possibilités de mieux comprendre le langage, à travers la phonétique de ces langues et leur perception par notre cerveau, qui disparaissent lentement. ||



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



## Leurs territoires ne sont pas « minables »!

**Hervé Pujol**

Ingénieur de recherche au laboratoire Dynamiques du droit<sup>1</sup>

© D. DEDIER

**En 2004, après la fermeture des derniers puits de charbon de Moselle et celle du site aurifère de Salsigne, nul ne pouvait douter que les mines entraient désormais dans l'histoire.** Du

reste, l'Unesco, en inscrivant le bassin minier du Nord-Pas-de-Calais au patrimoine mondial de l'humanité, semblait entériner le caractère révolu de l'aventure extractive française. Tout bascula pourtant en 2013, lorsque le ministre du Redressement productif, Arnaud Montebourg, initia un plan de relance de l'exploitation minière associé à une réforme du Code minier. Dans un contexte mondial de lutte pour le contrôle des ressources naturelles, le ministre soulignait l'urgence d'assurer la souveraineté économique du pays et la sécurité de son approvisionnement. Il évoquait aussi le besoin de revitaliser les territoires ruraux par la création d'emplois pérennes et non délocalisables. En 2015, le ministre de l'Économie Emmanuel Macron reprit à son compte cet objectif mais, conscient des traumatismes laissés par l'activité minière passée, il engagea une démarche dite « Mine responsable », visant à définir les termes d'un partenariat entre l'État et les industriels au service d'un nouveau modèle capable de prévenir et de réduire les impacts environnementaux, sanitaires et sociaux.

Si l'on dresse un premier bilan de cette orientation, on constate qu'en trois ans, dix-neuf permis exclusifs de recherches minières portant sur les métaux les plus divers (or, argent, plomb, zinc, tungstène, lithium, tantale, germanium, niobium, antimoine...) ont été accordés – onze en métropole et huit en Guyane –, et de nombreuses demandes sont en cours...

### Inquiétudes et contentieux

Le pari de la relance minière pose le problème des rapports entre risques industriels, principe de précaution et innovations technologiques. Les riverains des



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

sites concernés ne s'y trompent pas qui, partout, se mobilisent et multiplient les recours pour lutter contre les projets miniers<sup>2</sup>. Leurs inquiétudes sont d'autant plus vives que, de l'aveu même de Rémi Galin, coordonnateur du projet « Mine responsable » et chef du bureau de la gestion et de la législation des ressources minérales au ministère de l'Environnement, « la mine propre n'existe pas ».

Même réticence du côté des ONG. France Nature Environnement et Ingénieurs sans frontières ont quitté le comité de pilotage du projet « Mine responsable », dénonçant « une méthode d'élaboration floue, des objectifs imprécis et un calendrier à marche forcée ». Les Amis de la Terre, eux, avaient préalablement refusé d'intégrer ce comité.

Il est vrai qu'en matière de passifs environnementaux, les exemples ne manquent pas. La gestion désastreuse de l'après-mine dans les Cévennes a conduit locaux et associations à porter plainte contre X du chef de mise en danger d'autrui, suite à l'intoxication de plusieurs personnes aux métaux lourds. À Salsigne, site audois auquel le laboratoire Dynamiques du droit a consacré un colloque et une publication<sup>3</sup>, les litiges se poursuivent.

Quels enseignements tirer de tous ces conflits ? L'activité minière est-elle indissociable du contentieux ? Les politiques publiques menées sont-elles adaptées aux impératifs stratégiques, sociaux et environnementaux du pays ? Les controverses qu'elles suscitent n'imposent-elles pas l'ouverture d'un débat public ? Loin de tout jugement de valeur et de toute conviction politique ou philosophique, reconnaissons que, pour l'instant, le sujet des pollutions minières ne bénéficie pas vraiment d'un traitement à la hauteur des enjeux. ||

1. Unité CNRS/Univ. Montpellier 2. « Nos territoires ne sont pas minables », Communiqué de presse Stopmines, 13 avr. 2016. 3. *Tristes mines. Impacts environnementaux et sanitaires de l'industrie extractive*, Hervé Pujol (dir.), Les Études Hospitalières, juillet 2014, 344 p., 26,20 €.

**Laurent Bruxelles**, géomorphologue à l'Inrap<sup>1</sup>, détaché à l'Institut français d'Afrique du Sud

# “Je me souviens...”

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURE CAILLOCE

*...de la grotte de Drotsky, au Botswana. Située dans la partie orientale des Aha Hills, une chaîne de collines qui s'étend de part et d'autre de la frontière entre la Namibie et le Botswana, cette grotte d'origine karstique vieille de 5 à 10 millions d'années est connue depuis longtemps déjà. Pourquoi est-ce qu'elle nous intéresse, moi le géomorphologue, Marc Jarry l'archéologue (que j'ai pris ici en photo) et mes collègues paléontologues du projet « Human origins in Namibia » ? Parce qu'elle est un véritable modèle des grottes que nous traquons plus à l'ouest du massif, en Namibie où aucune mission archéologique ne s'est jamais rendue. Ces cavités sont en effet de véritables pièges à fossiles, dans lesquels ont pu tomber par accident des animaux mais aussi des hominins, il y a des millions d'années de cela. Après tout, c'est bien d'une chute de 30 mètres dans une grotte qu'est mort Little Foot, l'australopithèque retrouvé en Afrique du Sud... À ce jour, nous avons déjà parcouru vingt des soixante collines que compte le massif des Aha Hills. Tous les espoirs de retrouver l'un des morceaux du berceau de l'humanité sont encore permis.”*

PHOTO : L. BRUXELLES/INRAP



▶ Visionner notre vidéo :  
« À la recherche de pièges à fossiles »  
sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)

1. Institut national de recherches archéologiques préventives.





de Denis Guthleben,  
historien au CNRS

# La mesure des pôles

Depuis plusieurs années, une tendance anime notre paysage scientifique. Il s'agit, à grands coups de pôles ou de communautés, de bâtir de vastes ensembles offrant à notre recherche et à notre enseignement supérieur une efficacité et une visibilité renforcées. Quelle que soit l'issue de l'élection présidentielle – elle n'est pas encore connue à l'heure où s'écrivent ces lignes –, gageons que cette évolution ne s'arrêtera pas demain... malgré les controverses qu'elle soulève ! Mais l'avenir n'est pas le fonds de commerce de cette chronique : jetons plutôt un regard vers le passé.

## Des universités libres, autonomes, responsables...

Il était une fois un jeune physiologiste, Paul Bert, qui, après avoir œuvré auprès d'un éminent professeur du Collège de France, s'engagea en politique dans les toutes premières heures de la Troisième République. Ne manquant ni d'ardeur ni d'idées, il se fit élire à l'Assemblée nationale en juin 1872, avec dans son programme un projet de loi visant à réorganiser la science française. Estimant que celle-ci était trop morcelée en une foule de facultés et d'établissements, il recommandait d'utiles regroupements afin d'aboutir à la création d'une poignée de grands « centres universitaires ».

Ces derniers devaient assurer la place de la France dans la « concurrence des nations » – c'est-à-dire surtout, à ce moment-là, vis-à-vis d'une Allemagne qui venait de nous infliger une déroute traumatisante.

Comme Paul Bert avait beaucoup réfléchi et consulté, il était parvenu à la conclusion que ces centres devaient disposer de plusieurs garanties : une « *liberté optimale* »

pour des travaux et des cours « *guéris de la providence tutélaire de l'État* », une « *autonomie presque complète* » dans la gestion de leur budget, de leurs partenariats et de leurs recrutements, et de nouvelles instances de direction, à commencer par un « *conseil de surveillance et de perfectionnement* » aux pouvoirs élargis. Ainsi, s'enflammait Paul Bert, « *les jeunes universités françaises grandiront par l'individualisme, la concurrence et la liberté* » !

Mais Paul Bert ne fut pas seul à s'enflammer : une encyclopédie ne suffirait pas à rendre compte de l'émoi qui s'empara de la communauté savante ! En son sein, le projet trouva vite des partisans, comme l'historien Gabriel Monod, qui estimait qu'en créant de tels centres, « *vous aurez plus fait pour la grandeur et le relèvement de la France qu'en armant des millions d'hommes* ». Et puis il y eut les opposants, pour qui *big* n'était pas *beautiful* : Louis Pasteur vantait le « *séjour paisible* » des petits centres de recherche, où l'« *on suit avec plus de calme et souvent avec plus de fruit des idées nouvelles* », tandis que Michel Bréal recommandait de « *toujours y regarder à trois fois avant de supprimer un centre intellectuel, si modeste qu'il soit* ».

## Un projet enterré... puis ressuscité !

En octobre 1875, le ministère de l'Instruction publique, des Cultes et des Beaux-Arts – c'était ainsi, à l'époque... – entreprit de consulter tous les intéressés. Dans une circulaire, le ministre Henri Wallon les interrogeait sur cette réorganisation des institutions : fallait-il « *ramasser ce qu'elles ont de force vive en un plus petit nombre de centres importants* » ? Bien mal lui en prit : des tombereaux de courriers affluèrent de partout, qui encombrèrent toujours les rayonnages des Archives nationales et témoignent des fractures qui traversaient la communauté.

Pour finir, le projet fut enterré. Mais il ressuscita au début des années 1880, sous les ministères de Jules Ferry et de... Paul Bert. Puis dans les années 1890, avec de nouvelles voix, et pas des moindres. Celle d'un opposant au projet, jeune député du Tarn et agrégé de philosophie, pesa lourd : Jean Jaurès tira à boulets rouges sur une concentration qu'il estimait dangereuse pour « *la liberté politique et l'émancipation sociale des travailleurs* ». Pour lui, la diversité de notre paysage scientifique était bel et bien un atout. Quitte à réfléchir à la création d'un acteur national, garant « *des relations avec toute l'étendue du monde savant* » et contribuant à « *la vie intellectuelle du monde entier* ».

Qui osera encore dire que, pour le meilleur comme pour le pire, l'histoire ne repasse jamais les plats ? ||

“Louis Pasteur  
vantaient le  
«séjour paisible»  
des petits centres  
de recherche...”

# AJOUTEZ LA RECHERCHE À VOS TALENTS REJOIGNEZ-NOUS !

Le CNRS recrute  
des ingénieur.e.s  
et technicien.ne.s  
**DANS PLUS DE  
120 MÉTIERS**  
DU BEP À BAC +8

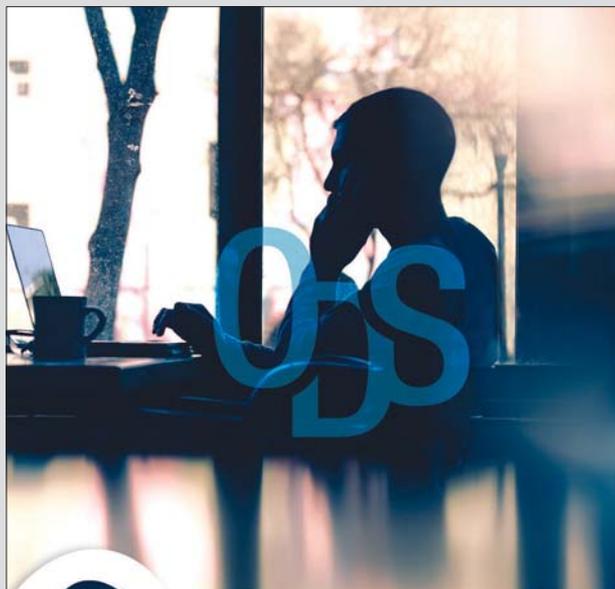


© Charlotte Seiz



www.cnrs.fr

Concours ouverts du 6 au 28 juin 2017  
Plus d'informations : [www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)



**ODS** L'offre de services aux unités  
Simplifier, soutenir et sécuriser  
le quotidien des laboratoires

<https://ods.cnrs.fr>

**Services collaboratifs** : pour travailler ensemble plus facilement  
**Services Cloud** : pour optimiser et sécuriser vos infrastructures

## My CoRe

Stockage et sauvegarde individuels,  
nomadisme et partage sécurisé



## My Com

Communication individuelle et interactive



## Portail CoRe

Portail Recherche multi-tutelles offrant un accès centralisé aux :  
SI, espaces CoRe, outils labos et outils agents...



## Espaces CoRe

Espaces collaboratifs dédiés à la gestion partagée de  
projets, collaborations et communautés



## Messagerie intégrée

Intégration native avec MS Office 365  
(administration hybride privé/public)



## Sites Web

Hébergement sécurisé, kit labos et CMS, assistance



## Machines virtuelles (VM)

Énergie informatique à la demande et sur mesure



Contact : Service systèmes d'information en délégation

# CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS #2

Entrez dans les coulisses  
de la recherche



En vente en librairie  
et Relay

200 pages / 12,50 €

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



CNRS EDITIONS