

Trimestriel n° 303  
MARS 2021

# CNRS

## LE JOURNAL



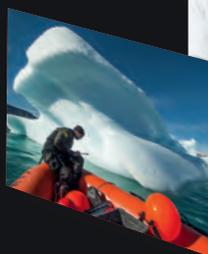
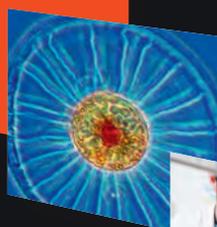
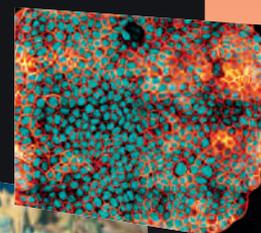
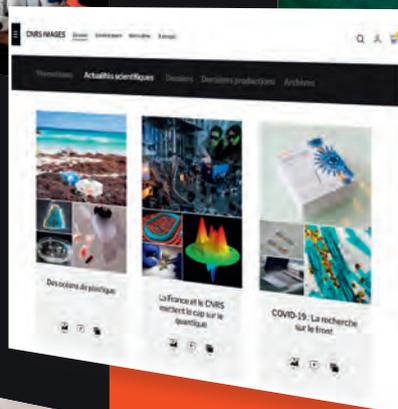
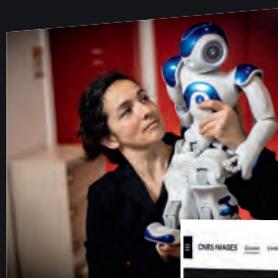
**Dans les coulisses  
de la nouvelle  
révolution quantique**

**Perseverance :  
l'aventure martienne  
continue**

**Regards croisés  
de femmes  
scientifiques**

**Déclin des  
insectes :  
l'urgence d'agir**

# Plongez-vous dans la science avec **la nouvelle plateforme** **CNRS Images**



**50 000** photos  
**2 000** vidéos  
L'actualité scientifique **en images**



[images.cnrs.fr](https://images.cnrs.fr)



**Rédaction :**

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16  
**Téléphone :** 01 44 96 40 00

**E-mail :** lejournald@cnrs.fr

**Le site Internet :** <https://lejournald.cnrs.fr>

**Anciens numéros :**

<https://lejournald.cnrs.fr/numeros-papiers>

**Directeur de la publication :**

Antoine Petit

**Directrice de la rédaction :**

Sophie Chevallon

**Directeur adjoint de la rédaction :**

Fabrice Impériali

**Rédacteur en chef :**

Matthieu Ravaud

**Rédactrice en chef adjointe :**

Charline Zeitoun

**Chefs de rubrique :**

Laure Cailloce, Saman Musacchio, Yaroslav Pigenet

**Rédactrices :**

Sophie Félix, Laurence Stenvot

**Ont participé à ce numéro :**

Julien Bourdet, Anne-Sophie Boutaud, Sebastián Escalón, Denis Guthleben, Gaëlle Hautemulle, Martin Koppe, Mathias Somm, Philippe Testard-Vaillant, Jean-Baptiste Veyrieras

**Secrétaire de rédaction :**

Émilie Silvoz

**Direction artistique :**

David Faure

**Iconographies :**

Anne-Emmanuelle Héry, Marie Mabrouk

**Gestionnaire :**

Mathieu Chatellier

**Assistant de direction :**

Frédéric Roman

**Illustrations :**

Alice Meteignier

**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 :**

Générateur de qubits de deuxième génération créé par la start-up Quandela.

© CYRIL FRESILLON/QUANDELA/C2M/CNRS PHOTOTHEQUE

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

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

**L**a période est complexe, difficile à vivre pour certains. Et pourtant, que ce soit à Brest, à Montpellier ou sur le plateau de Saclay, à chaque visite de laboratoire, dans tous les domaines, je rencontre des femmes et des hommes, chercheurs et ingénieurs, passionnés et mobilisés par une inépuisable soif de comprendre. C'est une source d'énergie inestimable pour repousser toujours plus les limites de la connaissance et faire en sorte que le CNRS reste une institution de recherche moderne, innovante et compétitive au plus haut niveau mondial. Nos objectifs cette année restent ambitieux.

Tout d'abord, les données de la recherche constituent un enjeu majeur des années à venir. Il est de notre responsabilité de permettre à chaque équipe de sécuriser ses données, tout en les rendant accessibles et réutilisables. Après la feuille de route sur la science ouverte publiée en 2019, nous avons donc mis en place un plan « Données de la recherche ». Cela nous a conduits à la création de la Direction des données ouvertes de la recherche, dont les premières actions ont démarré depuis quelques semaines.

*“De Brest à Montpellier,  
je rencontre des chercheurs  
et des ingénieurs mobilisés  
par une inépuisable soif  
de comprendre.”*

Les grandes questions de société sont rarement disciplinaires. À l'aube de la Décennie des Nations unies pour les sciences océaniques (2021-2030), le nouveau GDR OMER va permettre d'animer une communauté issue de toutes les disciplines, qui se reconnaît autour de l'objet « océan ». De la même manière, les actions qui impliquent une mobilisation coordonnée des dix instituts se multiplient autour des six grands défis sociétaux identi-

fiés par le CNRS dans son Contrat d'objectifs et de performance.

L'absence de déplacements internationaux aurait pu pénaliser nos collaborations. Il n'en est rien. Nous comptons cette année cinq laboratoires internationaux (IRL) de plus. Le CNRS s'est aussi donné comme ambition de mieux et plus collaborer avec les pays d'Afrique, continent en plein essor et à fort potentiel scientifique. Un premier appel à projet a été lancé en début d'année, avec comme objectif l'élaboration à l'automne d'un plan pluriannuel de coopérations avec l'Afrique.

Le CNRS est aussi fortement engagé dans une démarche de développement durable, comme l'atteste la signature récente de l'accord avec l'établissement public d'aménagement du plateau de Saclay : celle-ci acte la récupération de la chaleur perdue produite par le supercalculateur Jean Zay, l'équivalent de la consommation de plus de mille logements. Avec la CPU, nous avons incité chaque laboratoire à mettre en place une réflexion sur l'impact environnemental de vos activités. C'est à cette échelle, en effet, que seront trouvées les solutions pour soutenir une recherche d'excellence, tout en intégrant l'urgence des situations environnementales comme sociétales.

Ces quelques exemples illustrent notre profonde volonté d'agir pour le développement d'un CNRS fortement ancré dans la société, résolument guidé par la volonté de faire avancer les connaissances et d'être utile.

*Alain Schuhl,*

directeur général délégué à la science du CNRS



FRÉDÉRIQUE PIAS/CNRS PHOTOTHEQUE

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS





# GRAND FORMAT

# 11

Dans les coulisses de la nouvelle révolution quantique.....	12
Les voiliers de la Rome antique remis à flot .....	24
Les premières leçons de la crise du Covid-19 .....	30



8  
Les nouveaux explorateurs de Mars

## EN PERSONNE 5

Regards croisés de femmes scientifiques .....	6
Les nouveaux explorateurs de Mars .....	8
Brèves .....	10



42  
En mission dans le plus grand courant océanique du monde

## EN ACTION 35

Déclin des insectes : l'urgence d'agir .....	36
Pangloss, à l'écoute des langues rares .....	38
Au cœur des stratégies nationales pour la recherche .....	40
En mission dans le plus grand courant océanique du monde .....	42
Comment se divise un groupe de personnes ? .....	44
Hayabusa 2 livre sa poussière d'astéroïde .....	46
Les albatros, des sentinelles contre la pêche illégale .....	48
Horizon Europe, un nouveau souffle pour la recherche .....	50
« Le CNRS se doit d'être irréprochable sur la question des pratiques de recherche » .....	52
À Nantes, une étude inédite sur la pollution des sols .....	54



58  
Avec le Covid-19, on met enfin le nez sur la perte de l'odorat

## LES IDÉES 57

Avec le Covid-19, on met enfin le nez sur la perte de l'odorat .....	58
À quoi sert la 5G ? .....	60
Dessaler l'eau de mer grâce aux membranes bio-inspirées .....	62

## CARNET DE BORD

Guillaume Morel nous raconte un souvenir de recherche ..... 64

## LA CHRONIQUE

Un institut, deux infinis ..... 66

# EN PERSONNE



*Où l'on rencontre des astrophysiciennes  
parlant de parité, des scientifiques  
les yeux rivés vers Mars et un chercheur  
lauréat d'un Emmy Award.*

# Regards croisés de femmes scientifiques

PROPOS RECUEILLIS PAR MATTHIAS SOMM

## SOCIÉTÉS

**ENTRETIEN** À l'occasion de la Journée internationale des femmes et des filles de science, le 11 février, Françoise Combes, astrophysicienne, lauréate de la médaille d'or du CNRS 2020 et du prix international L'Oréal-Unesco pour les femmes et la science 2021, et Barbara Mazzilli Ciraulo, doctorante à l'Observatoire de Paris-PSL, ont partagé leur vision de la place des chercheuses au fil des générations.

### Françoise Combes, y avait-il beaucoup de femmes dans la recherche à vos débuts ?

**Françoise Combes.** Quand j'ai commencé, nous étions déjà 30 % de femmes en astrophysique. Cela diminue légèrement ces temps-ci car les possibilités d'obtenir un poste permanent après un doctorat s'amenuisent. Il faut attendre six ou huit ans, contre deux ou trois auparavant. Or les femmes se découragent plus vite que les hommes si elles veulent aussi fonder une famille. Par ailleurs, le constat varie selon les disciplines. Physique, maths et sciences de l'ingénieur sont, hélas !, réputées peu féminines. Les filles se dirigent plus vers les lettres, le droit, la santé... où on retrouve 50 % de femmes. Et il est peut-être plus facile d'obtenir un poste en France dans ces secteurs-là.

### Être une femme a-t-il impacté votre carrière ?

**F. C.** Je ne dois pas être un exemple très représentatif... J'ai eu la chance d'avoir pour conjoint un de ces « nouveaux pères », rares à l'époque, qui s'occupaient des enfants. Cela m'a permis de voyager pour des sessions d'observation en extérieur, au Chili ou en Espagne, plusieurs fois par an.

### Qu'en dites-vous Barbara Mazzilli Ciraulo ?

**Barbara Mazzilli Ciraulo.** Nous étions une majorité de filles en master d'astrophysique mais nous ne sommes que deux à avoir poursuivi en thèse. Les filles pensent forcément à l'horloge biologique... Passer six, huit ans sur des

contrats courts, changer de pays tous les deux ans, peut être décourageant. Je suis déterminée à mener mon doctorat à son terme et, si je trouve un contrat, ici ou à l'étranger, je saisisrai l'opportunité. Des femmes comme Françoise réussissent très bien à tout allier, donc c'est possible...

### Quelles sont les causes du manque de parité ?

**F. C.** Le mal se trouve à la racine. Il y a des stéréotypes. En France, les étudiantes sont largement supérieures en nombre (55 % de la population étudiante<sup>1</sup>). Mais dans la plupart des cultures, les femmes n'étaient pas supposées avoir une profession liée aux maths, à la physique ou aux sciences de l'ingénieur. Dans l'imaginaire collectif, elles doivent aider leur prochain, donc elles se dirigent vers des professions de services. Il faut changer cette culture dès l'école. Et des mesures très simples pourraient aussi être accentuées pour encourager les carrières, comme par exemple une aide pour faire garder les enfants quand les jeunes chercheuses sont déjà maman. Cela se fait déjà, même si trop peu encore, lors des colloques.

**B. M. C.** Les femmes chercheuses ont toujours été moins médiatisées. Il y a donc, pour les jeunes filles « en construction », moins de modèles féminins à admirer et imiter. N'importe qui saura sans doute citer le nom d'un physicien, mais pas celui d'une physicienne ou d'une astronome. Et une petite fille aura sûrement plus de mal à se dire « *j'en suis capable moi aussi* », si elle ne voit que des hommes arriver à ces professions. Cela produit certainement de l'autocensure.

### Pourquoi les femmes accèdent-elles moins aux postes à responsabilité dans la recherche ?

**F. C.** D'abord, et je rejoins Barbara, il y a une autocensure. Les femmes ont moins envie d'avoir une position d'autorité ou de pouvoir que les hommes. L'an dernier par exemple, une femme, Fabienne Casoli, est devenue présidente de l'Observatoire de Paris. C'est la première fois depuis 350 ans. Mais elle est aussi l'une des premières femmes à avoir candidaté... Ensuite, ces positions de responsabilité exigent plus d'investissement or, les femmes veulent garder de l'espace pour leur vie privée. Enfin, il y a aussi de la discrimination. Les postes plus élevés sont attribués par des comités qui sont essentiellement masculins et « répètent » un peu l'existant...

1. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/pid35339/enseignement-superieur-et-recherche-vers-l-egalite-femmes-hommes-chiffres-cles.html>



©MATTHIAS SOMME

### Au final, les chances n'ont donc pas l'air d'être les mêmes pour tous et toutes...

**F. C.** Oui, il y a des obstacles plus grands à surmonter pour les femmes. Notamment le poids de leurs propres préjugés. Elles se pensent – à tort – moins capables que les hommes. Il faut que les stéréotypes changent et qu'on propose aux petites filles des modèles féminins en lesquels se reconnaître. Dès l'école.

**B. M. C.** Aujourd'hui, on met en place des solutions en aval pour contrer le problème de façon immédiate. Par exemple, des laboratoires ont instauré un quota de femmes. Mais on ne veut pas être sélectionnée uniquement parce qu'on est une femme... Il faudrait, comme l'a dit Françoise, prendre le problème à la racine et faire en sorte qu'il y ait autant de candidates que de candidats. Quand les filles et les femmes prendront conscience que c'est possible, elles se lanceront.

### Se pose-t-on plus de questions sur la parité à présent ?

**F. C.** Oui un peu. On exige par exemple de certains comités d'atteindre la parité dans leurs sélections. Enfin, pas 50 % mais au moins 30 % de femmes, puisque que c'est leur taux de présence dans la recherche actuellement. Il faut briser quelques tabous pour y arriver. Certains ne pensent pas spontanément à des noms de femmes, donc il faut chercher... et on y arrive. Prenons la médaille d'or décernée chaque année par le CNRS. Pendant cinquante ans, il n'y a eu que trois femmes. Mais ces seules dix dernières années, il y en a eu quatre. Énorme progrès. Les responsables ont simplement décidé de s'en soucier.

Barbara Mazzilli Ciraulo et Françoise Combes à l'Observatoire de Paris.

### Pour en savoir +

Retrouvez l'intégralité des échanges en vidéo sur [lejournel.cnrs.fr](http://lejournel.cnrs.fr)

### Comment se positionne la France à l'échelle mondiale ?

**F. C.** Le taux de parité dans la recherche est semblable à celui de plusieurs pays de l'OCDE<sup>2</sup>. Mais les pays latins (Espagne, Italie...) se débrouillent mieux que les pays du Nord et anglo-saxons. L'Allemagne est la lanterne rouge en Europe. Les États-Unis affichent aussi un taux médiocre.

### Barbara, que vous inspire le parcours de Françoise ?

**B. M. C.** Beaucoup d'admiration. Aujourd'hui, Françoise est mondialement reconnue, félicitée, primée. Travailler avec elle est une opportunité formidable et c'est très stimulant. Comme je le disais, il nous faut des modèles. Pour nous donner envie de se donner les moyens de réussir tout autant.

### L'un de vos professeurs, un homme, avait essayé de vous décourager dans vos études... Quel est votre message pour les jeunes femmes qui rêvent de science et de recherche ?

**B. M. C.** Ce professeur m'avait suggéré de garder l'astrophysique comme passe-temps et de me tourner vers un autre métier. C'était il n'y a pas si longtemps et les mentalités ne vont pas changer instantanément. Mais il faut passer outre. Si la passion vous anime, vous trouverez les moyens de réussir. Personne n'est mieux placé que vous pour choisir que faire de votre vie et de votre carrière. Il ne faut pas se décourager ni se laisser décourager. On peut très bien faire carrière de sa passion. **||**

2. « La parité dans la recherche », Mesri, 2017. En ligne : [https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/FR/T493/la\\_parite\\_dans\\_la\\_recherche](https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/FR/T493/la_parite_dans_la_recherche)

# Les nouveaux explorateurs de Mars

UNIVERS

**ASTROPHYSIQUE** En France, plus de 300 personnes ont participé à la mise au point de SuperCam, instrument du rover Perseverance qui s'est posé sur Mars avec succès le 18 février. Portraits de deux scientifiques au cœur de cette incroyable aventure. PAR GAËL HAUTEMULLE



© FRÉDÉRIQUE PLAS/CNRS PHOTOTHÈQUE



## Pernelle Bernardi, le sol de Mars dans l'objectif

Elle souffle enfin : le rover Perseverance s'est posé avec succès sur Mars le 18 février 2021. Pernelle Bernardi, 42 ans, ingénieure de recherche au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique<sup>1</sup> (Lesia), est responsable des spécifications et des performances de l'un des sept instruments équipant le rover de la Nasa : SuperCam. Son objectif ? Analyser la composition chimique et minéralogique des roches de la planète rouge afin d'y rechercher des traces de vie et d'habitabilité.

Entrée au Lesia en 2002, « un peu par hasard » après son école d'ingénieur, l'Institut d'optique Graduate School, elle délaisse les télécommunications après l'éclatement de la bulle

internet et rejoint l'aventure spatiale « avec un grand bonheur ». Elle travaille d'abord sur la mission Corot et son satellite, lancé par le Cnes en 2006, participe aux tests à Toulouse, Cannes Mandelieu et Baïkonour au Kazakhstan, « convaincue d'avoir choisi la bonne voie ». Elle intègre ensuite l'équipe du microsatellite franco-chinois SMESE mais celle-ci est abandonnée en 2010. Idem pour son projet de sismomètre stellaire promis à la station polaire franco-italienne Concordia, en Antarctique...

En 2013, la chance tourne. Sylvestre Maurice, responsable scientifique de la partie française du futur rover martien américain Perseverance, entre en contact avec le Lesia, acteur incontournable en spectroscopie infrarouge. Il faut doter l'instrument SuperCam d'une technique d'analyse capable de caractériser les

roches à plusieurs mètres de distance pour indiquer au rover les meilleures zones où prélever. Une première. Pernelle Bernardi rejoint le projet comme architecte optique avant de devenir l'ingénieure système de l'instrument complet.

La jeune femme doit choisir le meilleur concept d'instrument. Responsable des performances de SuperCam, elle en pilote le développement technique, en termes d'optique, mécaniques, thermiques, électroniques, contrôle-commande, logiciel embarqué, interfaces extérieures. « Un défi a par exemple été de m'assurer que les faisceaux laser restaient parfaitement co-alignés quelle que soit la température de l'instrument, entre -40°C et +10°C, et malgré les chocs et vibrations subies par le rover », commente-t-elle.

Le développement technique durera près de cinq ans... avec quelques rebondissements. Comme en octobre 2018, quand un incident technique détruit la moitié de l'instrument lors d'une opération nécessitant un passage en étuve. « L'équipe a dû repartir de zéro ! » Tout aurait pu

+  
En ligne

Retrouvez nos articles, vidéos et infographies consacrés à Mars 2020 sur [lejournald.cnrs.fr/mars2020](http://lejournald.cnrs.fr/mars2020)

1. Unité CNRS / Observatoire de Paris-PSL / Sorbonne Université / Université de Paris.

# Baptiste Chide, à l'écoute de la planète rouge



© NASA/JPL CALTECH, 2020



© NASA/JPL CALTECH, 2021

s'arrêter à un mois de la livraison prévue aux Américains... Mais en plus de remplacer la pièce détruite en seulement six mois, les Français améliorent ses performances ! Cette gageure vaudra à l'ingénieure la médaille de cristal 2020 du CNRS, « qui récompense la réussite de toute une équipe », souligne-t-elle.

SuperCam a donc bien rejoint le mât du rover martien Perseverance avant son décollage, le 30 juillet 2020. Pendant ses six mois et demi de croisière vers Mars, elle a été allumée deux fois, ce qui a « permis de vérifier que l'instrument avait bien vécu le lancement », rappelle-t-elle en attendant maintenant les tests de « bonne santé » après atterrissage. Toute l'équipe croise les doigts. « On va chercher les traces de vie sur Mars, conclut-elle. C'est très excitant d'un point de vue philosophique ». ||

► Quelques minutes seulement après avoir atterri, Perseverance a envoyé cette première image du sol martien.

Il s'exprime de manière claire et enthousiaste, au contraire de la diction hésitante qu'il affichait l'année dernière dans sa vidéo du concours « Ma thèse en 180 secondes ». Baptiste Chide, jeune chercheur de 28 ans à l'Institut de recherche en astrophysique et en planétologie (Irap)<sup>1</sup>, s'amuse en effet à y incarner le rover martien Perseverance, alors sujet à des bugs d'élocution pour... décliner son état-civil face à un agent de la circulation énervé ! Le thésard en astrophysique et planétologie expliquait avec humour que le fameux rover de la mission Mars 2020 était « du genre à partir sur Mars écouter du gros son... »

Pendant sa thèse, soutenue fin 2020, Baptiste Chide a étudié le microphone logé dans l'instrument SuperCam. « Conçu et développé sous la responsabilité de David Mimoun et sous la maîtrise d'ouvrage de l'institut ISAE-SupAero de Toulouse », ce microphone est arrivé sur le sol martien avec le reste du rover, le 18 février. La tâche du jeune Sarthois originaire du Mans était vaste : « le but était de définir ce qu'on allait pouvoir apprendre de Mars en écoutant les sons à la surface avec un microphone », explique-t-il. À l'origine du projet, en 2013, SuperCam ne devait pas en être équipé. C'était l'idée de Sylvestre Maurice, responsable scientifique de l'instrument, qui a ensuite convaincu la Nasa. »

Les scientifiques français veulent notamment exploiter ce microphone en lien avec la spectroscopie de plasma dont est dotée SuperCam. Car son laser, utilisé pour caractériser les roches du sol martien, produit de petites détonations, « comme des claquements de doigts ». Pour reproduire en laboratoire les conditions d'écoute sur Mars, le jeune chercheur a « utilisé une petite cuve de quelques dizaines de centimètres à l'Irap de Toulouse, dite "enceinte martienne". Et aussi "le tunnel martien" de l'université danoise



© SÉBASTIEN CHASTANET/OMP

d'Aarhus ! » sourit-il. Mais quésaco ? « C'est un cylindre de huit mètres de long et de deux mètres de diamètre. Le vide y est fait avant d'injecter une atmosphère semblable à celle de Mars. »

Par comparaison avec la Terre, la très faible pression qui règne sur la planète rouge, la température très froide de l'atmosphère (-50 °C en moyenne) et sa composition chimique sont responsables d'une baisse de volume et d'une vitesse de propagation moindre des sons sur Mars : « on pourrait les comparer à une discussion à travers un mur de quelques centimètres d'épaisseur », explique le jeune chercheur, pédagogue.

Ce tant attendu 18 février 2021, Baptiste et toute l'équipe « microphone » ont guetté les premiers sons enregistrés par « son » microphone à la surface de la planète rouge. « C'est une expérience inédite, s'enthousiasme le jeune homme, on n'a jamais entendu de son à la surface de Mars ! » Il étudiera ces enregistrements dans le cadre de son postdoctorat. « On devrait entendre les sons mécaniques du rover quand il se déplace ou encore ses forages. Je suis surtout très curieux de découvrir les sons atmosphériques des vents martiens ou ceux des grains de poussière frôlant le rover. »

« Enfant, ma mère m'emmenait observer Mars dans le ciel du Mans, confie-t-il. Et plus tard, à l'ISAE-SupAéro, j'ai eu la chance de rencontrer Sylvestre Maurice. Je suis extrêmement fier de travailler à ses côtés aujourd'hui ! » ||

1. Unité CNRS/Université Paul Sabatier – Toulouse III/Cnes/Observatoire Midi-Pyrénées



© FREDÉRIQUE PLAS/CNRS PHOTOTHÈQUE

## Stéphane Blanc, nommé directeur de l'Institut écologie et environnement du CNRS

Après avoir dirigé la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires du CNRS (Miti) entre 2018 et 2020, Stéphane Blanc prend la tête de l'Institut écologie et environnement du CNRS (Inee) à compter du 1<sup>er</sup> mars 2021, succédant à Stéphanie Thiébault qui occupait ce poste depuis 2013. Entré au CNRS en 2003 et directeur de recherche depuis 2012, il a été responsable du département d'Écologie, Physiologie et Éthologie de l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien de 2006 à 2012 puis directeur-adjoint scientifique de l'Inee. Via des approches de physiologie comparée en milieux extrêmes et d'écologie de la santé, ses recherches s'intéressent à l'impact des facteurs environnementaux sur la santé métabolique humaine. Reconnu par plusieurs prix internationaux, membre élu de l'Académie internationale d'astronautique et directeur ou co-directeur de plusieurs programmes de recherche français et européens, il a participé au montage du programme Future Earth et co-pilote le Comité franco-allemand de l'animation du programme prioritaire de recherche Make Our Planet Great Again sur le changement global.



© THOMAS ARRIÈRES/SCIENCE PO/ATP

Fariba Adelkhah

## Le Prix Irène Joliot-Curie récompense trois chercheuses d'exception

En décembre ont été dévoilés les noms des trois lauréates du Prix Irène Joliot-Curie. **Fariba Adelkhah**, directrice de recherche de Sciences Po au Centre de recherches internationales, reçoit ainsi le prix de la Femme scientifique de l'année pour l'ensemble de ses travaux de recherche en anthropologie et science politique. Emprisonnée arbitrairement en Iran entre juin 2019 et octobre 2020, elle a obtenu une « libération temporaire » et reste assignée à résidence. Le CNRS a demandé sa libération définitive. Directrice de recherche à l'École des Ponts au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement, **Céline Guivarch** s'est vu attribuer le prix de la Jeune Femme scientifique. **Sandrine Lévêque-Fort**, directrice de recherche au CNRS et directrice scientifique de la start-up Abbelight, reçoit quant à elle le prix Femme, recherche et entreprise.



© CHÉRISSANCE TRAVIN/OPALE/LEFRÈRE

## Chantal Thomas entre à l'Académie française

Le 28 janvier, l'écrivaine Chantal Thomas a été élue à l'Académie française, au fauteuil de Jean d'Ormesson. Après avoir enseigné la littérature aux États-Unis pendant plusieurs années, elle était entrée au CNRS en 1989 et avait codirigé jusqu'en 2010 le Centre d'études du XVIII<sup>e</sup> siècle à l'Institut des sciences de l'homme de Lyon. Elle a écrit de nombreux essais, notamment sur le marquis de Sade, Giacomo Casanova ou Marie-Antoinette. Ainsi que des nouvelles, des récits, des romans dont *Les Adieux à la reine*, prix Femina 2002 et adapté au cinéma en 2012.



© AGATHE MARION/CNRS



© UPS



© LAURENT ARDHIJN / CNRS

## NOMINATIONS

Plusieurs nominations ont eu lieu ces dernières semaines au CNRS. Ainsi, **Eric Chareyre**, délégué régional adjoint Île-de-France Villejuif, a été nommé directeur de l'audit interne, à compter du 1<sup>er</sup> mars. **Laurent Barbieri**, directeur général des services d'Aix-Marseille Université, a de son côté été nommé délégué régional Rhône-Auvergne à compter de la même date. Enfin, le 1<sup>er</sup> février, **Benoît Forêt**, sous-directeur du service commun aux deux directions générales du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, a pris la tête de la délégation Île-de-France Gif-sur-Yvette.

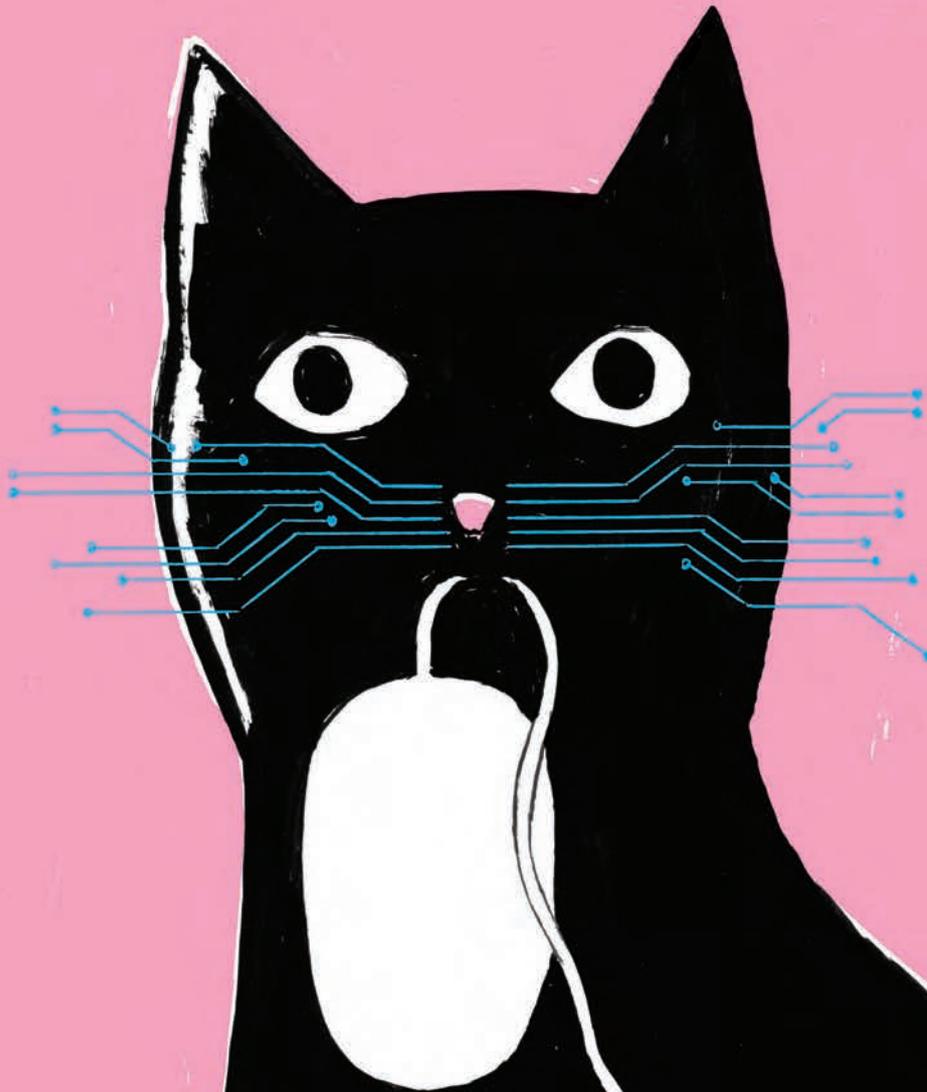
## Un Emmy Award pour la recherche française !



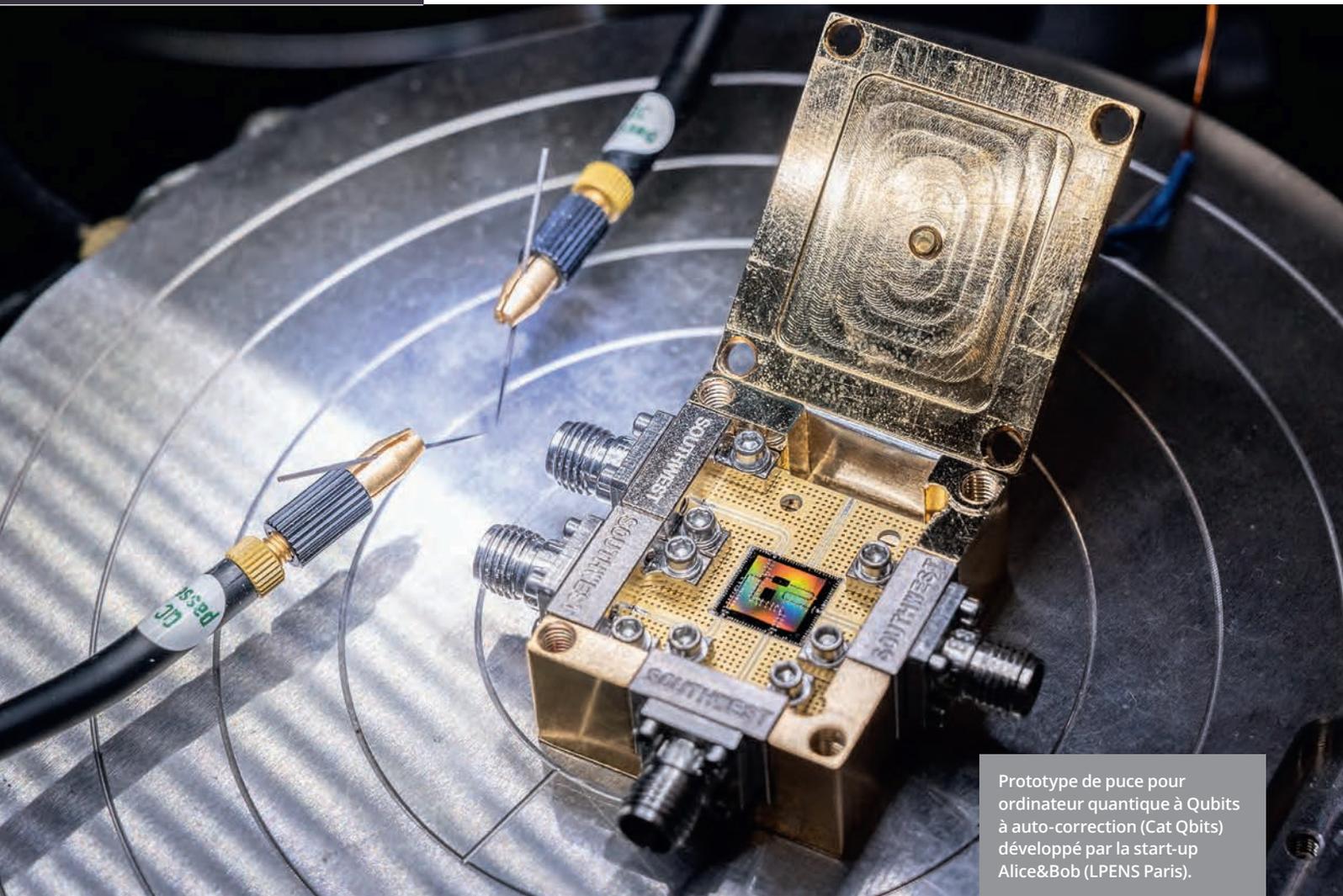
© UNIVERSITÉ DE NANTES

**Patrick Le Callet**, du laboratoire des sciences du numérique de Nantes, a été récompensé à travers l'université de Nantes d'un Emmy Award par la National Academy of Television Arts and Sciences, pour des travaux sur l'amélioration automatique de la qualité des vidéos, notamment avec Netflix.

# GRAND FORMAT



*Une plongée dans la révolution quantique,  
un voyage dans l'antique port de Rome  
et une réflexion sur nos rapports aux  
institutions en ces temps de pandémie.*



©HUBERT RAGUET / ALICE&amp;BOB / LPENS / CNRS

Prototype de puce pour ordinateur quantique à Qubits à auto-correction (Cat Qbits) développé par la start-up Alice&Bob (LPENS Paris).

## Un plan pour la recherche française

Annoncé le 21 janvier 2021 au Centre de nanosciences et de nanotechnologies, le Plan Quantique entend organiser les forces industrielles et de recherche du pays pour faire de la France un acteur majeur des technologies quantiques.

Les prix Nobel de physique Albert Fert et Serge Haroche, qui développèrent la spintronique et l'électrodynamique quantique en cavité, le lauréat de la médaille d'or du CNRS en 2005, Alain Aspect, et ses travaux pionniers sur l'intrication quantique, les simulateurs quantiques d'Atos... La France possède des compétences reconnues dans le domaine des technologies quantiques et entend bien conserver un rôle majeur dans la compétition internationale. Pour cela, le président Emmanuel Macron a dévoilé le 21 janvier un grand Plan Quantique, fortement attendu des communautés scientifiques françaises mais dont l'annonce avait longtemps été repoussée à cause de la crise sanitaire et économique.

### 1,8 milliard d'euros

Ce plan s'appuie en partie sur le rapport<sup>1</sup> rendu par la députée Paula Forteza, le chercheur Iordanis Kerenidis (CNRS) et l'ancien PDG de Safran, Jean-Paul Herteman, en janvier 2020, et qui mettait en avant l'excellence de la recherche française. Mais aussi le retard du pays en termes d'investissements, notamment pour le transfert vers l'industrie. Il proposait 37 mesures visant à définir une « stratégie nationale ambitieuse », dont plusieurs ont été reprises.

# Dans les coulisses de la nouvelle révolution quantique

MATIÈRE ◀ NUMÉRIQUE ■

Alors que le président de la République vient d'annoncer le lancement d'un plan dédié, découvrez comment les scientifiques du CNRS tentent de dompter les fabuleuses propriétés du monde quantique pour mettre au point des technologies révolutionnaires.

DOSSIER RÉALISÉ PAR JULIEN BOURDET, SOPHIE FÉLIX ET MARTIN KOPPE

✚ Lire l'intégralité des articles sur [lejournal.cnrs.fr](https://lejournal.cnrs.fr)

Similaire au Plan Intelligence artificielle présenté en 2018, le Plan Quantique prévoit des actions en faveur de la recherche (en particulier pour le calcul, les capteurs et les communications quantiques), l'industrie et la formation, financées par le 4<sup>e</sup> programme d'investissement d'avenir (PIA4) et le plan France relance<sup>2</sup>, à hauteur de 1,8 milliard d'euros (Md€). Un « *effort de R&D intensif* » qui doit identifier les pistes technologiques qui « *pourraient aboutir à un marché d'ici cinq ans* », selon Sébastien Tanzilli, directeur adjoint scientifique de l'Institut de physique du CNRS et pilote scientifique du PEPR dédié (lire notre article p. 40-41).

Communications ultra-sécurisées, capacités de calcul augmentées, sensibilité de mesures encore jamais atteinte... les enjeux stratégiques sont nombreux et le plan rassemble autant les ministères des Armées et de l'Économie, des Finances et de la Relance, que de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. « *Secteur d'avenir* » et « *marché clé* », le quantique est ainsi, pour Olivier Cappé, directeur adjoint scientifique de l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions du CNRS, « *une stratégie*

*d'accélération dont le succès est étroitement lié aux avancées attendues en recherche* ». Pour relever ces défis, le plan doit en effet permettre de structurer les forces vives du pays sur le domaine des technologies quantiques et des technologies dites « *habilitantes* » nécessaires à la mise en œuvre des futurs systèmes quantiques (notamment matériaux de pointe et cryogénie).

Les technologies quantiques sont « *encore largement une question de recherche fondamentale* », selon Sébastien Tanzilli. C'est pourquoi l'État s'entoure des trois grands opérateurs de recherche français concernés – le CNRS, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et Inria – pour définir sa stratégie. « *Grâce à son tissu de laboratoires qui maille le territoire national et à son approche pluridisciplinaire, alliant recherche fondamentale, innovation et transfert technologique, le CNRS représente l'atout français majeur pour répondre efficacement aux défis des technologies quantiques de demain, et pour positionner la France au plus haut niveau de la compétition internationale* », confirme le chercheur.

1. Lire notre article : <https://bit.ly/20Lkhwh> 2. Présenté par le Premier ministre le 3 septembre 2020, suite à la crise du Covid, il est doté d'un budget de 100 milliards d'euros.

« Très concret », le plan entend ainsi assurer la souveraineté nationale face notamment aux États-Unis et à la Chine qui investissent massivement, mais aussi face aux géants du numérique (comme Google ou IBM) dont les efforts de recherche se multiplient avec des budgets conséquents et des « résultats de premier plan ». La compétition se forme également au sein même de l'Europe – en particulier le Royaume-Uni et l'Allemagne développent des stratégies propres – malgré un Flagship Quantique commun d'un milliard d'euros sur dix ans lancé en 2018 et qui a déjà soutenu dix-neuf projets dont dix avec une participation du CNRS<sup>3</sup>. « La combinaison des stratégies d'accélération nationales – par exemple, la mise en place d'un accord entre la France et l'Allemagne –, permettrait d'aboutir à des innovations compétitives », assure Sébastien Tanzilli pour qui « il y a énormément de forces en France et en Europe ».

### L'appui des industriels

Le plan s'intéresse aussi aux interfaces avec les industries d'une part et à la formation en ingénierie quantique d'autre part. À travers un programme de recherche renforcé, il entend soutenir les écosystèmes thématiques visibles au niveau national. Maillés de laboratoires du CNRS et de ses partenaires, les grands pôles universitaires ont ainsi anticipé l'arrivée du plan en entamant un processus de structuration depuis quelques années. À Grenoble notamment, à travers le programme Quantum Engineering Grenoble (QuEnG), se construit un « écosystème pour les technologies quantiques » qui va du philosophe à l'industriel, soit « tout le continuum de la connaissance et de l'activité économique », explique Alexia Auffèves, directrice de recherche CNRS à l'Institut Néel et coordinatrice du programme. Avec deux chaires d'excellence et une trentaine de bourses de thèse, dont deux en sociologie

## Investissements des grands acteurs internationaux du quantique

<p><b>UE : Flagship quantique</b> <b>1 Md€</b> sur 10 ans lancé en 2018</p>	<p><b>Royaume-Uni</b> <b>1 Md£</b> sur 10 ans lancé en 2014</p>
<p><b>Chine</b> <b>10 Md€</b> lancé en 2015</p>	<p><b>France : Plan Quantique</b> <b>1,8 Md€</b> sur 5 ans lancé en 2021</p>
<p><b>États-Unis</b> <b>1,3 Md\$</b> sur 5 ans lancé en 2018 <b>+ 800 M\$</b> sur 2 ans en mars 2020</p>	<p><b>Allemagne</b> <b>650 M€</b> sur 5 ans lancé en 2018 <b>+ 2 Md€</b> en 2020</p>

et philosophie, les équipes entendent « tricoter l'interdisciplinarité ». L'enjeu est de taille : faire dialoguer les expertises pour définir ensemble « non pas des solutions mais les questions à poser ».

Inciter au dialogue pour créer une culture et un langage communs, c'est aussi l'objectif de la fédération de recherche CNRS Paris Centre for Quantum Computing (PCQC), créée en 2014 avec Sorbonne Université et l'Université de Paris, et qui est en phase d'élargissement pour inclure l'université PSL et Inria. « En 2014, essayer de faire parler ensemble des informaticiens et des physiciens n'était pas banal ! » assure sa directrice adjointe Eleni Diamanti, directrice de recherche CNRS au Laboratoire d'informatique de Paris 6<sup>4</sup>.

Si la recherche reste au cœur du projet parisien, la fédération est en discussion avec le Lab quantique et s'implique dans la Maison du quantique qui hébergera des industriels, des start-up et des scientifiques étrangers. L'appui des industriels est en effet indispensable pour progresser sur les questions de recherche qui sont au cœur des technologies quantiques. Comme ses pendants de la région parisienne, le pôle grenoblois en a bien conscience et s'appuie sur un tissu industriel dense déjà porté sur la cryogénie (avec Air Liquide) et la micro-électronique (STMicroelectronics), deux technologies habilitantes du quantique. « Le programme QuEnG a été une sensibilisation efficace mais le Plan Quantique va au-delà, rendant les industriels proactifs avec des financements pour développer de nouveaux outils coûteux spécifiques et nécessaires au calcul quantique et les mettre à disposition des communautés des technologies quantiques », résume Tristan Meunier, directeur de recherche CNRS à l'Institut Néel et membre du conseil scientifique du pôle.

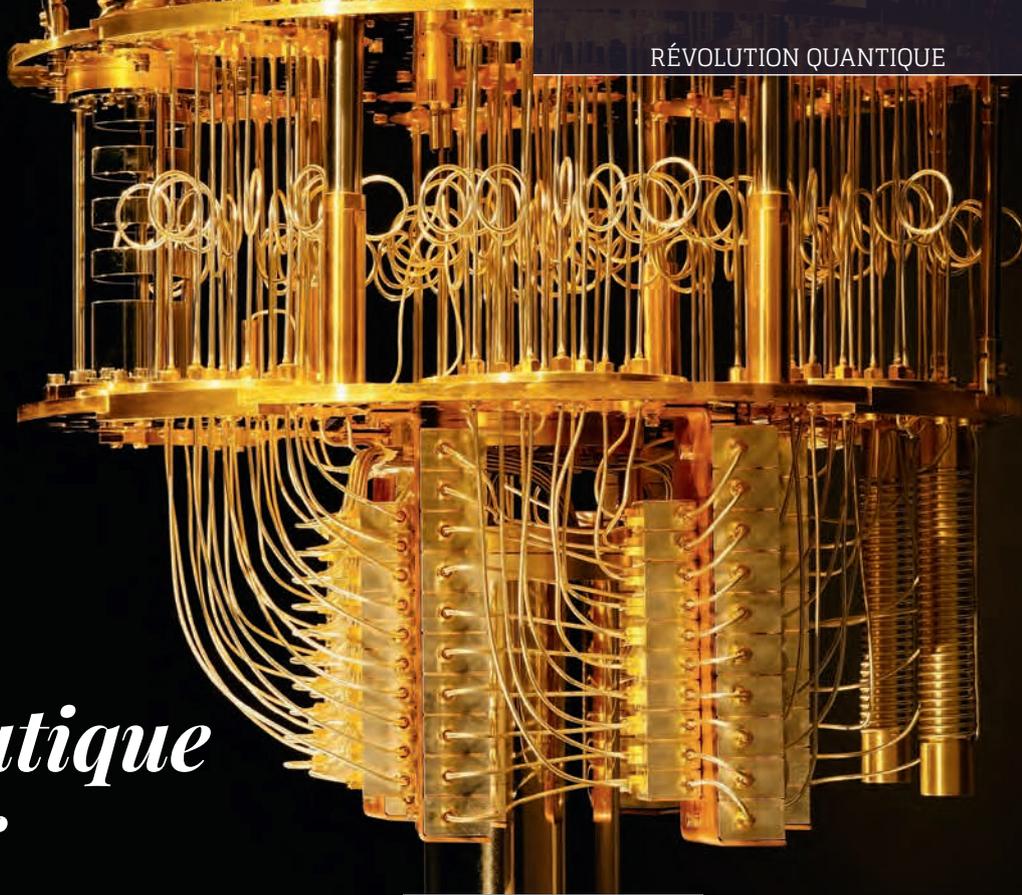
### Une petite communauté

« Les moyens nationaux du Plan Quantique vont changer la donne, confirme Eleni Diamanti, car au-delà de la contribution financière, le fait que l'État soutienne l'excellence scientifique française nous donne une légitimité aux niveaux européen et mondial. » Elle espère toutefois des procédures et des instruments financiers « légers pour que les équipes puissent se concentrer sur la recherche », et souhaite que le gouvernement ne soutienne pas uniquement « les grands sites universitaires mais tout l'écosystème français ».

Des revendications partagées par le troisième grand pôle, Quantum, celui de l'université Paris-Saclay, qui fait également partie du réseau académique Sirteq de la Région Île-de-France. « Une des spécificités des technologies quantiques est que la communauté est petite et que les moyens nécessaires pour entrer dans la course sont énormes : nous n'avons donc pas besoin d'appels à projet car nous connaissons ce sur quoi chacun travaille et les nouveaux acteurs sont rares », assure Pascale Senellart, directrice de recherche CNRS au Center for Nanoscience and Nanotechnology<sup>5</sup> et coordinatrice de Quantum, dont le périmètre devrait bientôt s'élargir aux membres de l'Institut polytechnique de Paris situé également sur le plateau de Saclay. Avec l'annonce du Plan Quantique, la France a enfin toutes les clés en main pour accélérer les technologies quantiques. ■ S.F.

3. Lire notre article : <https://bit.ly/3dqGeuL> 4. Unité CNRS/Sorbonne Université 5. Unité CNRS/Université Paris-Saclay.

# Une informatique à réinventer



Réfrigérateur à dilution de l'ordinateur quantique à circuits supraconducteurs construit par IBM.

© G. CARLOW / IBM RESEARCH

Longtemps resté une simple idée de physicien, l'ordinateur quantique, qui promet de révolutionner le calcul, devient une réalité de plus en plus tangible. L'arrivée des tout premiers appareils pose d'excitants défis aux chercheurs, qui doivent notamment écrire une nouvelle informatique.

**A**u cœur d'une course planétaire, impliquant aussi bien des laboratoires publics que des multinationales privées, l'ordinateur quantique, imaginé au début des années 1980 par le Nobel de physique Richard Feynman, amorce une incroyable révolution. Mais au milieu des promesses et des grandes annonces, difficile de savoir où en est vraiment cette technologie et quelles seront ses véritables applications.

Contrairement à un ordinateur classique et aux appareils similaires, comme les smartphones, un système quantique n'utilise pas des bits à deux

valeurs, qui sont zéro ou un (lire encadré p. 17). Il est basé sur des qubits qui, grâce aux propriétés uniques aux objets quantiques, présentent des états différents de plus en plus nombreux au fur et à mesure qu'on ajoute de nouveaux qubits. Ainsi, chaque qubit supplémentaire double la puissance de l'ensemble. Cette force de frappe n'est cependant pas adaptée à toutes les situations.

## La suprématie quantique n'est pas systématique

« L'ordinateur quantique n'est pas juste un ordinateur qui va plus vite, son fonctionnement particulier n'a pas le même effet selon la nature des problèmes qu'il tente de résoudre, insiste Frédéric Magniez, directeur de recherche à l'Institut de recherche en informatique fondamentale (Irif)<sup>1</sup> et titulaire de la chaire annuelle Informatique et sciences numériques au Collège de France. Certains cas vont présenter une accélération exponentielle du temps de

calcul, mais il peut aussi n'y avoir aucune différence. » On parle de suprématie quantique dans les situations où cette technologie est plus efficace, y compris avec un nombre limité de qubits, que les supercalculateurs actuels les plus performants.

Pour cela, un équipement adapté est bien évidemment nécessaire. Un consortium européen s'est ainsi monté sous le nom de « *High performance computer and quantum simulator hybrid* ». Il permettra de partager, via une plateforme en ligne, la puissance d'un appareil fourni par Pasqal, une start-up liée au CNRS par le Laboratoire Charles Fabry<sup>2</sup> (lire page 22). Son processeur compte cent qubits, obtenus en contrôlant des atomes refroidis par laser et manipulés par des pinces optiques.

« L'ordinateur quantique, en tant qu'objet macroscopique disposant d'une mémoire au moins comparable aux tout premiers ordinateurs binaires et capables de répondre à différents

1. Unité CNRS/Université de Paris. 2. Unité CNRS/Institut d'Optique Graduate School. 3. Unité CNRS/Université de Lorraine/Inria.

## Une collaboration CNRS atteint l'avantage quantique

Trouver des applications où un ordinateur quantique surpasse le meilleur supercalculateur « classique » : tel est l'objet de la course à la suprématie quantique. Google a affirmé l'avoir atteint en 2019, suivi d'un groupe de l'Université de science et de technologies de Chine. Grâce à un article publié le 8 février dans *Nature Communications*, une équipe de chercheurs du CNRS, de l'université d'Édimbourg et de l'entreprise QC Ware est entrée dans ce carré VIP si convoité. « Pour nos travaux, je préfère le terme "d'avantage quantique algorithmique" à la "suprématie quantique", prévient Eleni Diamanti, coauteure de l'étude et directrice de recherche au Laboratoire d'informatique de Paris 6. L'appareil conçu par Google ne sait remplir qu'une tâche précise, mais il a vocation à évoluer vers un ordinateur quantique universel. Notre machine se rapproche de celle de l'équipe chinoise, soit un processeur adapté à des situations très spécifiques. » Ici, les scientifiques se sont intéressés aux ordinateurs quantiques qui seront accessibles via un cloud, ce qui devrait être leur mode d'utilisation le plus courant

dans les prochaines années. « Tout comme nous n'avons pas de supercalculateur à la maison, les ordinateurs quantiques vont surtout être disponibles au début en ligne », affirme Iordanis Kerenidis, coauteur des travaux, directeur de recherche à l'Institut de recherche en informatique fondamentale et directeur du département international d'algorithmique quantique chez QC Ware. Un tel service aura surtout des applications pour la logistique et les modèles d'apprentissage pour intelligences artificielles. Mais là encore, il faut d'abord prouver que le système quantique est bien le plus efficace. Les chercheurs ont ainsi atteint un avantage quantique avec leur algorithme... qui prouve l'avantage quantique d'autres algorithmes ! « En seulement quelques secondes, nous pouvons vérifier si un système fait

mieux qu'un ordinateur classique, se réjouit Iordanis Kerenidis. Notre solution algorithmique permet de savoir si le système a la capacité de fournir une solution au problème, sans avoir à le résoudre pour autant. »

« Le cœur de nos travaux a été d'innover pour trouver le bon algorithme, résume Eleni Diamanti. Nous l'avons ensuite mis en œuvre et prouvé son avantage quantique, en alliant théorie et expérience. » Le système utilisé fonctionne avec des photons, qui portent des qubits générés par un laser et manipulés par un circuit optique. L'appareillage, relativement modeste, a l'avantage d'être reproductible dans la plupart des laboratoires d'optique de pointe. M.K.

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

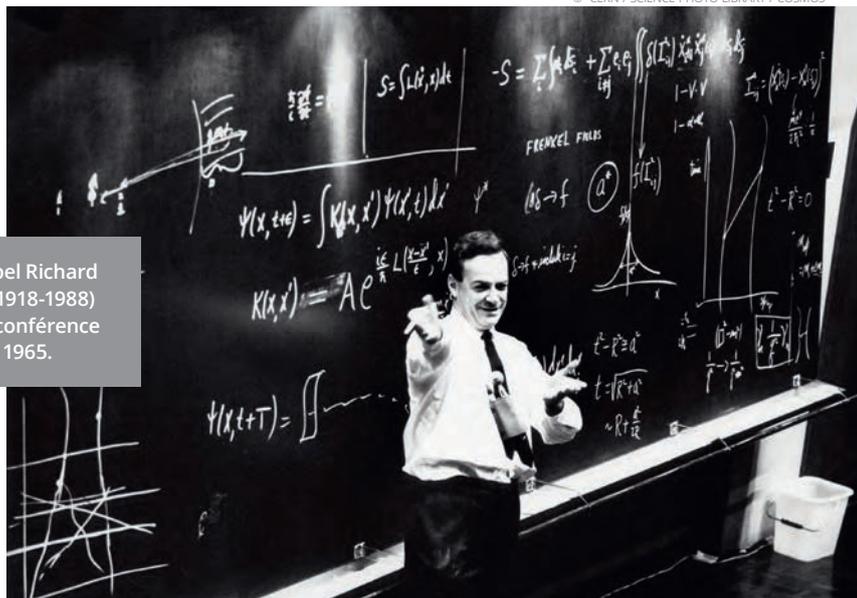
... types de problèmes, n'existe pas encore, affirme Frédéric Magniez, qui participe au consortium. Nous sommes plutôt en présence de calculateurs spécialisés, pour lesquels il faut trouver pour quelles tâches bien précises ils atteignent la suprématie quantique. »

Si les chercheurs ont préparé le terrain théorique depuis de nombreuses années, il leur faut à présent développer les méthodes et outils nécessaires avant de commencer à écrire de vrais programmes. Chaque type d'algorithme doit être transposé au monde quantique, mais après s'être assuré qu'il y a bien un intérêt à le faire (lire encadré p. 18). Et même si c'est le cas, il faut aussi vérifier à partir de combien de qubits l'avantage quantique est réel.

**Une nouvelle informatique dédiée au monde quantique**

Un véritable travail de fourmis attend ainsi les scientifiques et les ingénieurs. Certains thèmes semblent déjà prometteurs : la machine learning, l'optimisation de systèmes complexes, les simulations, etc. Plusieurs chercheurs prennent comme exemple des modèles de distribution de l'électricité en hiver, où le fournisseur doit pouvoir livrer tous les usagers dans un contexte tendu, et sans causer un effondrement du réseau. Des problèmes plus fondamentaux seront également abordés.

« L'objectif le plus intéressant de la plateforme est d'apprendre comment programmer et utiliser une telle machine, s'enthousiasme Simon Perdrix, chargé de recherche au Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications<sup>3</sup> et membre du consortium européen. Nous allons devoir développer des langages et des solutions logicielles spécialement dédiés au monde quantique, car on ne peut pas simplement dupliquer ce qui est déjà disponible pour un ordinateur traditionnel. » Simon Perdrix souhaite également tester des algorithmes quantiques théoriques : trouver comment les implémenter sur un vrai appareil et voir s'ils fonctionnent aussi bien que prévu. Jusqu'à présent, ces objets étaient



Le Prix Nobel Richard Feynman (1918-1988) lors d'une conférence au Cern en 1965.

*“L'ordinateur quantique n'est pas juste un ordinateur qui va plus vite, son fonctionnement particulier n'a pas le même effet selon la nature des problèmes qu'il tente de résoudre.”*

**La puissance de la superposition et de l'intrication**

Comme son nom l'indique, un ordinateur quantique tire parti des lois de la mécanique quantique, une théorie qui décrit les phénomènes physiques à l'échelle atomique. Ces étonnantes lois autorisent une particule, un atome ou une molécule à se trouver dans différents états en même temps – on parle d'états superposés. Ainsi, alors que dans un ordinateur ordinaire, les informations sont codées sous la forme de bits qui ne peuvent prendre que deux valeurs, 0 ou 1, selon le passage ou non de courant électrique à travers un transistor, les bits quantiques (ou qubits) peuvent simultanément prendre les valeurs 0 et 1. Qui plus est, lorsque deux qubits interagissent, leurs états physiques « s'enchevêtrent », si bien que les deux systèmes ne peuvent plus être décrits de façon indépendante – on parle d'états intriqués. J. B

étudiés sur des simulateurs tournant sur des ordinateurs puissants, mais classiques.

« Il faut encore travailler de concert sur les deux types d'ordinateurs, explique Tristan Meunier, directeur de recherche à l'Institut Néel du CNRS. On ne peut pas utiliser Windows sur un ordinateur quantique, et, même si on y arrivait, ce serait terriblement peu efficace. » Tristan Meunier ne participera pas au consortium européen et se focalise sur une approche différente, basée sur des puces en silicium. Elles sont exposées à des températures extrêmement basses pour atteindre un comportement quantique. Ce sont alors des électrons, et non des atomes comme chez Pasqal, qui servent de qubit.

Mais dans tous les cas, les problèmes sont les mêmes : trouver pour quel contexte et comment passer sur des systèmes quantiques.

« La difficulté vient que les algorithmes théoriques considèrent qu'ils vont tourner sur des systèmes quantiques quasi parfaits, poursuit Tristan Meunier. Or les machines commettent beaucoup d'erreurs. »

### Plus de cohérence, moins d'erreurs

En effet, malgré leur réputation de surpuissance un brin futuriste, les ordinateurs quantiques se trompent énormément et perdent encore une part importante de leur puissance à identifier et vaincre ces difficultés. Certains modèles n'ont même pas assez de ressources pour se corriger eux-mêmes, un déséquilibre qui s'aggrave au fur et à mesure qu'ils gagnent en puissance pour essayer de régler le problème.

Ces erreurs sont provoquées par le phénomène de décohérence, où un système quantique est perturbé par des interactions parasites avec le monde extérieur. Or, pour utiliser les propriétés de particules enfermées dans des « boîtes », il faut bien en ouvrir un minimum le couvercle. Tous les qubits ne sont ainsi pas égaux, car la manière dont ils sont obtenus joue sur ces difficultés.

« Augmenter les propriétés de cohérence des systèmes quantiques est un des points cruciaux du domaine, souligne Tristan Meunier. Plus on garde longtemps la cohérence sur un grand nombre de qubits, et plus le potentiel de

calcul est important. Pour cela, l'environnement de la particule doit être mieux compris, car un système n'est jamais parfaitement isolé. »

Le chantier de l'ordinateur quantique est ainsi encore loin d'être terminé. « Ma chaire au Collège de France aidera à apporter ces connaissances à un public plus large et j'adapterai le niveau pour que les gens puissent s'en faire une idée précise, sur des fondements solides, explique Frédéric Magniez. En effet, il faut amorcer dès maintenant la formation de futurs cher-

cheurs et des ingénieurs, puis leur offrir des postes permanents, si l'on veut rester dans la course face au Canada, aux États-Unis, au Japon ou à la Chine. »

Le scientifique rappelle que c'est un physicien français, Alain Aspect<sup>4</sup>, qui a mené en 1980 une des principales expériences sur l'existence d'une mécanique quantique. « Un groupe s'est ensuite développé dans les années 1990 à Orsay autour de Miklos Santha<sup>5</sup>, dont j'étais l'étudiant avant d'être recruté au CNRS. Nous étions alors une dizaine d'experts, formés en France, à réaliser des travaux très fondamentaux avant que les technologies quantiques ne deviennent plus à la mode. Pour continuer d'avancer, nous avons toujours besoin de cet esprit de recherche pérenne et libre. » ■ M.K.

Dans la salle blanche de l'Institut Néel, le faisceau d'un microscope électronique à balayage permet de fabriquer et d'étudier les circuits dédiés à la physique fondamentale ou à l'informatique quantique.



## La vitesse de calcul des algorithmes quantiques

Dès les années 1990, les chercheurs ont proposé des algorithmes pour de tels ordinateurs. Et démontré mathématiquement que mis en œuvre sur ces machines, ils réaliseraient effectivement certains calculs à une vitesse dépassant tout ce qu'on pourrait imaginer avec un ordinateur classique. Ainsi, en 1994, le mathématicien américain Peter Shor, du MIT, présente un algorithme avec lequel il serait possible de factoriser n'importe quel nombre, c'est-à-dire le décomposer en un produit de nombres premiers, en un temps record. De quoi casser la plupart des systèmes de cryptographie actuels, du chiffrement de nos transactions bancaires aux codages permettant d'échanger des secrets d'État, qui

reposent précisément sur l'explosion en temps de calcul de la factorisation pour des nombres de plus en plus grands. Un problème de ce genre qui prendrait plusieurs milliards d'années à un ordinateur classique serait ainsi résolu en quelques minutes par un ordinateur quantique ! De même, en 1997, Lov Grover, des laboratoires Bell, démontre avec son algorithme qu'un ordinateur quantique pourrait considérablement augmenter l'efficacité des algorithmes classiques utilisés pour la recherche d'informations sur une base de données. Par exemple, la recherche d'un élément parmi dix mille données nécessiterait seulement une centaine d'étapes, contre dix mille pour un ordinateur traditionnel. Le gain de temps pour le traitement des données massives serait considérable. On comprend alors l'intérêt de sociétés comme Google pour cette nouvelle technologie. J. B

4. Professeur titulaire à l'Institut d'Optique, directeur de recherche émérite au CNRS et professeur à l'École polytechnique. 5. Actuellement directeur de recherche à l'Irif.

© CYRIL FRESILLON / SYRTE / FIRST-TF / CNRS PHOTOTHÈQUE

# Les capteurs, l'autre révolution quantique

Médecine, génie civil, télécommunications, gestion des ressources naturelles...

Les capteurs quantiques, qui ont une sensibilité et une précision uniques, s'appêtent à révolutionner la détection dans de nombreux domaines.

**R**épérer dans le sous-sol chaque canalisation ou chaque cavité, prévoir une éruption volcanique, ou encore observer l'activité cérébrale dans ses moindres détails... Telles sont quelques-unes des alléchantes promesses offertes par les capteurs quantiques. De toutes les technologies quantiques actuellement en développement, ils sont aujourd'hui parmi les plus aboutis. Certains d'entre eux commencent à sortir des laboratoires et même à être commercialisés !

Au cœur de ces dispositifs, on trouve des objets microscopiques (photons, atomes, électrons...) que les physiciens savent désormais manipuler parfaitement et placer à la demande dans tel ou tel état quantique. Or, ces états quantiques sont extrêmement sensibles à la moindre perturbation de l'environnement. C'est sur ce principe même que s'appuient les capteurs quantiques et qui explique leur exceptionnelle sensibilité à de minuscules signaux de différentes natures, que ce soit l'attraction gravitationnelle d'un objet situé sous nos pieds ou des champs magnétiques émis par notre cerveau.

Microcircuit à atomes du gyromètre GyrAChip élaboré dans l'objectif de créer un système de navigation inertielle sans GPS de quelques centimètres cubes.

## Les interféromètres à atomes

Premiers capteurs quantiques à tirer leur épingle du jeu : les interféromètres à atomes. Dans ces dispositifs développés initialement pour la recherche fondamentale et la métrologie, on refroidit par laser un nuage d'atomes – composé de quelques millions de particules – à des températures très basses, environ un millionième de degré au-dessus du zéro absolu. « Dans ces conditions, les atomes se déplacent tellement lentement qu'il devient possible de mesurer avec une très grande précision les forces auxquelles ils sont soumis : une accélération ou une rotation », explique Arnaud Landragin, directeur du laboratoire Systèmes de référence temps-espace<sup>1</sup> et lauréat de la médaille de l'innovation 2020 du CNRS.

Avec ces instruments, on peut mesurer en particulier l'accélération de la pesanteur (g) – on parle alors de gravimètre atomique. « La mesure est extrêmement précise : on parvient à détecter des fluctuations de g de l'ordre d'un pour un milliard, soit la variation de pesanteur quand on s'élève de trois millimètres par rapport à la surface de la Terre ! », note Philippe Bouyer, directeur du Laboratoire photonique, numérique, nanosciences<sup>2</sup>.

## Des gravimètres atomiques ultra-stables

Une telle précision ouvre la voie à de nombreuses applications, une mesure fine de la gravité fournissant en effet de précieuses informations sur la composition du sol. Une

1. Unité CNRS/Observatoire de Paris-PSL/Sorbonne Université. 2. Unité CNRS/Institut d'optique graduate school/Université de Bordeaux.

masse de granite ou un réservoir d'eau souterraine, par exemple, auront des densités différentes et contribueront à des valeurs de g légèrement différentes en surface. De quoi faciliter la prospection et la gestion des ressources naturelles.

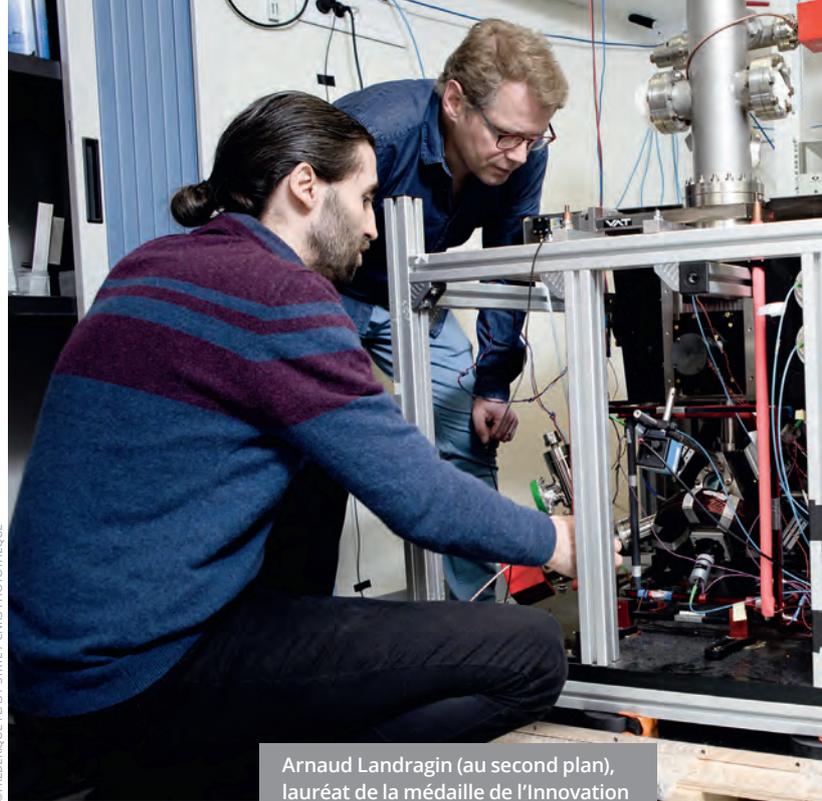
Avec un tel potentiel, les chercheurs travaillent d'arrachepied pour faire sortir leur dispositif des laboratoires. C'est le cas d'Arnaud Landragin et Philippe Bouyer qui ont décidé de créer la société Muquans en 2011. Aujourd'hui, l'entreprise française est la seule au monde à commercialiser ce genre de senseurs. Un de ses gravimètres a même été installé cet été au sommet de l'Etna, dans le cadre du projet européen Newton-g, pour suivre les déplacements de magma, avec l'objectif de relier ces derniers à l'activité du volcan et peut-être de prévoir un jour ses éruptions.

L'instrument de Muquans, qui consiste en un cylindre de 70 cm de haut et un second module un peu plus grand pour l'électronique et les lasers, est relativement compact. En termes de taille, seul un autre type de gravimètre, constitué d'une masse suspendue au bout d'un ressort, fait mieux. Facilement transportable, c'est ce dispositif qui est aujourd'hui le plus utilisé sur le terrain. « *Le problème, c'est qu'il fournit une mesure qui dérive dans le temps, si bien qu'il faut revenir le calibrer régulièrement. Au contraire, le gravimètre atomique donne une mesure absolue qui reste stable dans le temps, puisque son fonctionnement s'appuie sur les lois de la physique quantique* », avance Arnaud Landragin. « *D'ici à quatre ans, notre instrument devrait être deux fois moins lourd, 50 kg contre 100 aujourd'hui. De quoi élargir encore davantage son domaine d'utilisation* », se réjouit Bruno Desruelle, président de Muquans.

### Des gradiomètres pour détecter les cavités enfouies

Dans les laboratoires et les entreprises comme Muquans, on travaille actuellement à la conception d'un nouvel instrument, sorte de version améliorée du gravimètre : le gradiomètre. Celui-ci permet de s'affranchir des vibrations du sol qui peuvent venir perturber la mesure. Pour cela, on utilise deux nuages d'atomes soumis aux mêmes vibrations mais tombant de deux hauteurs différentes. En comparant le signal des deux nuages, on peut soustraire le bruit parasite tout en obtenant une mesure du gradient de gravité.

“*Les interféromètres atomiques pourraient servir à mettre au point un système de navigation qui continuerait de fonctionner même en l'absence de signal GPS.*”



©FRÉDÉRIQUE PLAS / SYRTE / CNRS PHOTOTHÈQUE

Arnaud Landragin (au second plan), lauréat de la médaille de l'Innovation du CNRS 2020 et Leonid Sidorenkov, du laboratoire Syrte, près d'une source d'atomes froids.

« *Le gradiomètre permet ainsi de détecter des petites masses situées à une faible profondeur, alors que le gravimètre est sensible à des masses importantes à grande profondeur* », précise Bruno Desruelle. Ce senseur pourrait faciliter la vie des entreprises de génie civil et de construction, en repérant une ancienne mine ou en localisant des canalisations sous la chaussée.

### Des accéléromètres qui ne dérivent pas

Ayant plus d'une corde à leur arc, les interféromètres atomiques pourraient également servir à mettre au point un système de navigation qui continuerait de fonctionner même en l'absence de signal GPS – un impératif pour les forces armées notamment. Un tel système autonome existe déjà : il consiste à utiliser des accéléromètres – qui mesurent l'accélération du véhicule – et des gyromètres – qui mesurent sa rotation – pour déterminer en permanence sa direction et sa vitesse de déplacement, et ainsi remonter à sa position. Mais tout comme les gravimètres à ressort, ces instruments dérivent dans le temps. Dans un avion de ligne, par exemple, l'instabilité de ces capteurs inertiels se traduit par une erreur d'une centaine de mètres après une heure de vol. « *Parce qu'ils sont intrinsèquement stables, les accéléromètres et les gyromètres à atomes permettraient un guidage beaucoup plus précis* », souligne Philippe Bouyer. Ces centrales inertiels atomiques fonctionnent aujourd'hui, mais uniquement dans les laboratoires.

### Des diamants de synthèse pour mesurer le champ magnétique

Autres capteurs quantiques extrêmement prometteurs : les centres NV (pour « *nitrogen vacancy* »), de microscopiques défauts logés à l'intérieur de diamants de synthèse, capables

de détecter de très faibles champs magnétiques. Ces impuretés formées d'un atome d'azote et d'une lacune, à la place de deux atomes de carbone, se comportent comme des atomes uniques : excitées par un laser vert, elles émettent de la lumière rouge, dont l'intensité dépend de l'état de spin – un moment magnétique quantique que l'on peut se représenter comme une petite aiguille aimantée, donc sensible à un champ magnétique – des électrons piégés à leur voisinage. En envoyant des ondes micro-ondes à la bonne fréquence, on peut créer une superposition de ces états quantiques et on enregistre alors un changement de la quantité de lumière émise. Or, la présence d'un champ magnétique extérieur va écarter la position des états de spin et ainsi modifier cette fréquence dite de résonance – d'une valeur proportionnelle à l'intensité du champ. En mesurant la lumière rouge reçue, on peut ainsi remonter précisément à la valeur du champ magnétique.

« Le premier avantage des centres NV est leur simplicité de mise en œuvre : ils fonctionnent à température ambiante et ne nécessitent donc pas un lourd appareillage cryogénique, comme c'est le cas d'autres systèmes. Cela permet d'envisager de nombreuses applications », souligne Thierry Debuisschert, responsable de l'activité centres NV chez Thales. L'autre atout de ces atomes artificiels est leur taille. On sait aujourd'hui fabriquer de minuscules diamants de quelques dizaines de nanomètres contenant un seul centre NV. Placez un tel diamant au bout d'une pointe en silicium et approchez-le très près d'un matériau et vous obtenez un nouveau type de microscope, capable de déterminer en détail les propriétés magnétiques de l'objet en balayant sa surface. « Avec ce microscope, on peut faire une mesure très fine du champ magnétique d'un matériau avec une résolution de quelques dizaines de nanomètres. C'est unique », lance Vincent Jacques, du Laboratoire Charles Coulomb<sup>3</sup>, qui a réalisé en 2012 avec son équipe les premières images magnétiques par microscopie à centre NV. Depuis cette démonstration, plusieurs start-up se sont lancées dans le développement de ces microscopes d'un nouveau genre et les premiers prototypes commerciaux sont désormais disponibles à la vente.

### Un nouveau procédé d'imagerie à échelle de cellule

En biologie et en chimie, les applications sont également prometteuses. Comme les centres NV sont contrôlables à température ambiante et que le diamant n'est pas toxique, il est en effet possible de placer directement, sans les endommager, des cellules ou des molécules sur la surface d'un diamant de quelques millimètres, dans lequel on a implanté de nombreux centres NV – ce qui booste sa sensibilité au champ magnétique. L'idée consiste alors à mesurer la résonance magnétique nucléaire (RMN) de ces échantillons, c'est-à-dire les champs magnétiques oscillants produits par les spins des noyaux atomiques. « L'avantage par rapport aux autres techniques de RMN, c'est qu'on est sensible à quelques spins, voire à un seul », précise Thierry Debuisschert, qui coordonne le projet européen Asteriqs dont le but est d'explorer

de nombreuses pistes d'utilisation et d'amélioration des centres NV. *Cela permet de caractériser des cellules ou des molécules uniques* ». On espère utiliser un jour ces capteurs pour analyser en détail l'activité du cerveau, ou encore étudier finement la structure d'une protéine dans l'espace, ce qui serait un atout considérable pour concevoir de nouveaux médicaments.

Chez Thales, une utilisation très originale de ces senseurs quantiques est en cours de développement. « Plutôt que d'utiliser les centres NV pour détecter un champ magnétique, on peut faire l'inverse : appliquer un champ magnétique sur le diamant afin d'identifier les fréquences micro-ondes présentes dans l'environnement », explique Thierry Debuisschert. Le dispositif devient alors un analyseur de spectre, capable de reconnaître simultanément et en temps réel des centaines de fréquences différentes dans le domaine des ondes radar.

À terme, cet outil pourrait être utilisé par les militaires pour intercepter des communications ou identifier une menace (signature d'un radar, d'un missile). Au quotidien, il permettrait aussi d'améliorer les télécommunications mobiles. Le prototype de laboratoire mis au point par le groupe français a déjà démontré tout l'intérêt de la technique. Et l'équipe travaille désormais à réduire sa taille et augmenter sa sensibilité, pour pouvoir, d'ici à cinq ans environ, proposer un capteur digne de ce nom.

Ces défauts du diamant n'ont pas fini de faire parler d'eux. D'autant que les scientifiques commencent à explorer leur capacité – toujours grâce à leurs états de spin – à mesurer également de minuscules champs électriques et d'infimes variations de température et de pression. Bref, ce serait le détecteur ultime. Avec leurs multiples facettes, l'avenir des capteurs quantiques s'annonce radieux. || J.B.

Gravimètre Muquans installé au sommet de l'Etna.



©MILQUANS

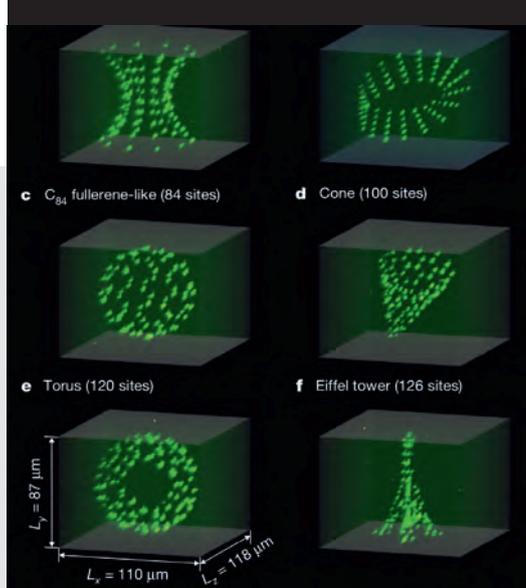
3. Unité CNRS et Université de Montpellier.

## Pasqal, en tête des processeurs quantiques

La start-up Pasqal, issue du Laboratoire Charles Fabry<sup>1</sup>, s'est spécialisée dans l'agencement de processeurs quantiques basés sur des atomes refroidis par laser afin d'obtenir davantage de Qubit. « *Les technologies utilisées par Google et IBM, à base de supraconducteurs, sont les plus prometteuses à court terme, mais n'arrivent pas à passer à de plus grandes échelles, explique Georges-Olivier Raymond, PDG de Pasqal. Les solutions centrées sur les photons ou le silicium permettront d'augmenter le nombre de qubits, mais cela pourrait prendre des dizaines d'années. Pasqal répond à ces défis en contrôlant des atomes refroidis par laser et piégés dans des matrices de pinces optiques. En France, nous avons un savoir-faire impressionnant sur ces questions, avec par exemple les prix Nobel de Claude Cohen-Tannoudji et Serge Haroche.* »

Les cofondateurs de Pasqal, chercheurs au CNRS, ont ainsi atteint quarante-neuf qubits en 2018, plus de cent aujourd'hui et visent le millier d'ici peu. Par comparaison, la machine de Google possède soixante-douze qubits. Fort de cette réussite, Pasqal prépare une ambitieuse levée de fonds de dix millions d'euros sur les trois prochaines années. Et la start-up a répondu à un appel d'offres pour équiper un supercalculateur européen, ce qui en ferait la première société au monde à vendre et installer un processeur quantique sur un tel appareil. ▮

1. Unité CNRS/Institut d'Optique Graduate School.



Images de matrices d'atomes organisés en 3D, reproduisant différentes formes comme une tour Eiffel. Chaque point vert correspond au signal de fluorescence d'un atome unique.

©CNRS - NATURE VOLUME 561, PAGES79-82 (2018)

## Les start-up françaises parées pour la transition quantique

Nouvelles machines, découverte d'applications inédites... la concrétisation des ordinateurs quantiques provoque une véritable effervescence dans la recherche internationale. Voici quatre exemples de start-up issues de laboratoires CNRS, bien positionnées dans cette aventure.



Générateur de qubits de deuxième génération créé par la start-up Quandela.

### Quandela, générateur de qubits photoniques

La start-up Quandela a fait le pari des qubits photoniques. Cette approche permet pour l'instant l'exploitation simultanée d'une dizaine d'entre eux. L'encodage de l'information quantique se fait à température ambiante,

seulement, une température mille fois moins basse que pour les solutions de Google ou IBM. La consommation énergétique est également fortement réduite. « *Nous avons l'avantage de bénéficier des technologies photoniques, très développées grâce aux applications numériques comme la fibre optique, souligne Valérian Giesz, PDG de Quandela. Nous réutilisons ce savoir-faire et ces technologies, et la plupart des composants dont nous avons besoin sont déjà*

*disponibles.* » Ils emploient en effet des boîtes quantiques d'une centaine d'atomes, qu'ils miniaturisent et stabilisent davantage. « *Nos travaux sont anciens au Centre de nanosciences et de nanotechnologies<sup>1</sup>, mais nous avons décidé de fonder Quandela en 2015 alors que le domaine quantique n'était pas encore bien considéré* », se souvient Valérian Giesz. Le chiffre d'affaires de Quandela, 100 000 euros en 2019, a triplé en 2020 malgré la crise sanitaire. Et une levée de fonds est en cours pour aller, à partir de la génération de qubits, jusqu'à un ordinateur quantique complet. Quandela fournit actuellement des sources de photons pour le projet européen de plateformes de calcul quantique Phoquising. ▮

1. Unité CNRS/Université Paris-Saclay.

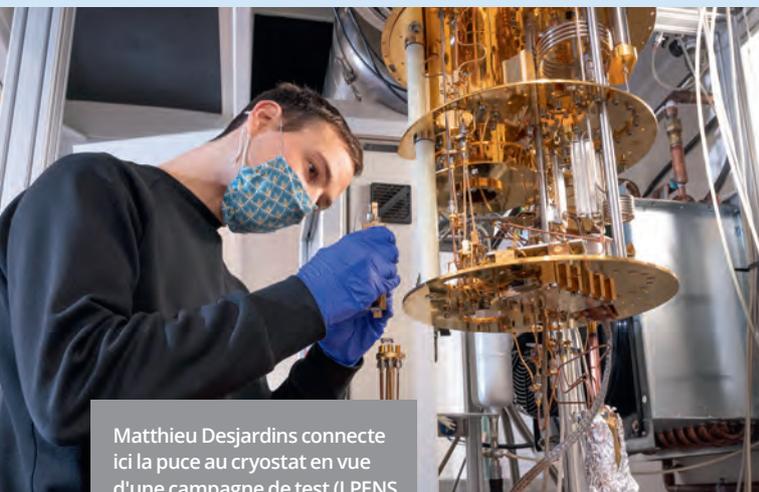
## C12 Quantum Electronics, des nanotubes de carbone pour réduire les erreurs

Faire tourner des spin qubits dans des nanotubes de carbone suspendus, un matériau dont l'interface minimale avec l'environnement extérieur réduit drastiquement le taux d'échec, c'est l'idée de C12 Quantum Electronics pour réduire les erreurs<sup>1</sup> commises par les premiers prototypes d'ordinateurs quantiques. « L'industrie attend une démonstration de qubit avec des temps de cohérence suffisamment longs pour une calculabilité satisfaisante », déclare Pierre Desjardins, PDG de C12 Quantum Electronics. La start-up vise

en effet les machines de type NISQ : *noisy intermediate scale quantum*, c'est-à-dire des machines quantiques qui montrent l'avantage quantique, malgré les erreurs, en approximant très rapidement des solutions avec une précision adéquate pour des applications industrielles. « Nous avons développé un système breveté pour transférer, sous vide, les nanotubes de carbone sur une puce, affirme Pierre Desjardins. Cette technologie nous a déjà fait gagner un facteur dix sur le nombre d'erreurs, notre roadmap s'attaque aux

autres sources de problèmes. » La start-up, pour laquelle une levée de fonds a été réalisée auprès de Business angels, a recruté cinq personnes en plus de ses cinq cofondateurs. « Nous voulons porter le nombre de qubits sur nos puces à cinq d'ici à fin 2021, avance Pierre Desjardins. Avec une fidélité globale qui en ferait le nouveau standard quantique sur semiconducteurs, avant de commercialiser des processeurs complets en 2025. » ||

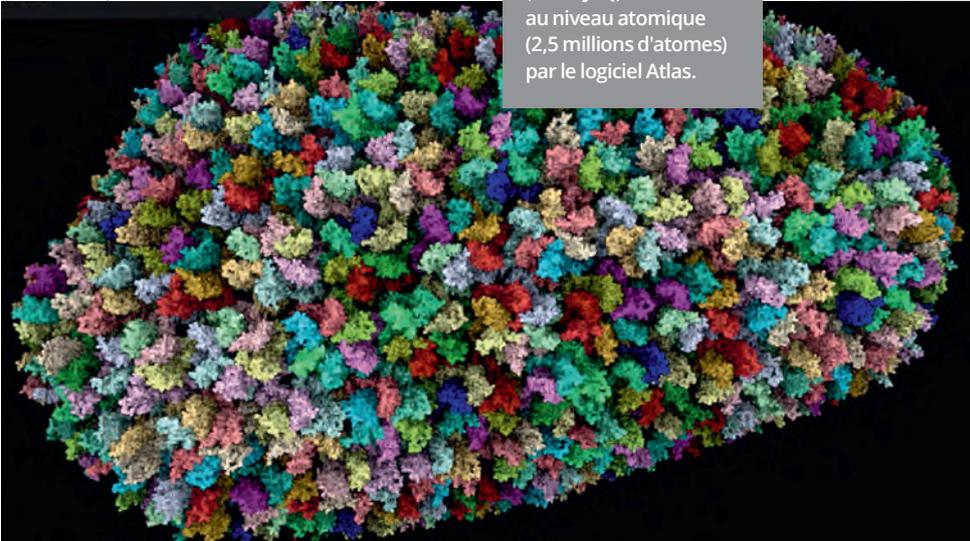
1. Lire aussi « Alice&Bob, correcteur de l'ordinateur quantique », dans *CNRS Le Journal*, n° 301, p. 18



©HUBERT RAGUIET / C12 QUANTUM ELECTRONICS / LPENS / CNRS PHOTO THÈQUE

Matthieu Desjardins connecte ici la puce au cryostat en vue d'une campagne de test (LPENS Paris, Laboratoire de physique mésoscopique).

Structure complète de la capsid du virus HIV-1 (PDB 3J3Q) visualisée au niveau atomique (2,5 millions d'atomes) par le logiciel Atlas.



## Qubit Pharmaceutical, des simulations prédictives

Qubit Pharmaceutical s'attache aux applications en biologie, chimie et pharmacie des technologies quantiques. La start-up gère ainsi Atlas, une plateforme de simulation et de modélisation des interactions entre molécules, principalement pour trouver les meilleurs candidats pour de futurs médicaments. « Toutes les start-up du domaine promettent d'aller plus vite, plus fort, plus loin, mais cela se fait très souvent au prix de la précision, explique Robert Marino, CEO de Qubit Pharmaceutical. Nos modélisations ont si peu de marge d'erreur qu'elles sont réellement prédictives, sans faire l'impasse sur la vitesse. » L'entreprise est en effet bâtie sur les travaux de Jean-Philip Piquemal, directeur du Labo-

ratoire de chimie théorique<sup>1</sup>, qui a optimisé les algorithmes pour du calcul haute performance afin de gagner plusieurs ordres de grandeur en termes de rapidité et de fiabilité. « Beaucoup de start-up avec l'étiquette "quantique" n'ont pas forcément la possibilité de faire tourner leurs travaux en conditions réelles, note Jean-Philip Piquemal. Grâce à l'écosystème français, où nous nous connaissons tous, nous avons un accès concret à des ordinateurs quantiques et un pied dans la transition. » || M. K.

1. Unité CNRS/Sorbonne Université.



**1. Ces reconstitutions virtuelles montrent comment de petites embarcations atteignaient par centaines le port de Rome, le plus grand de la Méditerranée sous l'Empire romain, afin d'y acheminer par voie fluviale des denrées indispensables à la vie de la cité et de son million d'habitants.**

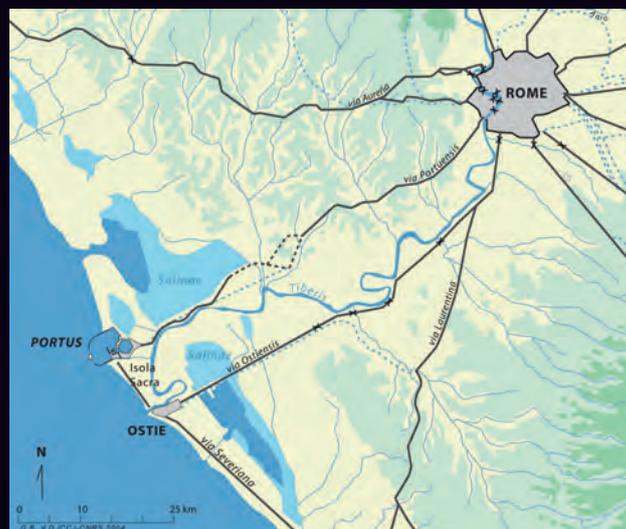
# Les voiliers de la Rome antique remis à flot !

SOCIÉTÉS

NUMÉRIQUE

**Archéologie.** Grâce à des modèles 3D<sup>1</sup>, des chercheurs ont remis virtuellement à flot des embarcations qui circulaient il y a deux mille ans dans le port de Rome. Coordonnés par Giulia Boetto, archéologue navale<sup>2</sup>, et avec l'aide de la start-up marseillaise Ipso Facto<sup>3</sup>, ces travaux offrent une reconstitution de cinq épaves mises au jour lors de fouilles dans les années 1950. À la clé : une meilleure connaissance du fonctionnement de la cité et de précieuses archives pour la restauration future de ces pièces uniques conservées au musée de Fiumicino.

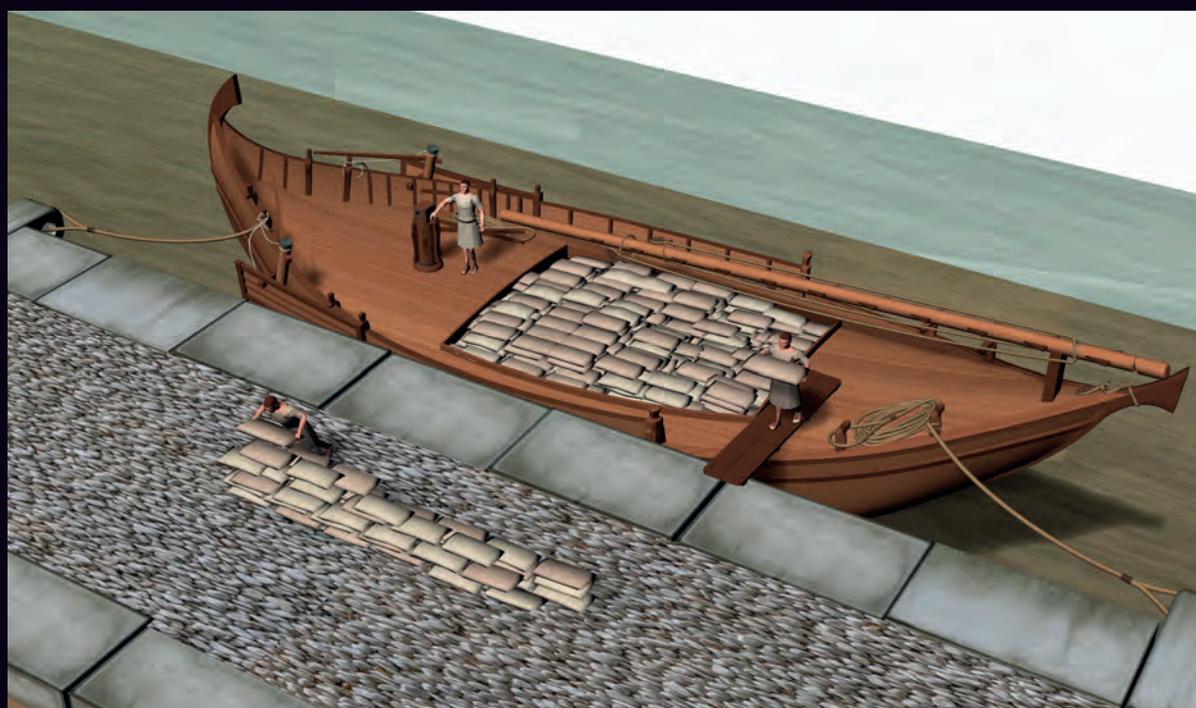
TEXTE MATTHIAS SOMM, AVEC LA RÉDACTION



© G. BOETTO, V. DUMASCO/CNRS

**2.** Les dimensions du système portuaire de Rome ne permettaient pas aux navires qui arrivaient au port ou dans l'embouchure du Tibre d'aller plus loin.

**3.** Des voiliers, bateaux de pêche ou allèges (embarcations à fonds plats accompagnant les gros bâtiments pour les alléger) prenaient donc le relais. Déchargées, les denrées étaient soit stockées dans de proches entrepôts, soit acheminées jusqu'à Rome en remontant le Tibre.



1. Réalisation : Centre Camille Julian, Parco Archeologico di Osta Antica (MiBact, Italie), PA-OANT, Giampaolo Lugio (Rome, pour le compte de PA-OANT), Daniela Peloso (Ipso Facto Marseille), Pierre Poveda (CCJ-Aix-Marseille Université/Ministère de la Culture/Inrap). 2. Au Centre Camille Julian - Histoire et archéologie de la Méditerranée, de la Protohistoire à la fin de l'Antiquité (Unité CNRS/Aix-Marseille Université/Ministère de la Culture/Inrap). 3. Bureau d'étude et de recherche en océanographie et en archéologie subaquatique et sous-marine. Marseille.



© ARCHIVE SBAO - INV. N° R.4120/4

**4.** C'est sur ce chantier de fouilles au nord de l'embouchure du Tibre, près de l'aéroport international de Fiumicino, à environ trois kilomètres de la côte, que cinq épaves de ces embarcations ont été découvertes par des archéologues à la fin des années 1950.



© ARCHIVE SBAO - INV. N° R 4104/6

5. Cachées sous le sable, le bois gorgé d'eau, ces épaves ont été préservées grâce à un milieu privé d'oxygène. Elles correspondent aux embarcations qui desservait le vaste port maritime construit à Rome au I<sup>er</sup> siècle. Ce sont des problèmes d'envasement chronique qui auraient poussé à les abandonner au II<sup>e</sup> siècle dans cette zone.

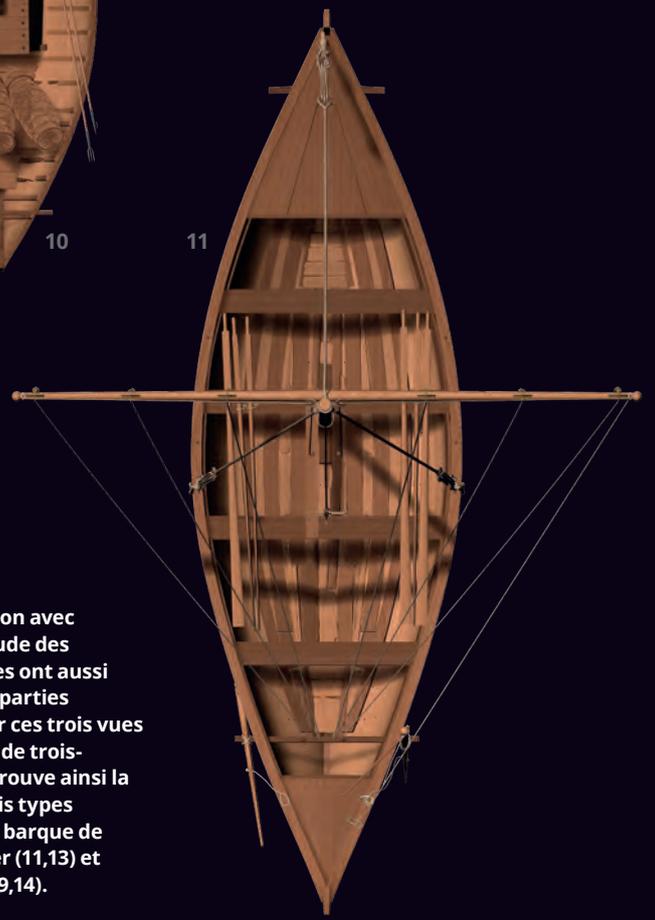
6. Les archéologues ont déterminé le rôle de ces bateaux en comparant les épaves avec des représentations de l'époque, fresques, reliefs ou mosaïques comme celle-ci (Piazzale delle Corporazioni, Statio 25, Ostie, 200 apr. J.-C.). Elle montre le transbordement entre un navire de haute mer (à droite) et une *navis caudicaria* ou allège fluvio-maritime (à gauche).



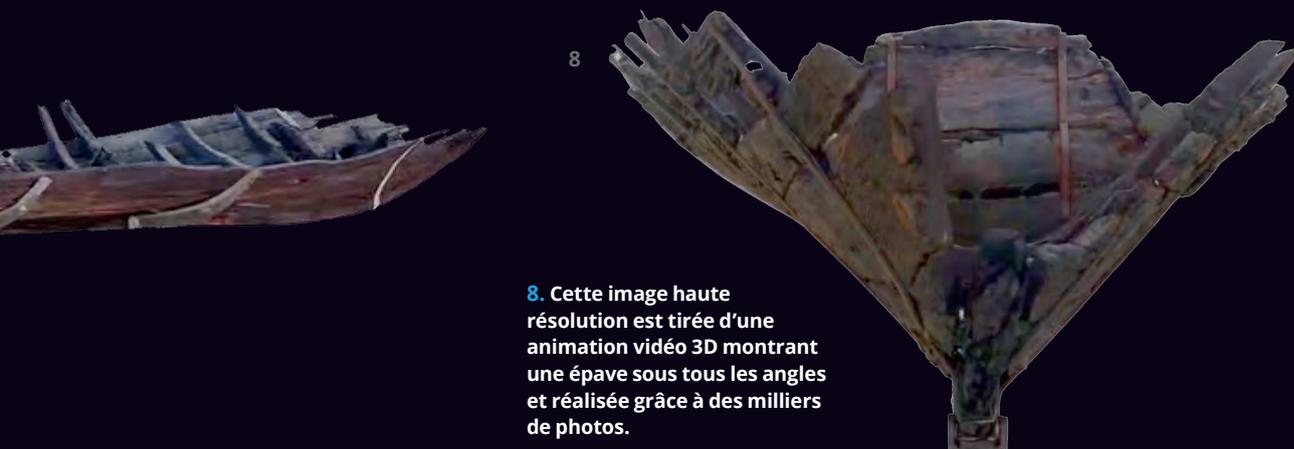
© ARCHIVE SBAO



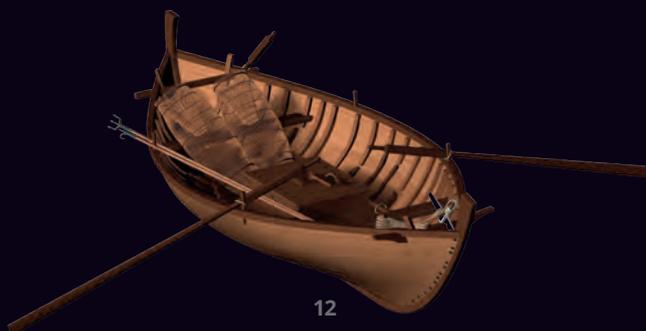
7. Cette restitution numérique de l'une des épaves dans son état actuel confirme qu'il s'agit d'une *navis caudicaria* ou allège fluvio-maritime. Sa proue élancée et son fond plat permettent en effet de manœuvrer en mer comme sur le Tibre, et de s'accoster aux quais.



De 9 à 14. La comparaison avec d'autres vestiges et l'étude des déformations des coques ont aussi permis d'extrapoler les parties manquantes comme sur ces trois vues de dessus (à gauche) et de trois-quarts (à droite). On retrouve ainsi la forme originelle des trois types d'épaves mises au jour : barque de pêche (10,12) petit voilier (11,13) et allège fluvio-maritime (9,14).



8. Cette image haute résolution est tirée d'une animation vidéo 3D montrant une épave sous tous les angles et réalisée grâce à des milliers de photos.



Ce portfolio est tiré de la vidéo  
« Les navires de l'antique port de Rome  
remis à flot », à voir sur [cnrslejournal.fr](http://cnrslejournal.fr)

Communication scientifique, confiance dans les institutions...

# Les premières leçons de la crise du Covid-19

SOCIÉTÉS

**RECHERCHE** Différents travaux sont menés pour analyser les ressorts de la communication entre puissance publique, experts et médias, ou mieux comprendre la relation de confiance entre les citoyens et les institutions pendant la crise sanitaire. En voici deux illustrations.

PAR LAURENCE STENVOT ET PHILIPPE TESTARD-VAILLANT

En se saisissant des « produits instantanés » de la recherche, la communication médiatique et celle des décideurs publics ont exacerbé une confusion fondamentale entre recherche et science, ce qui a engendré une « dissonance » et une « cacophonie » auprès du public. Voilà comment Jean-François Guégan, directeur de recherche à l'Inrae et président du séminaire Maladies infectieuses émergentes (MIE), a ouvert l'atelier du 16 octobre dernier à l'UFR de médecine, site Villemin, Université de Paris, dont l'objectif était de faire un retour d'expérience accéléré sur la communication pendant la crise du Covid. Une quarantaine de chercheurs (en médecine, santé publique, sciences humaines et sociales), journalistes et membres du paysage politique étaient présents pour débattre et échanger.

« Nous voulions un retour d'expérience à chaud (Retex) sur la première vague, qui était encore la seule début octobre », explique l'anthropologue Gilles Boëtsch<sup>1</sup>, qui a organisé cet atelier avec la spécialiste des maladies infectieuses et émergentes Catherine Lepout<sup>2</sup>. « Nous souhaitons déceler à la fois les points positifs comme les dysfonctionnements ou erreurs qui ont été commises dans la communication (scientifiques, journalistes et politiques) durant la pandémie du Covid-19 et en tirer des leçons pour proposer à l'avenir un discours plus clair, objectif et apaisé. » Tous deux sont membres du comité de pilotage Covid-19 du séminaire MIE, qui, créé en 2009, se réunit chaque année autour d'une thématique pour produire des nouveaux savoirs transdisciplinaires et les diffuser, notamment auprès des pouvoirs publics. Celui-ci réunit des chercheurs et spécialistes d'un ensemble d'institutions et de sociétés savantes dont le CNRS. Pendant plus de quatre heures, les intervenants se sont succédé pour parler des problématiques de

communication rencontrées autour du Covid-19. Premier coupable selon eux ? La différence mal comprise entre recherche – biomédicale dans ce cas – et science.

## Confusion, tsunami médiatique et controverses

« Car si la recherche conduit à une production régulière de travaux qui expose des faits, mais aussi des contrefaits, c'est avec le temps – parfois des dizaines d'années – que ceux-ci viennent forger des nouvelles connaissances, comme l'existence des gènes et le codage génétique, par exemple », explique Jean-François Guégan. Ces connaissances ne sont pas ébranlables, ou très rarement. En prenant comme comptant les produits « immédiats » de cette recherche, une confusion générale s'est vite installée dans les yeux du public. « La science est une vérité qui se construit, rappelle Gilles Boëtsch. Les citoyens attendent des scientifiques d'avoir des réponses à leurs problèmes, et comme ces derniers n'en ont pas trouvés dans l'immédiat lors de la pandémie, cela les a déstabilisés et décrédibilisés. » Selon les chercheurs, ce tsunami médiatique a été déraisonnable et grand vecteur de stress dans la population et a provoqué un « manque de recul néfaste » alors que le Covid-19 est un phénomène très dynamique « pour lequel ce qui est vrai un jour peut ne plus l'être le soir même ».

Autre point important : le public a assisté à des discordances, des avis contradictoires et des interprétations non vérifiées. « Il y a eu les problèmes des masques, l'avis controversé de Didier Raoult, et certains journalistes qui ont rapporté des nouvelles erronées sur leurs antennes... », rappelle Catherine Lepout. Tout ceci a entraîné une méfiance chez les citoyens qui les a poussés vers des « théories du complot » et a favorisé la diffusion de fake news. « Il faut améliorer notre capacité à travailler ensemble pour diffuser des

Pour en savoir +

Pour lire l'intégralité de l'article et visionner la vidéo de l'atelier : [cnrs.fr](https://www.cnrs.fr)



Des passants portent des masques dans le centre-ville de Toulouse, le 15 octobre 2020.

*messages clairs à tous les niveaux*», ajoute la spécialiste en maladies infectieuses, rappelant que « *l'organigramme labyrinthique de l'État* » et la « *circulation complexe des informations au sein même de ses ministères* » n'ont pas toujours aidé à comprendre.

### Conclusions et propositions concrètes

Alors que la France a traversé une deuxième vague épidémique et que le sujet des vaccins mobilise désormais les antennes, les premières conclusions de cet atelier et propositions<sup>3</sup> pour améliorer la communication autour du Covid-19 sont toujours aussi pertinentes. « *Entre fake news, mouvements anti-vaccins et hésitation vaccinale, nous voyons bien que la communication sur le sujet est compliquée. Elle doit être claire, objective et compréhensible pour le citoyen* », indique Catherine Leport. Parmi les nombreuses pistes, la nécessité d'améliorer « *la coordination et la fluidité de la circulation des informations au sein des organes de décision de l'État* » et cela aussi au niveau local : « *mieux informer les maires et autres élus locaux, gestionnaires et premiers interlocuteurs des citoyens* » qui ont été confrontés à « *la masse d'informations disponibles, à l'intense viralité des réseaux sociaux et aux théories complotistes qui y circulaient.* » Coté médias, favoriser, pour les journalistes qui sont intéressés, « *une formation en histoire et en philosophie des sciences, ainsi qu'une initiation à la recherche en santé* ».

Plus ambitieux serait la création d'une instance « *Communication – Risque Pandémique* » indépendante, à l'initiative de l'État, impliquant divers partenaires politiques, scientifiques et des médias. « *Nous pourrions par exemple imaginer une équipe regroupant des spécialistes des vaccins, de santé publique, des anthropologues et sociologues ainsi que des infectiologues/virologues, pour développer des messages cohérents et fonctionnels à diffuser directement aux citoyens* », explique Gilles Boëtsch, indiquant que ce type de réflexion doit se poursuivre sur le long terme et en dehors des crises. Car la pire des erreurs serait d'attendre une prochaine pandémie pour y réfléchir. ■ L. S.

*“Les citoyens attendent des scientifiques d'avoir des réponses à leurs problèmes, et comme ces derniers n'en ont pas trouvé dans l'immédiat, cela les a déstabilisés.”*

1. Chercheur au laboratoire Environnement, Santé, Sociétés (CNRS/Univ. Cheikh Anta Diop/Univ.de Bamako/CNRST/Univ. Gaston Berger). 2. Professeure à l'Université de Paris.

# Une confiance mise à l'épreuve

**Comment est né votre projet sur la confiance dans les institutions étatiques et scientifiques à l'épreuve de la pandémie de Covid-19 (Ciesco) ?**

**Alexis Spire**<sup>1</sup>. Je travaille depuis longtemps sur les rapports des Français avec les institutions étatiques (services fiscaux, école publique, forces de l'ordre, tribunaux). Quand la crise a éclaté, cela a tout de suite fait écho : comment obtenir le consentement de la population aux mesures décidées au nom de l'intérêt général ? Quels arguments employer ? J'ai donc élaboré un projet en incluant un des piliers du rapport des citoyens à l'État : l'hôpital public.

**Quels sont vos outils ?**

**A. S.** Nous utilisons des méthodes quantitatives (questionnaires sur des échantillons représentatifs de la population) et des méthodes qualitatives fondées sur des entretiens, notamment dans deux hôpitaux du Grand Est et de la région parisienne durement frappés par la pandémie. Nous menons aussi un travail à Mulhouse (Haut-Rhin), bassin très urbain, populaire, fortement touché par la première vague, et un autre dans l'Ouest, bassin plus petit et plus épargné. Et nous menons une recherche dans une zone rurale du Grand Est pour étudier ce que le recul des institutions étatiques (fermeture des classes, des urgences, des maternités, des tribunaux...) produit sur des populations se sentant délaissées par la puissance publique. Au total, nous avons obtenu une photographie statistique des représentations et des pratiques sur la base d'un échantillon de 40 000 personnes. Et nous avons déjà réalisé une centaine d'entretiens.



© EMMANUELLE MARCHADOUR

Spécialiste des rapports qu'entretiennent les Français avec leurs institutions,

Alexis Spire nous livre son regard sur l'impact de la crise sanitaire.

**Que révèle cette enquête au sujet des agents hospitaliers ?**

**A. S.** L'épidémie a renforcé la cohésion des équipes mais elle a accentué leur sentiment d'éloignement aux pouvoirs publics. Même en l'absence de pénurie de matériels de protection, les directives contradictoires sur les masques à porter (chirurgical ou FFP2), le manque de places en réanimation et le maintien des élections municipales en mars, ont fragilisé la confiance des personnels dans les institutions étatiques. De nombreux soignants, en première ligne, ont eu des symptômes du Covid-19 mais les administratifs des agences de santé, en télétravail, ne répondaient pas à leurs demandes d'être mieux protégés. Les autres, faute de tests, ont dû aller travailler sans savoir s'ils étaient contaminés et vivre dans la hantise de contaminer leurs proches. Mais avoir été malade n'a en rien affecté leur confiance dans les autorités scientifiques. À l'hôpital, le rapport aux institutions étatiques est étroitement lié

à la division du travail. Ce sont les aides-soignantes et infirmières, les plus exposées au virus, qui montrent la plus grande distance critique à l'égard des messages du gouvernement, malgré la revalorisation salariale liée au Ségur de la santé. La question des conditions de travail n'ayant pas été réglée, il est à craindre que nombre de soignants décident de quitter le métier.

**Quelle est leur attitude vis-à-vis de la vaccination ?**

**A. S.** Nous n'avons pas rencontré de soignants viscéralement antivaccins, plutôt une forte « hésitation vaccinale »<sup>2</sup> parmi les aides-soignantes et les infirmières pour lesquelles le vaccin anti-Covid est le résultat d'une négociation opaque et suspecte entre les pouvoirs publics et l'industrie pharmaceutique (éclaboussée par divers scandales).

**Qui fait le plus confiance à l'État pour résoudre la crise sanitaire ?**

**A. S.** Les cadres supérieurs, à 60 % (contre 45,6 % pour les personnels soignants et 51 % pour l'ensemble de la population). Et les hommes davantage que les femmes. Concernant les autorités scientifiques, les moins diplômés sont 67 % à penser qu'elles parviendront à juguler l'épidémie (contre 87,4 % chez les Bac + 5 et plus et 80 % pour la population générale). Globalement, plus on avance en âge et occupe une position sociale élevée, plus on se montre confiant dans la capacité des pouvoirs publics et des scientifiques. Et les immigrés accordent davantage de crédit aux pouvoirs publics que le reste de la population, sans doute par comparaison avec leur pays d'origine.

1. Directeur de recherche CNRS à l'Institut de recherche interdisciplinaire sur les enjeux sociaux. Sciences sociales, Politique, Santé (CNRS/EHESS/Université Sorbonne Paris-Nord/Inserm).

2. Lire « Près d'un Français sur quatre ne compte pas se faire vacciner contre le Covid-19 » sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr).



Manifestation à Nantes pour la défense et la sauvegarde de l'hôpital public et l'amélioration des conditions de travail du personnel soignant, le 15 juin 2020.

© JEAN CLAUDE MOSCHETTI/REA

### Et qui a transgressé le premier confinement ?

**A. S.** Selon notre enquête, les transgressions (motif et durée des sorties) sont plutôt masculines : 10 % des hommes contre 7 % des femmes. Et l'observance des règles sanitaires a été moindre chez les 18-24 ans et chez les bas revenus. Si on regarde les catégories socioprofessionnelles, les indépendants, les entrepreneurs et les agriculteurs sont « en tête » avec 17 %. S'agissant des premiers, cela tient sans doute à leur capacité d'adaptation et leur habileté à composer voire contourner les contraintes imposées par l'État. Au total, près de 8 % des enquêtés – qu'ils se disent confiants dans les institutions étatiques ou non – ont déclaré ne pas avoir respecté toutes les règles au cours des sept jours précédents.

### La relation à l'épidémie varie-t-elle selon les sexes ? Les catégories sociales ?

**A. S.** Oui. Selon notre enquête, les femmes, comme les classes populaires, perçoivent l'épidémie à l'échelle de la famille, se souciant surtout des effets du virus sur la vie quotidienne,

les conditions de travail et l'entourage proche. Les hommes se préoccupent davantage de la dimension internationale et environnementale de la crise qu'ils considèrent comme un problème posé aux gouvernements, aux scientifiques et aux médias. Le haut de l'échelle sociale, moins exposé grâce au télétravail, privilégie aussi une lecture plus globale.

### Ce type d'enquête peut-il aider à affiner la stratégie anti-Covid ?

**A. S.** Les sociologues ont été peu sollicités, nos enquêtes pourraient pourtant permettre aux pouvoirs publics d'associer davantage la population aux décisions. L'enjeu est de tenir compte des conséquences sociales des mesures sur certains groupes (étudiants, restaurateurs, métiers de la culture) qui ont le sentiment que l'État ne leur accorde plus aucune place. Seulement des subsides.

### Pourquoi cet intérêt pour les institutions étatiques ?

**A. S.** Les nouvelles technologies et la contestation grandissante ont transformé nos sociétés. Pour asseoir leur autorité autrement que par la force,

les démocraties sont condamnées à produire des institutions qui suscitent l'adhésion des citoyens. Établir une relation de confiance est le meilleur moyen de faire accepter des décisions prises au nom de l'intérêt général. Pour autant, les dispositifs institutionnels et les agents qui les incarnent sont à l'origine d'inégalités, de conflits, de rapports de domination qui peuvent mettre en échec ce lien de confiance.

### Ce lien s'effrite donc...

**A. S.** La France figure parmi les pays européens où le niveau de confiance dans l'État est faible, selon le rapport d'Eurofound d'avril 2020<sup>3</sup>. Mais si la confiance dans les élites politiques s'est fortement détériorée, les Français restent confiants dans les institutions étatiques et très attachés aux services publics. Il faut aussi faire la distinction entre confiance symbolique, qui est une opinion abstraite sur les institutions, et confiance pratique, qui est le produit d'interactions avec



À lire :

*La confiance dans l'État : une relation pratique et symbolique,*  
Alexis Spire  
in Claudia Senik (coord.),  
*Crises de confiance ?*  
*La Découverte,*  
2020, 276 p.

ces institutions et se mesure à la propension des individus à solliciter leurs agents pour faire valoir des droits.

### Quelle est l'influence de ces interactions ?

**A. S.** En 2017, par exemple, près de 80 % des personnes déclaraient faire « tout à fait » ou « plutôt » confiance à la police. C'est l'institution qui suscite le plus haut niveau d'adhésion, ce qui s'explique en partie par le contexte des attentats terroristes. Mais avoir eu plusieurs contacts avec les forces de l'ordre (contrôles d'identité, requêtes au commissariat...) se traduit par un plus faible niveau de confiance envers cette institution. Tandis que les interactions vécues avec l'administration fiscale produisent l'effet inverse.

### Les personnes aux positions sociales les plus élevées affichent une plus grande confiance dans les institutions étatiques...

**A. S.** Oui. C'est manifeste dans le cas de la justice <sup>4</sup> et de l'administration fiscale, ce qui s'explique là encore par des expériences pratiques. Quand on peut choisir son avocat, être conseillé par des professionnels, on a une vision plus positive de l'institution judiciaire. On a davantage le sentiment de pouvoir la « domestiquer » pour la faire fonctionner à son profit que lorsqu'on a un avocat commis d'office perçu comme peu investi dans votre dossier.



Le 13 mars 2020, le Premier ministre Édouard Philippe, le président du conseil scientifique Jean-François Delfraissy et le ministre de la Santé Olivier Véran, répondent aux questions des journalistes.

### L'âge joue-t-il un rôle ?

**A. S.** Oui. Les jeunes se montrent assez peu confiants envers les institutions, contrairement aux plus de 60 ans. Dans le cas de la police, ce clivage s'explique en partie par une culture juvénile de résistance aux forces de l'ordre. Mais là encore, les caractéristiques sociales comptent : les jeunes ouvriers sont 59 % à lui faire confiance, les jeunes cadres 70 %. Et les écarts sont flagrants selon l'appartenance religieuse et selon que les personnes ont ou non fait l'objet de contrôles d'identité répétés. Au sein des quartiers populaires, l'expérience des discriminations est structurante dans le rapport aux institutions.

### Qu'en est-il des réseaux sociaux ?

**A. S.** Je ne suis pas sûr qu'ils jouent un rôle considérable dans la façon dont est perçu le pouvoir étatique. On y parle beaucoup de la police, certes, mais très peu de l'école et de l'hôpital publics, de la justice, de l'administration fiscale... En revanche, les réseaux sociaux amplifient la visibilité, dans l'espace public, des signes de défiance à l'égard des élus et des gouvernants.

### Comment remédier à ce désenchantement ?

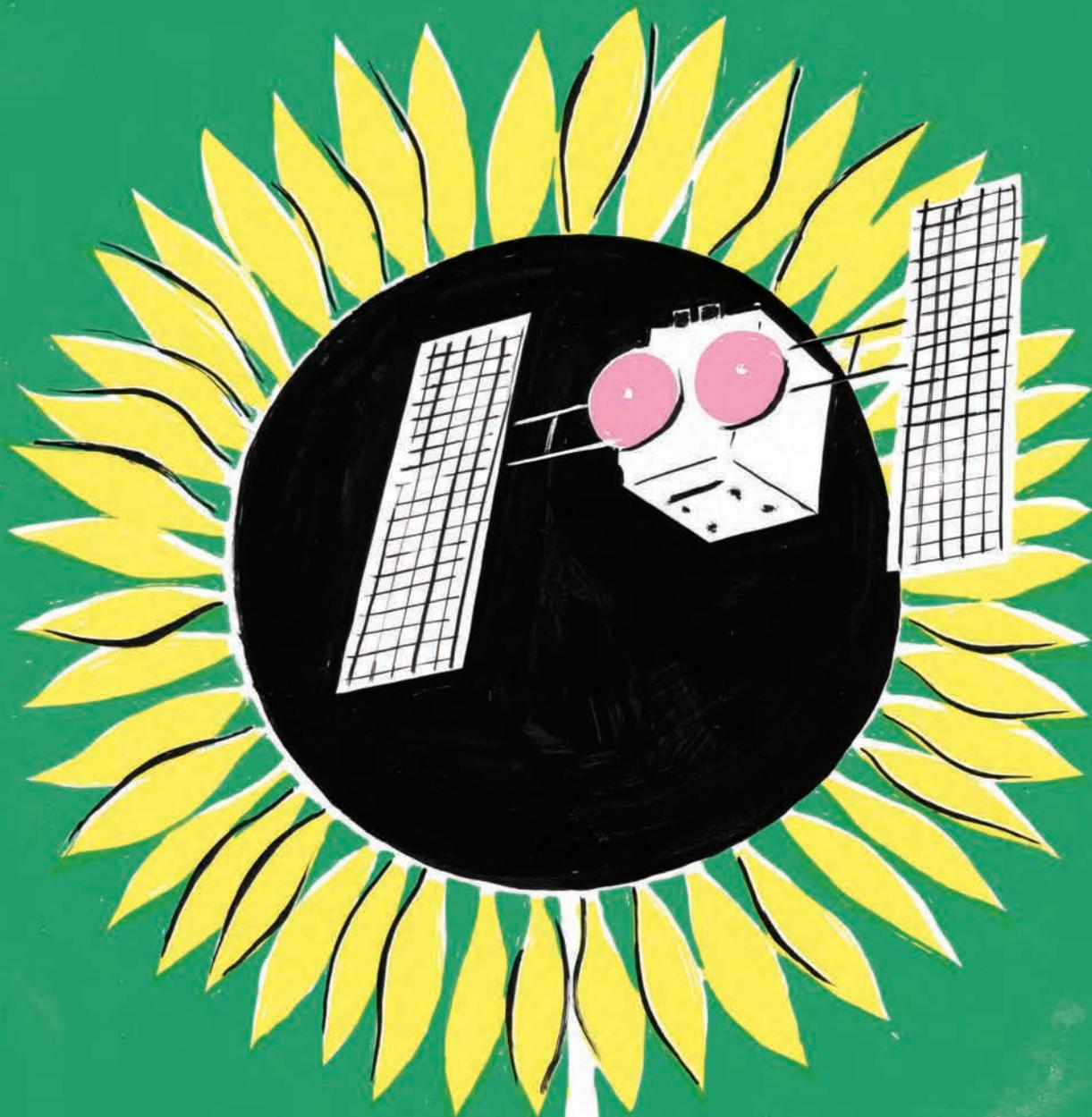
**A. S.** C'est tout le rapport à l'État qui est aujourd'hui grippé. Le modifier suppose entre autres de consulter davantage les usagers lorsque les services publics sont menacés de suppression quelque part, de renforcer l'accès aux droits de celles et ceux qui n'y ont pas recours par méconnaissance ou renoncement et de mieux adapter les institutions étatiques à la réalité des inégalités territoriales. Le mouvement des « gilets jaunes » a montré le sentiment de perte de souveraineté des citoyens sur des décisions qui les concernent. Tenter de réparer ce lien distendu reste un immense défi. **|| P. T-V.**

*“Si la confiance dans les élites politiques s'est fortement détériorée, les Français restent confiants dans les institutions étatiques et très attachés aux services publics.”*

 Lire l'intégralité de l'entretien sur [cncrs.fr](https://cncrs.fr)

3. European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions (Eurofound). (2020). Living, working and COVID-19: first findings, April 2020. 4. Lire « La justice déçoit d'autant plus qu'elle a été idéalisée », sur [lejournal.cncrs.fr](https://lejournal.cncrs.fr)

# EN ACTION



*Chercheuses et chercheurs explorent  
océans et univers, et partent  
à la rescousse des insectes comme  
des langues en danger.*

# Déclin des insectes : l'urgence d'agir

**L'érosion de la biodiversité des insectes représente une grave menace pour nos sociétés. Toutes les disciplines scientifiques s'unissent pour appeler à agir...**

**Philippe Grandcolas**<sup>1</sup>. C'est en effet une des premières fois que l'Académie des sciences se prononce sur la crise et prend acte. Jusque-là les cris d'alarme venaient surtout des structures liées aux disciplines scientifiques concernées, l'écologie et les sciences de l'environnement. Malgré toute l'expertise adéquate, nous pouvions donc être suspects d'exagérer l'importance de notre sujet d'étude. À présent, au regard de l'ensemble des données disponibles, cet avis<sup>2</sup> démontre qu'il existe un large consensus au sein de la communauté scientifique, allant des sciences de l'environnement aux différentes facettes de la biologie, sur la réalité de ce déclin.

**L'avis évite de donner un chiffre qui résumerait l'ampleur de ce déclin. Qu'est-ce qui permet néanmoins de parler de déclin global ?**

**Ph. G.** Il est en effet impossible de suivre précisément l'évolution des populations de toutes les espèces d'insectes (il y en a un million de connues !) et donc de formuler des tendances globales moyennes. Mais les observations de terrain menées dans le monde entier depuis une vingtaine d'années démontrent de manière indiscutable une diminution nette du nombre total d'insectes. En Europe ou en Amérique du Nord par exemple, de nombreux pollinisateurs (abeilles sauvages, papillons...) sont en net recul



VIVANT  SOCIÉTÉS 

**ÉCOLOGIE** Dans un avis publié le 26 janvier, l'Académie des sciences sonne l'alarme au sujet du déclin des insectes. Explications avec Philippe Grandcolas, co-auteur du rapport scientifique sur lequel s'appuie cet appel.

PROPOS RECUEILLIS PAR JEAN-BAPTISTE VEYRIERAS

dans les paysages mixtes agricoles. Et la diminution des traces d'insectes sur les pare-brise en Europe dépasse 80 % dans certaines régions ! Quant à d'autres espèces qui passent davantage de temps au sol, les données sur les coléoptères, par exemple, vont hélas dans le même sens. Les zones humides ont reculé de 85 % en surface depuis le début de l'ère industrielle dans le monde. Il est donc logique de constater que de nombreuses espèces d'insectes aquatiques, comme les libellules, en ont pâti.

**Des zones géographiques sont-elles plus touchées que d'autres ?**

**Ph. G.** On ne peut le déterminer, mais il existe des disparités entre les régions, en fonction notamment des activités humaines et de leur intensité.

**Quelles sont les causes de ce déclin des insectes ?**

**Ph. G.** La principale cause est la destruction de milieux naturels, autrement dit la disparition des forêts naturelles, des zones humides et des prairies. Plus de 40 millions d'hectares de forêts ont ainsi disparu en vingt ans dans le monde, soit plus que la superficie de l'Allemagne ! Et les plantations d'arbres – qui se limitent souvent à une seule espèce voire à un seul clone, avec un sous-bois ou des sols très simplifiés – ne suffisent pas à restaurer la

richesse des écosystèmes forestiers. L'usage massif et irraisonné de pesticides est la deuxième cause majeure de l'effondrement des populations d'insectes à proximité des zones agricoles. La dérogation récemment accordée par le gouvernement français aux producteurs de betteraves pour l'usage de néonicotinoïdes est à cet égard regrettable. Deux autres facteurs importants contribuent au déclin des insectes : les effets de la crise climatique et l'introduction des espèces exotiques, facilitée par la mondialisation.

**Or cette « apocalypse des insectes » menace toute l'humanité...**

**Ph. G.** Les premiers effets se font déjà sentir en agriculture. Nos techniques actuelles permettent de compenser le déclin des pollinisateurs, mais il est fort probable qu'à moyen terme la dégradation de ce « service gratuit » franchisse un point de non-retour. Polliniser à la main ou avec des drones, comme on y est parfois obligé dans certaines régions, est au mieux une gageure ou une coûteuse absurdité. La raréfaction des coléoptères conduit aussi à un moindre recyclage de la matière organique. En outre, les insectes sont un maillon dans des chaînes alimentaires et leur disparition fragilise tous les insectivores, en pre-

1. Directeur de l'Institut de systématique, évolution, biodiversité (Unité CNRS/Muséum national d'histoire naturelle/Sorbonne Université). 2. <https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academie/declin-insectes-urgence.html>



© MOBILISE248/STOCK.ADOBE.COM

mier lieu les oiseaux dont les densités peuvent chuter consécutivement. La cascade d'effets qui en résulte nous expose à un bouleversement des écosystèmes dont il est très difficile de prédire l'ampleur et la gravité.

**Vous chiffrez à plusieurs centaines de milliards d'euros la dégradation de ces « services naturels ». Cette approche ne réduit-elle pas l'importance des insectes à une simple valeur marchande ?**

**Ph. G.** Elle est indispensable pour montrer l'ampleur des services rendus mais ne doit bien évidemment pas occulter la valeur éthique intrinsèque des insectes. J'insiste aussi sur leur « valeur d'option » : avec leurs millions d'espèces, combien de découvertes cruciales ou de rôles encore inconnus les insectes peuvent-ils offrir ? Et combien disparaîtront avant qu'on ait eu le temps de les découvrir ? Notre ignorance actuelle ne devrait pas nous amener à hypothéquer les ressources et les possibilités écologiques de demain.

**Face à ce déclin, que faire ?**

**Ph. G.** Il est urgent de réduire significativement l'usage des pesticides en agriculture, sans stigmatiser qui-conque, mais en accélérant la transition vers d'autres stratégies plus raisonnées que des traitements omniprésents et non ciblés avec des produits rémanents. Agriculteurs et pouvoirs publics peuvent d'ores et déjà s'appuyer sur les recherches en agro-écologie. Il faut aussi préserver le plus possible les habitats naturels et leur diversité face à l'expansion des zones agricoles et d'élevage. Ce sont des actions concrètes que les citoyens peuvent dès à présent encourager. Elles doivent être accompagnées d'actions globales pour lutter contre le dérèglement climatique et l'invasion des espèces exotiques.

**Pour cela, les citoyens auront besoin de s'appuyer sur des données scientifiques encore plus nombreuses et détaillées...**

**Ph. G.** C'est l'une de nos recommandations <sup>3</sup> : renforcer les programmes de suivi des populations d'insectes

#### RÉMANENTS

Qui subsistent après la disparition de la cause. Se dit par exemple d'un pesticide dont la présence dans l'environnement, et potentiellement l'effet, se prolonge après son application.

#### ADN ENVIRONNEMENTAL

Matériel génétique issu d'un échantillon environnemental. Son séquençage permet de révéler la présence en un lieu donné d'espèces animales et végétales, ainsi que celle de bactéries et de champignons, à partir d'un simple échantillon de terre ou d'eau prélevée sur le site.

▀ Abeilles, papillons, scarabées ou encore libellules, le petit monde des insectes compte plus d'un million d'espèces connues.

encore trop peu précises dans de nombreux écosystèmes. C'est ce qu'illustre en partie la controverse sur la première méta-analyse publiée l'an dernier dans la revue *Science* <sup>4</sup>. Elle avance des tendances contradictoires, dont certaines étrangement rassurantes, souffre de graves biais méthodologiques et révèle l'hétérogénéité et le côté encore parcellaire des relevés actuels. Il est donc urgent d'encourager les efforts de recherche notamment grâce au séquençage de l'ADN environnemental ou le calcul des points de comparaison historiques grâce aux collections muséales. Ces techniques pourraient faciliter à terme le suivi dans le temps des populations d'insectes dans un grand nombre d'écosystèmes. La science doit se saisir pleinement de cet enjeu majeur. ▀

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

3. Le rapport est en ligne sur : <https://doi.org/10.5802/crbio1.37> 4. <https://science.sciencemag.org/content/368/6489/417>

# Pangloss, à l'écoute des langues rares

SOCIÉTÉS

NUMÉRIQUE

**LINGUISTIQUE** Une collection unique d'archives sonores de langues rares ou en danger est désormais accessible à tous sur le site de la collection Pangloss. Plusieurs milliers de contes et récits se laissent entendre dans plus de 170 langues recueillies et documentées grâce au travail de linguistes passionnés.

PAR LAURE CAILLOCE

Connaissez-vous l'oubykh, cette langue caucasienne que la poussée russe dans la région depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle a lentement et sûrement conduit au déclin, puis à la disparition ? Avez-vous jamais entendu une chanson en na, un idiome sino-tibétain toujours parlé dans les montagnes du Sichuan, région de Chine située à l'est du Tibet où le mandarin s'impose peu à peu comme la langue unique ? Avec 170 autres, ces dialectes méconnus sont aujourd'hui à portée de toutes les oreilles grâce au site Pangloss, une collection unique d'archives sonores de langues rares ou en danger, que le patient travail de linguistes de terrain a permis de recueillir.



► Travail de terrain pour enregistrer des locuteurs du shuhi (xumi), une langue tibéto-birmane à tradition orale parlée par 1 800 personnes.

« Sur les 6 000 langues que l'on dénombre aujourd'hui dans le monde, plusieurs milliers sont insuffisamment ou pas du tout documentées, raconte Alexis Michaud, linguiste au Lacito (Langues et civilisation à tradition orale)<sup>1</sup>, le laboratoire à l'origine de la collection Pangloss. Ce sont des langues sans écriture pour lesquelles il n'existe ni dictionnaire ni corpus grammatical. » Des linguistes et ethnologues passionnés tentent de combler ce manque, en enregistrant contes et récits de la tradition orale, afin de pouvoir les retranscrire phonétiquement et en percer tous les secrets. « Documenter une langue représente généralement le travail d'une vie pour un linguiste », témoigne le chercheur.

## 25 langues s'éteignent chaque année

Jusqu'à l'arrivée du numérique, le travail des scientifiques donnait lieu à la publication de grammaires et de dictionnaires et, plus ponctuellement, de livres de récits traduits à destination du grand public, tandis que les bobines finissaient leur vie sur des étagères ou se perdaient à tout jamais. La collection Pangloss démarrée il y a plus de vingt ans veut pallier ce manque, en numérisant ce trésor sonore et en l'ouvrant au plus grand nombre : les linguistes et chercheurs du monde entier auxquels le site bilingue français-anglais réserve un espace et des outils dédiés, mais aussi et c'est nouveau, les simples amateurs.

Il y a urgence, alors que la biodiversité linguistique connaît le même sort que les écosystèmes : on estime que 25 langues s'éteignent chaque année, et qu'au moins un tiers des langues parlées sur la planète pourrait avoir disparu d'ici à la fin du siècle. La faute à la globalisation, qui voit les langues des dominants prendre le dessus sur les

Pour en savoir +

La collection Pangloss est accessible sur son site, revu grâce au programme Com'Lab du CNRS : <https://pangloss.cnrs.fr/>

1. Unité CNRS/Univ. Sorbonne Nouvelle/Inalco.



► Séance d'enregistrement en langue na dans la province chinoise du Sichuan.

langues locales – c'est le cas de l'espagnol en Amérique latine, du mandarin en Chine, du wolof au Sénégal, du vietnamien au Vietnam pourtant riche de dizaines de langues... Mais pas que : le changement climatique, en poussant des populations hors de leurs territoires, accentue encore le phénomène. « Historiquement, les endroits où la diversité des langues est la plus grande sont des régions isolées, comme les régions montagneuses, par exemple, ou les régions de forêt dense comme l'Amazonie ou la Papouasie-Nouvelle-Guinée – dans cette dernière, on dénombre plus de 800 langues différentes ! explique Alexis Michaud. Avec la hausse des températures, ces territoires menacent de devenir inhabitables – c'est déjà le cas de certaines régions himalayennes où la fonte des glaciers pousse les habitants à émigrer vers les plaines et les villes où elles perdent progressivement l'usage de leur langue maternelle. »

#### Une collection de 3 600 documents sonores et vidéos

Afin de sauvegarder cette richesse menacée, 3 600 documents sonores mais aussi vidéos enregistrés par plus de 50 linguistes sont déjà disponibles sur le site Pangloss, qui espère s'enrichir encore dans les mois et les années qui viennent. « Il faut que les chercheurs prennent l'habitude de mettre leurs archives sonores en ligne au fur et à mesure de leurs travaux, plutôt que d'attendre la fin de leur carrière pour s'y atteler, insiste le linguiste. Tant pis si toutes n'ont pas

encore de transcription écrite. » Pour y remédier, Pangloss promet de mettre à disposition dans le courant de l'année 2021 un logiciel de traitement automatisé du langage qui devrait grandement leur faciliter la tâche. « Jusqu'ici, il fallait une centaine d'heures d'enregistrement au moins pour entraîner une intelligence artificielle à faire des transcriptions dans une nouvelle langue. Avec l'interface que nous préparons pour le site sur la base des derniers outils disponibles, une heure d'enregistrement suffira, c'est une vraie révolution », s'enthousiasme le chercheur.

Développé sur le principe de la science ouverte – les documents mis en ligne sont sous licence *Creative Commons* et tout le monde peut y piocher à sa guise –, Pangloss se veut aussi « prudemment collaboratif ». « Les documents ne seront pas modifiables directement, comme sur Wikipedia, mais nous accueillerons avec plaisir les suggestions et les propositions d'aide, d'où qu'elles viennent. Notamment pour la traduction des documents qui n'en disposent pas encore », indique Alexis Michaud. L'une des nombreuses pépites du site, un récit recueilli par le linguiste et académicien Georges Dumézil dans les années 1960 auprès du tout dernier locuteur oubuykh (« La chair de poisson rend intelligent »), a pu être transcrit et traduit grâce au concours inattendu d'un étudiant... californien : celui-ci avait appris cette langue disparue en autodidacte grâce au dictionnaire et aux textes publiés par le même Dumézil. ||

# Au cœur des stratégies nationales pour la recherche

**RECHERCHE** Détaillé le 8 janvier 2021, le quatrième programme d'investissements d'avenir présente plusieurs dispositifs pour soutenir la recherche et l'innovation françaises. Avec ses partenaires, le CNRS s'est vu confier le pilotage scientifique de Programmes et équipements prioritaires de recherche.

PAR SOPHIE FÉLIX

« **G**âce à la transversalité et à l'étendue des compétences qu'il rassemble, le CNRS a vocation à répondre à tous les enjeux du volet recherche du PIA4 », affirme Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS. Avec 20 milliards d'euros (Md€) sur cinq ans, dont 11 Md€ inclus dans le plan France relance<sup>1</sup> d'ici 2022, ce quatrième programme d'investissements d'avenir (PIA) doit « donner un cap de moyen terme à l'économie, afin de la placer sur un chemin de croissance vertueux et durable ».

Le PIA4 contient deux volets. Le premier prévoit 7,5 Md€, notamment pour irriguer les écosystèmes d'enseignement supérieur, de recherche et d'innovation créés par les PIA précédents dont le CNRS est partie prenante, comme les universités de recherche, laboratoires ou équipements d'excellence, instituts de recherche technologique, etc. À côté de cette « innovation structurelle », le second volet « dirigé » concerne les stratégies d'accélération, dotées d'un budget de 12,5 Md€. Cette quinzaine de marchés clés, dont le développement doit être accéléré et massivement financé, répond à des enjeux environnementaux, économiques, de souveraineté nationale ou d'indépendance technologique.

Le gouvernement entend confier le pilotage de la partie amont de chaque stratégie d'accélération à des organismes de recherche nationaux, via des Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) consacrés à la structuration des communautés de recherche et aux premières avancées scientifiques.

## Un hydrogène plus vert

Dotée de 7 milliards d'euros dont 2,4 milliards inclus dans le plan France Relance entre 2020 et 2023, la stratégie d'accélération « hydrogène décarboné » annoncée le 9 septembre 2020 se situe au cœur de la transition écologique, visant la production de cet hydrogène et son utilisation dans la mobilité lourde (camions, bus). Des efforts de recherche sur les technologies de l'hydrogène, comme les piles, électrolyseurs ou matériaux innovants, seront donc soutenus. Ce PEPR Hydrogène a été confié au CNRS et au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), avec un budget de 80 millions d'euros. Abdelilah Slaoui, directeur adjoint scientifique de l'Institut des sciences et de l'ingénierie des systèmes (Insis), en sera le pilote scientifique côté CNRS. Il est aussi responsable de la cellule Énergie du CNRS dont la structuration constitue, selon Jean-Luc Moullet, directeur général délégué à l'innovation (DGDI) du CNRS, « un avantage indéniable pour l'organisme. L'excellente coordination qui en résulte permet d'être très réactif et pertinent, notamment vis-à-vis des demandes des industriels. »



Abdelilah Slaoui

© D.R.

## Cap sur le quantique

Dans le cadre d'une stratégie nationale de 1,8 milliard d'euros annoncée le 21 janvier 2021, le pilotage du PEPR « technologies du quantique » (150 millions d'euros) a été confié conjointement au CNRS, au CEA et à Inria (Lire notre dossier p. 12). Au CNRS, le pilote scientifique sera Sébastien Tanzilli, directeur du Groupement de recherche (GDR) Ingénierie quantique : fondements et applications, et directeur adjoint scientifique de l'Institut de physique (INP) du CNRS. « Nous travaillons sur l'identification des acteurs du secteur et sur les contributions possibles du CNRS depuis plus de deux ans : nous savons dans quelle direction il faut aller », explique Alain Schuhl. « Notre force en quantique repose aussi



Sébastien Tanzilli

© UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR

1. Présenté par le Premier ministre le 3 septembre 2020, suite à la crise du Covid-19, ce plan est doté d'un budget de 100 milliards d'euros. 2. Unité CNRS/Univ. Rennes 1/ENS Rennes/Insa Rennes/Univ. Bretagne Sud/Inria/IMT Atlantique Institut Mines Telecom. 3. Laboratoire de psychologie sociale et cognitive (CNRS/Univ. Clermont-Auvergne).



© BERIK ISANONGETTY IMAGES

sur l'émergence de start-up qui valorisent déjà les découvertes scientifiques des laboratoires (lire p. 22-23)», confirme le DGI. Deux équipements prioritaires de recherche devraient faire partie du PEPR : une plateforme de calcul quantique atomique en ligne (AQCESS) et un réseau technologique pour les applications scientifiques et industrielles des capteurs quantiques à base de diamant (e-Diamant).

## Objectif cybersécurité

Le 18 février, Emmanuel Macron a annoncé un plan « cybersécurité » doté d'un milliard d'euros. Il s'agit d'un « enjeu essentiel pour la France, tant au niveau sociétal qu'économique », annonce la lettre de mission qui confie le PEPR dédié aux mêmes organismes que pour le quantique, avec un budget de 65 millions d'euros. La stratégie d'accélération vise ainsi à tripler le chiffre d'affaires de la filière d'ici 2025 et à diffuser massivement la cybersécurité dans les entreprises. Secteur « plus mûre » selon Jean-Luc Moullet, la cybersécurité dispose déjà de nombreux acteurs entrepreneuriaux de toute taille que le CNRS peut « accompagner » sur un marché mondial « très compétitif » en s'appuyant sur « les compétences fortes présentes au sein des laboratoires de recherche publics ». En tant que pilote scientifique, il revient à Gildas Avoine, membre de l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (Irisa)<sup>2</sup> et directeur du GDR Sécurité Informatique, d'identifier ces forces.



Gildas Avoine

© XAVIER PIERRE

► Un plan « cybersécurité » a été lancé le 18 février.

## L'école numérique

Ces compétences, notamment en sciences humaines et sociales, pourraient aussi être mises à disposition de la stratégie d'accélération « enseignement et numérique », les périodes de confinement récentes ayant montré les enjeux pédagogiques de la transformation numérique de l'enseignement, de la maternelle à l'université. Pascal Huguet, directeur du Lapsco<sup>3</sup>, est le pilote scientifique pour le CNRS du PEPR associé, dans lequel Aix-Marseille Université et Inria sont également impliqués.



Pascal Huguet

© D.R.

## D'autres stratégies à l'horizon

Sept autres stratégies d'accélération sont en cours d'élaboration, sur la santé numérique ou encore les villes durables, et chacune sera dotée de son PEPR. Et un autre type de PEPR existe également, en dehors de l'innovation dirigée du PIA4. Plus « exploratoires » et d'un montant plus faible, ils seront choisis ultérieurement sur la base de propositions faites par les organismes de recherche et sous l'œil d'un jury international. Un véritable « éventail d'opportunités à saisir », selon Jean-Luc Moullet. ||

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

MATIÈRE

TERRE

## OCÉANOGRAPHIE

Comprendre la pompe à carbone océanique et mieux connaître les éléments chimiques dans l'océan Indien Sud-Ouest austral : tels sont les objectifs de la campagne Swings. Entretien avec les deux chercheuses CNRS à la tête de cette mission, Hélène Planquette et Catherine Jeandel.

PROPOS RECUEILLIS PAR GAËL HAUTEMULLE



© CHRISTOPHE CASSOU, CNRS.

# En mission dans le plus grand courant océanique du monde

**Vous dirigez toutes les deux la campagne océanographique Swings (South West indian Geotraces Section). Quel est son objectif ?**

**Catherine Jeandel** <sup>1</sup>. Un objectif majeur de Swings est de mieux comprendre ce que l'on appelle la pompe à carbone océanique : dans le cycle du carbone naturel, la biologie marine joue un rôle clé en séquestrant de grandes quantités de CO<sub>2</sub> dans les eaux de l'océan profond.

**Hélène Planquette** <sup>2</sup>. Cette pompe biologique ne fonctionne que dans certaines conditions environnementales. En particulier, le phytoplancton a besoin de nutriments pour se développer : des nutriments classiques (ex nitrates) mais aussi des métaux en traces comme le fer, sortes de « vitamines » pour les algues. Nous devons

comprendre comment tout cela fonctionne. Dans ce but, nous avons embarqué le 13 janvier à bord du *Marion Dufresne II*, à La Réunion. Notre débarquement est prévu le 8 mars, après huit semaines de mer dans l'océan Indien Sud-Ouest austral.

**Vous étudiez le transport en éléments traces et isotopes au sein des masses d'eau ?**

**C. J.** Tout à fait. Cette mission s'inscrit dans un très grand projet international et collaboratif, Geotraces, dont l'objectif est de décrire et quantifier les sources d'éléments chimiques à l'océan, leur transformation une fois qu'ils y sont, et comment ils vont ensuite en être soustraits. Pour cela, nous nous appuyons sur des éléments de la classification périodique

« bavards », qui nous servent de traceurs... et qui sont très peu abondants dans l'océan.

**H. P.** Et nous allons les étudier par tous les moyens possibles ! Nous prélevons des échantillons de la surface jusqu'au fond de l'océan car nous avons encore beaucoup de choses à comprendre sur les mécanismes en cours dans l'océan, qui n'est pas tellement plus homogène, en termes d'écosystèmes, que la Terre.

**Quelle place la campagne Swings tient-elle au sein de Geotraces ?**

**C. J.** Par le biais du programme Geotraces, les géochimistes marins ont pour objectif de réaliser un atlas mondial de données de ces traceurs en *open access*. La tâche est donc immense et travailler chacun dans son

<sup>1</sup>. Directrice de recherche CNRS au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales - Legos (CNRS/Cnes/IRD/UPS), à Toulouse (Haute-Garonne). <sup>2</sup>. Chercheuse CNRS au Laboratoire des sciences de l'environnement marin - Lemar (CNRS/UBO/IRD/Ifremer), à Plouzané près de Brest (Finistère).

► *Le Marion Dufresne II* naviguant dans l'océan Austral.

coin n'a aucun sens. Geotraces a été conçu dans les années 2000, par les chercheurs eux-mêmes, qui ont réfléchi aux endroits opportuns à explorer, en fonction des flottes océanographiques et des intérêts scientifiques. Swings est la seule campagne océanographique dans ce secteur de l'océan austral, et nous y étudierons aussi la circulation et les transports physiques des masses d'eau.

**H. P.** L'accès est facilité à la communauté scientifique française grâce à *Marion Dufresne*, qui effectue régulièrement des rotations autour des îles Crozet ou Kerguelen par exemple. Nos recherches ne sont qu'une pierre à l'édifice, mais si l'on comprend mieux ces transports et les mécanismes de la pompe biologique du carbone par l'océan, qui piège le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, le dissout et le dépose au fond, nous comprendrons mieux son rôle sur le climat.

**Chacune a ses objets d'étude privilégiés, qui ont leurs spécificités ?**

**H. P.** En effet. Je me concentre par exemple sur le fer, élément trace essentiel à la photosynthèse, premier maillon de la pompe biologique du carbone. Le rôle de l'océan Austral dans la séquestration du CO<sub>2</sub> atmosphérique est important et les acteurs de cette séquestration, complexes, mettent en jeu l'activité biologique (photosynthèse en surface, export de matière carbonée vers les abysses...) et la circulation océanique (courants marins, transports de masses d'eau). Il est donc important de repérer d'où viennent les éléments nutritifs et comprendre les mécanismes qui les transforment. Pour le déterminer, nous avons recours aux distributions d'autres éléments tels que le manganèse ou l'aluminium, ou encore les isotopes.

**C. J.** Tous les éléments chimiques présents ne sont pas fabriqués à l'intérieur de la machine océan, d'autres sont issus des poussières des continents, des sédiments déposés par les fleuves sur les marges continentales,

etc. Nous étudions aussi ces sources et transports. Ainsi, les isotopes du néodyme, élément appartenant aux « terres rares » sur lequel j'ai beaucoup travaillé, permettent d'identifier l'origine de la matière en un point donné, par exemple si elle vient d'Afrique du Sud. On mesure aussi le baryum, traceur de l'activité bactérienne à moyenne profondeur, ou encore le radium, chronomètre permettant d'établir depuis combien de temps une eau a quitté la côte.

**Comment s'effectuent les prélèvements ?**

**H. P.** Nous disposons de plusieurs instruments : deux rosettes équipées de 24 bouteilles de 12 litres, dont une dédiée aux métaux en traces, et dont la collecte se fait ensuite dans une salle blanche dédiée, spécialement aménagée dans un conteneur de 20 pieds. Un « poisson » prélève de l'eau en continu à l'arrière du bateau, qui est acheminée dans cette salle blanche au moyen de pompes. Ces équipements sont gérés par la division technique de l'Institut national des sciences de l'Univers de Plouzané, près de Brest (Finistère). Par ailleurs, nos collègues étrangers apportent des collecteurs d'aérosols et de pluie.

**C. J.** Nous utilisons également treize pompes, capables de filtrer 1 000 litres d'eau de mer pendant environ trois heures, à des profondeurs ciblées pour leur intérêt. Nous faisons aussi des carottages de sédiments en des points bien précis.

**Les mesures ont lieu 24 h sur 24 ?**

**C. J.** Et sept jours sur sept ! Nous sommes 98 personnes à bord, dont 48 chercheurs et scientifiques rien que pour la mission Swings. Outre l'étude des éléments en traces, il est aussi prévu de comparer la concentration en CO<sub>2</sub> des eaux de surface à celle de l'atmosphère : c'est l'intérêt de la présence à bord du service national d'observation Oiso, qui réalise cette surveillance annuelle depuis 30 ans.

**H. P.** Quant au projet Map-Io, il s'appuie sur la plateforme du navire pour établir des mesures physiques de la distribution des aérosols dans l'atmosphère de l'océan Indien. Nous embarquons aussi le programme Themisto, qui étudie les écosystèmes pélagiques.

**Comment s'organise votre collaboration scientifique ?**

**H. P.** Il nous a paru important de nous partager le temps à bord. L'une de nous est toujours de quart, éveillée. Cela vaut aussi pour le type de prélèvements : par exemple, Catherine s'est occupée de les coordonner sur la rosette standard et moi sur la rosette propre. Enfin, pour construire cette mission, chacune a contacté plusieurs collaborateurs, à la fois en France et à l'étranger.

**C. J.** Les premiers drafts datent de 2010 ! Monter un projet comme celui requiert du temps et de la persévérance, ainsi qu'une équipe de collaborateurs motivés. Hélène et moi nous sommes aussi partagé la montagne de documents administratifs. Chacune est en permanence au courant de ce que l'autre fait, pour pouvoir pallier toute éventualité. ||

► *Hélène Planquette et Catherine Jeandel, le jour du départ de La Réunion, le 13 janvier 2021.*



© D.R.

**Pour en savoir +**

Suivez la campagne Swings sur notre blog édité en partenariat avec *Exploreur*, le journal en ligne de l'Université fédérale Toulouse Midi-Pyrénées :

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

[exploreur.univ-toulouse.fr](http://exploreur.univ-toulouse.fr)

# Comment se divise un groupe de personnes ?

SOCIÉTÉS  NUMÉRIQUE 

**MODÉLISATION** Une collaboration interdisciplinaire a mis au point une expérience pour comprendre le phénomène de scission des groupes soumis à une certaine quantité d'information. Une étude qui pourrait éclairer la polarisation des opinions sur les réseaux sociaux... **PAR SEBASTIÁN ESCALÓN**

Contrairement à l'idée reçue, les foules n'ont rien d'imprévisible. Les chercheurs savent très bien quantifier et modéliser leurs mouvements. Quelques règles simples de comportement individuel – ne pas rentrer dans les murs, ne pas bousculer son semblable – suffisent pour reproduire, par simulation informatique, la marche de centaines ou de milliers de personnes dans un espace. Pourtant, lorsqu'on donne un objectif et quelques informations aux individus qui les constituent, alors, soudain, des phénomènes collectifs étonnants, parfois violents, peuvent apparaître : ola dans les stades de foot, prise du Capitole à Washington, bousculades meurtrières...

## Modéliser les interactions

Depuis plusieurs années, le tandem toulousain formé par Clément Sire, physicien au Laboratoire de physique théorique<sup>1</sup> et Guy Théraulaz, éthologue au Centre de recherches sur la cognition animale<sup>2</sup>, s'intéresse aux phénomènes qui émergent lorsqu'un grand nombre d'individus, humains ou animaux, se regroupent et interagissent les uns avec les autres.

« On combine les méthodes de l'éthologie et les outils la physique statistique pour analyser les comportements. Une fois qu'on a compris les interactions individuelles, on peut développer des modèles et comprendre certains phénomènes d'intelligence collective observés dans les sociétés animales et humaines », explique Guy Théraulaz. Les chercheurs s'inté-

ressent en particulier à la communication au sein des groupes d'humains ou d'animaux. « Nous tentons de mesurer quantitativement les interactions sociales entre individus afin de comprendre les comportements collectifs qui en résultent », ajoute Clément Sire.

## Comprendre le rôle de l'information

Ils essaient de voir, en particulier, quelles informations peuvent modifier les comportements collectifs de

Des volontaires équipés d'un émetteur-récepteur déambulent pour retrouver les individus de leur propre couleur.

ces systèmes. En collaboration avec le Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS et la Toulouse School of Economics-Research<sup>3</sup>, les chercheurs ont imaginé une expérience<sup>4</sup> permettant de mieux comprendre comment l'information peut conduire un groupe de personnes à se scinder en deux. Ils ont ainsi pu aborder la ségrégation, un comportement qui rappelle aussi bien des phénomènes physiques, comme la



© DAVID VILLA, SCIENCEIMAGES, CBI, CNRS, TOULOUSE

1. Unité CNRS/Université Toulouse Paul-Sabatier. 2. Unité CNRS/ Université Toulouse Paul-Sabatier. 3. Unité CNRS/Université Toulouse Capitole/Inrae. 4. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2019.0801>

# En bref

séparation entre l'huile et le vinaigre dans la vinaigrette, que sociaux.

Pour cette expérience, les chercheurs ont réuni dans une salle vide un groupe de vingt-deux volontaires (expérience répétée avec plus de deux cents sujets au total). À chaque participant, ils ont assigné une couleur, rouge ou bleue. Aucun d'entre eux ne connaissait ni sa couleur ni celle des autres. Accroché à leur épaule, les volontaires portaient un petit émetteur-récepteur permettant de suivre en temps réel leur position dans l'espace, mais aussi de recevoir des signaux de l'ordinateur pilotant l'expérience. Les participants ont déambulé à leur guise dans l'espace. L'appareil émettait alors un bip lorsque « l'environnement » d'un sujet était majoritairement de la couleur opposée à la sienne. Le but du jeu : faire cesser tous les bips. Autrement dit, l'expérience prenait fin lorsque tous les participants étaient entourés en majorité d'individus de leur propre couleur.

## Faire émerger des comportements

« L'émetteur-récepteur faisait fonction d'appareil sensoriel. Il permettait aux participants de sonder leur environnement un peu comme notre œil », explique Clément Sire. En effet, celui-ci traduisait l'entourage des volontaires en un signal binaire : bip ou silence. Cependant, à l'insu des participants, les chercheurs contrôlaient la nature précise de l'environnement pris en compte, via un paramètre qu'ils ont appelé « k ». Celui-ci équivalait au nombre de personnes les plus proches du volontaire prises en compte pour l'émission des bips. Ainsi, pour  $k=3$ , l'appareil bipait si 2 ou 3 personnes parmi les 3 plus proches étaient de la couleur opposée. Pour  $k=5$ , il ne bipait que si au moins 3 personnes parmi les 5 plus proches étaient de la couleur opposée. Ainsi, grâce à  $k$ , les « maîtres du jeu » contrôlaient la quantité d'information fournie aux participants.

Très vite, les volontaires ont retrou-

vé leur propre groupe. Lorsque l'appareil d'un participant s'arrêtait de bip, celui-ci s'arrêtait tout naturellement de marcher. À chaque réitération de l'expérience, le groupe se scindait en plusieurs sous-groupes bleus ou rouges. Et lorsque la valeur de  $k$  augmentait, le nombre de sous-groupes à la fin de l'expérience diminuait. À partir de  $k=7$ , il ne se formait le plus souvent que deux groupes, nettement séparés. Ces résultats ont été parfaitement reproduits par un modèle numérique où les agents arrêtaient de marcher quand ils ne bipaient pas. « On montre que, selon la quantité d'information acquise par l'appareil, on peut faire émerger des comportements collectifs différents à l'insu des individus », analyse Clément Sire.

## Contrôler la ségrégation

Autre point remarquable : « Au-delà d'un seuil, même si l'information augmente, le résultat ne change pas », souligne Guy Théraulaz. Les répétitions de l'expérience l'ont bien montré : au-delà de  $k=7$ , le comportement du groupe restait le même et la ségrégation en deux groupes était presque parfaite. « Il existe donc une quantité maximale d'informations au-delà de laquelle l'acquisition d'informations supplémentaires ne change pas les performances collective du groupe », poursuit l'éthologue.

Pour Clément Sire et Guy Théraulaz, la ségrégation du groupe en deux couleurs est comparable à ce que l'on observe sur les réseaux sociaux. « Les phénomènes de polarisation y sont devenus un enjeu de société important. Les réseaux sociaux créent des bulles de filtres et des chambres d'écho où tout le monde pense à peu près de la même façon, rappelle Clément Sire. Notre expérience montre que l'on peut contrôler la ségrégation au sein d'un groupe à partir de l'information fournie aux individus. » ||



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

## UN PARTENARIAT AVEC NAVAL GROUP...

Le 16 février, le CNRS et Naval Group, le leader européen du naval de défense, ont signé un accord permettant, pour les quatre prochaines années, d'établir des projets de recherche communs dans des domaines allant des matériaux à l'énergie en passant par les interactions onde-matière et la mécanique des fluides. Les premiers porteront par exemple sur la maîtrise de la complexité des systèmes numériques et sur l'acoustique navale.

## ... ET L'AUSTRALIE

Quelques jours plus tard, cet accord-cadre s'est prolongé par la création à Adélaïde du laboratoire international Crossing, commun au CNRS, Naval Group, l'IMT Atlantique et trois grandes universités australiennes : l'université d'Adélaïde, l'université d'Australie du Sud et l'université de Flinders. Le premier laboratoire de recherche international du CNRS en Australie a pour objectif de concevoir de nouvelles façons pour les humains de travailler avec les robots et les systèmes autonomes.

[Plus d'infos sur cnrs.fr](http://plus.dinfos.cnrs.fr)

## CONVENTION AVEC LA RÉGION BRETAGNE

Le 24 novembre, le CNRS et la Région Bretagne ont signé une convention de coopération pour les cinq ans à venir. Quatre grands domaines de coopération ont été retenus : l'économie maritime pour une croissance bleue ; l'économie numérique sécurisée et responsable ; l'économie de la santé et du bien-être pour une meilleure qualité de vie ; l'économie de l'industrie pour une production intelligente. Cette convention est la quatrième du CNRS avec une région, après la Nouvelle-Aquitaine en mars 2019, l'Île-de-France en septembre 2019 et les Pays de la Loire en novembre 2020.

## INSTRUMENT

Début février, le CNRS a salué la décision de la France de devenir membre de SKA Observatory (SKAO), organisation intergouvernementale qui assurera la construction puis l'exploitation de ce qui sera le plus grand instrument de recherche en radioastronomie pour les dix à vingt ans à venir. SKA pourrait permettre des avancées importantes, par exemple pour l'étude de l'apparition des premières sources lumineuses dans l'Univers après le big bang ou encore la détection d'ondes gravitationnelles. Le CNRS avait classé l'instrument SKA parmi ses priorités et pilotait déjà la « Maison SKA-France ».

[Plus d'infos sur cnrs.fr](http://plus.dinfos.cnrs.fr)

MATIÈRE

UNIVERS

**ASTROPHYSIQUE** Début décembre, la sonde japonaise Hayabusa 2 a livré sur Terre des échantillons provenant de l'astéroïde Ryugu. Leur analyse, à laquelle participent plusieurs équipes du CNRS, doit beaucoup nous apprendre sur la formation du Système solaire.

PAR MARTIN KOPPE

# Hayabusa 2 livre sa poussière d'astéroïde

C'est un colis très particulier qui est descendu du ciel dans la nuit du 5 au 6 décembre. Tombé dans le désert australien de Woomera, le cadeau contient des échantillons de l'astéroïde Ryugu, rapportés après un long périple de la sonde Hayabusa 2<sup>1</sup>. De tout petits grains de matière qui ont bien des secrets à livrer sur les premiers instants du Système solaire.

« Le premier récupérateur d'échantillons a été ouvert au Japon, révélant des grains très noirs issus de l'astéroïde Ryugu. Une seconde malle au trésor cosmique doit également être déballée, mais les chercheurs sont extatiques : les quantités semblent déjà bien supérieures à ce qui était prévu », explique Patrick Michel, directeur de recherche au Laboratoire J.-L. Lagrange<sup>2</sup>, membre de l'équipe scientifique de Hayabusa 2 ainsi que des missions Hera, MMX et Osiris-Rex<sup>3</sup>.

« Le retour de ces échantillons était l'objectif principal de la mission, poursuit le chercheur. Ryugu est un astéroïde carboné, une catégorie si primitive que sa composition n'a pas dû évoluer depuis la formation du Système solaire. Il contiendrait donc encore les ingrédients nécessaires à l'élaboration des planètes. Nous voulons également découvrir le rôle des astéroïdes dans l'apparition de la vie sur Terre, savoir si les matières organiques qui sont présentes sur leur surface en étaient les précurseurs. »

## Un guitariste aiguilleur de l'espace

Le voyage aller-retour d'Hayabusa 2 pour Ryugu, commencé en 2014, est unanimement salué comme un incroyable succès, même s'il s'est accompagné de son lot de frayeurs. En effet, au dernier moment, les chercheurs ont constaté que la surface de Ryugu n'était pas seulement couverte de régolithe fin, sorte de poussière que l'on retrouve par exemple sur la Lune, mais qu'elle laissait affleurer de

nombreux rochers sur les zones initialement prévues pour l'atterrissage. Pour trouver un site de remplacement adéquat, il a fallu s'appuyer sur une technique 3D d'observation des différences d'ombres et de phases, un savoir-faire détenu par un spécialiste des plus surprenants. « Notre expert en images stéréo est Brian May<sup>4</sup>, le guitariste du groupe Queen, sourit Patrick Michel. Comme il était en concert à Milan lorsqu'on a reçu les premières images de Ryugu, j'ai pris ma voiture pour le rejoindre depuis mon laboratoire situé à Nice. Nous nous sommes retrouvés dans sa loge pour produire des paires d'images stéréo de l'astéroïde. »

Faute d'avoir trouvé un site, la première récolte d'échantillons a été sacrifiée afin de définir une nouvelle stratégie de prélèvement. Ainsi, deux petits rovers ont été envoyés sur Ryugu en septembre 2018. Équipés de caméras et d'accéléromètres, ils ont surpris les chercheurs en montrant un terrain très noir et rugueux, dépourvu de particules fines étalées sur sa surface. Le mois suivant, c'est l'atterrisseur Mascot<sup>5</sup> qui a pu se poser et étudier le sol avec de très bonnes résolutions. Sur les quatre instruments embarqués par Mascot, le microscope MicrOmega n'a malheureusement pas pu réaliser

© ARHIRO IKESHITA/JAXA



1. Hayabusa signifie « faucon pèlerin ». La mission est pilotée par la Jaxa, l'agence spatiale japonaise. 2. Unité CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur. 3. Lire « Comment dévier un astéroïde tueur ? », entretien avec Patrick Michel sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr). 4. Brian May a interrompu son doctorat en astrophysique lorsque Queen a connu un succès planétaire, mais il l'a terminé des années plus tard et collabore à différentes missions spatiales. 5. Développé par l'agence spatiale allemande (DLR) en collaboration avec le Cnes.



► Illustration de la sonde Hayabusa 2 en l'approche de l'astéroïde Ryugu.

d'images de la surface, à cause d'un atterrissage compliqué le positionnant mal.

Une autre version de l'instrument va cependant servir à analyser les échantillons revenus sur Terre. Ceux-ci ont été récoltés à l'aide d'un cornet ressemblant à une trompe de moustique. Hayabusa 2 a touché la surface de Ryugu et envoyé un petit projectile. Dans une opération dite « *touch and go* », la poussière générée par le choc a été capturée en seulement une seconde, puis la sonde s'est éloignée.

### MicrOmega sonde la matière

Entre les données déjà disponibles et celles qui seront tirées des échantillons rapportés sur Terre, les chercheurs auront de quoi publier pendant de nombreuses années. « *Cette mission s'inscrit dans la continuité de Rosetta et de son atterrisseur Philae : observer sur place la matière organique la plus primordiale que l'on puisse imaginer*, souligne Jean-Pierre Bibring, astrophysicien à l'Institut d'astrophysique spatiale<sup>6</sup> et responsable de MicrOmega. *La durée de vie limitée de cette mission n'a pas suffi pour caractériser entièrement la matière organique réfractaire qui compose l'essentiel du noyau cométaire, et que l'on retrouve vraisemblablement sur les astéroïdes carbonés.*

*Hayabusa 2 va nous permettre d'étudier ces grains issus de l'effondrement du disque d'accrétion qui a donné naissance au Système solaire, et qui ont pu jouer un rôle critique dans l'évolution vers le vivant sur Terre. »*

Les échantillons seront d'abord analysés par une copie terrestre de MicrOmega installée dans la « *curation facility* » (centre de conservation) dédiée, au Japon. Ce microscope hyperspectral à infrarouge peut sonder la matière à distance de manière parfaitement non destructive. La lumière infrarouge distingue

► Echantillon de poussières collectées sur Ryugu par Hayabusa-2.



beaucoup plus facilement les différents composants que la lumière visible, un point important car les échantillons sont d'une couleur foncée assez uniforme. Les minéraux altérés par de l'eau et les phases carbonées donnent ainsi une signature particulière, à laquelle les chercheurs, dont ceux issus de sept laboratoires CNRS<sup>7</sup>, seront spécialement attentifs. Une analyse fine qui permettra de dater les matériaux et la séquence de leurs transformations, ainsi que d'identifier la matière organique présente. « *Pendant les phases d'exploration, on connaît encore si mal les objets que si on répond à un grand nombre de questions fondamentales, on en soulève aussi d'autres* », affirme Patrick Michel.

### Des échantillons pour le futur

Une fois cette première étape terminée, les laboratoires du monde entier pourront candidater pour mener leurs propres études sur une partie des grains, y compris à l'aide de techniques destructives. 70 % des échantillons seront cependant conservés pour les générations futures. « *De jeunes chercheurs très enthousiastes adoreraient nous rejoindre*, glisse Jean-Pierre Bibring. *Nous sommes à l'aube d'un changement de paradigme sur l'origine de la vie et du Système solaire, qui justifierait l'existence de postes pour ces jeunes, afin de leur offrir de participer à ces recherches fondamentales qui suscitent un engouement international.* »

Quant à la sonde Hayabusa 2 elle-même, elle dispose encore de carburant et va être redirigée vers deux nouvelles cibles. La dernière étant un petit astéroïde de trente mètres de diamètre rotateur, qui tourne extrêmement vite sur lui-même, que la sonde devrait atteindre en 2031. ▮

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

6. Unité CNRS/Univ. Paris-Saclay. 7. CRGP (CNRS/Univ. de Lorraine), IJCLab (CNRS/Univ. Paris-Saclay), IAS (CNRS/Univ. Paris-Saclay), IMPMC (CNRS/MNHN/Sorbonne Université), IPAG (CNRS/Univ. Grenoble-Alpes), IPGP (CNRS/IPGP/IGN) et UMET (CNRS/Univ. de Lille/Inrae/Centrale Lille Institut).

# Les albatros, des sentinelles contre la pêche illégale

VIVANT



NUMÉRIQUE



**ÉCOLOGIE** Le projet Ocean Sentinel permet de lutter contre la pêche illégale en utilisant un système de balises embarquées sur des oiseaux marins. Il s'est vu décerner fin 2020 un prix Horizon Impact par la Commission européenne.

PAR LAURENCE STENVOT

Scientifiques et albatros, le ticket gagnant pour lutter contre la pêche illégale ? C'est en tout cas l'idée du projet Ocean Sentinel qui regroupe des chercheurs du CNRS et de l'université de La Rochelle, fortement soutenu par l'Europe. Construit dans le prolongement d'un premier programme ERC, Early life, sur le suivi des jeunes animaux marins durant leurs premiers mois de vie, il avait reçu en 2018 une bourse du programme ERC Proof of concept avant de devenir, à l'automne dernier, un des cinq projets<sup>1</sup> du programme-cadre Horizon 2020 pour la recherche et l'innovation de l'Union européenne (UE) récompensés par un Horizon Impact Award.

Ce prix, lancé il y a deux ans, met en avant des résultats concrets de projets financés par l'UE qui ont un impact démontré sur nos sociétés

dans les domaines économique, sociétal, politique et environnemental. « *Provenant directement de la recherche fondamentale en conservation, Ocean Sentinel a su se faire une place aux côtés de projets de recherche purement appliquée d'informatique et de médecine* », se réjouit le porteur du projet, Henri Weimerskirch, directeur de recherche au Centre d'études biologiques de Chizé<sup>2</sup>.

## Des patrouilleurs pour l'océan

Depuis les années 1980, Henri Weimerskirch développe et utilise des balises pour suivre des oiseaux marins. Avec son équipe, composée d'une dizaine de chercheurs CNRS, ce spécialiste en écologie et en oiseaux marins a équipé 169 albatros des îles Crozet, Kerguelen et Amsterdam, dans les Terres australes et antarctiques françaises, d'un nou-

veau système de balises-capteurs qui permettent de détecter les émissions radars de tous les bateaux qu'ils croisent. Ces oiseaux de grande taille sont fortement attirés par les bateaux de pêche, ce qui a permis de les transformer en patrouilleurs des océans. En parallèle, l'équipe a pu croiser les résultats des balises avec les données AIS<sup>3</sup> émises par les bateaux déclarés et celles des autorités françaises afin d'identifier des bateaux « non déclarés ».

Entre novembre 2018 et mai 2019, les albatros ont pu patrouiller sur plus de 47 millions de km<sup>2</sup> et couvrir quasiment tout le sud-ouest de l'océan Indien, atteignant ainsi également les zones économiques maritimes australiennes et sud-africaines. La méthode a permis aux chercheurs d'estimer la pêche illégale entre 10 et 15 % dans la zone économique française. Dans la zone sud-africaine, aucun des bateaux n'était déclaré et dans les eaux internationales, près du tiers des navires avaient leur système AIS déconnecté. « *Ces informations montrent qu'il est possible de développer*

© CORENTIN MATHERON/TA&F

1. [https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/prizes/horizon-impact-award\\_en](https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/prizes/horizon-impact-award_en) 2. Unité CNRS/Université de La Rochelle. 3. Automatic Identification System. 4. <https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/mission-starfish-il-faut-stopper-la-degradation-de-lhydrosphere-et-reparer-les-degats>



une surveillance maritime via les oiseaux marins, alors que la surveillance de la pêche dans les eaux du grand large reste quasiment impossible aujourd'hui », estime Henri Weimerskirch.

### Un concept qui s'exporte

Des résultats qui ont su attirer l'attention. « Plusieurs pays ont d'ores et déjà importé le concept, comme le Royaume-Uni ou la Nouvelle-Zélande qui utilisent les capteurs développés par Ocean Sentinel », indique le chercheur qui est aujourd'hui approché par d'autres pays pour appliquer le concept en Europe et en Australie. Et si l'engouement s'est fait sentir, Ocean Sentinel a également fait des vagues en Europe en pointant certains pays du doigt, tel l'Espagne.

Outre la concurrence déloyale pour les pêcheurs respectant la réglementation, la pêche illégale représente une menace grave pour les ressources marines mondiales alors que l'UE a désigné la protection des océans comme l'un des grands défis contemporains au travers de sa mission Starfish<sup>4</sup>. Le nouvel outil Ocean Sentinel devrait donc pouvoir participer à l'effort pour répondre à ce grand enjeu. Et au-delà de l'Europe,

► Cet albatros est équipé d'une balise-capteur qui détecte les émissions radars des bateaux à proximité.

« la Convention internationale pour la conservation des ressources marines antarctiques (CCAMLR), qui réunit près de 40 pays, réfléchit aujourd'hui à la meilleure façon de pérenniser le concept dans la zone australe », rapporte Henri Weimerskirch.

Avec son équipe, il guette déjà les prochains projets : un nouveau programme autour des îles Hawaï dans le Pacifique nord – pour l'instant repoussé d'un an à cause de la crise sanitaire – ainsi que la continuation du programme en zone australe, mais sur de plus petites espèces d'oiseaux marins avec une version miniaturisée « du capteur testé avec succès cette année à Kerguelen ». « Ocean Sentinel est l'exemple même qu'un projet de recherche fondamentale en écologie peut déboucher sur du concret », réaffirme le chercheur. ||



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

## En bref

### ACCORD-CADRE

Le 20 novembre 2020, le CNRS et l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) ont renouvelé l'accord-cadre qui définit les conditions de collaboration sur des sujets d'intérêt commun. Depuis la création en 2001 de l'IRSN, les scientifiques des deux organismes collaborent en effet dans un large champ disciplinaire allant de la physique nucléaire à l'écologie, en passant par la micromécanique, la mécanique des fluides, la chimie, la radiobiologie ou encore les géosciences. Les publications communes sont nombreuses – 1 063 copublications entre 2016 et 2020 – et leur nombre augmente régulièrement.

Lire l'article sur <https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/le-cnrs-et-lirsn-renouvellent-leur-accord-cadre>

### HANDICAP

Le Plan d'actions handicap 2020-2023 du CNRS est en ligne. Ce 4<sup>e</sup> plan présente les moyens mis en œuvre par l'organisme dans le cadre sa politique en faveur du recrutement et du maintien dans l'emploi des personnes en situation de handicap.

[handicap.cnrs.fr](https://handicap.cnrs.fr)

### INTERNATIONAL

Le 21 janvier dernier, le CNRS et l'Université de la Colombie-Britannique ont inauguré le projet de recherche international (IRP) intitulé *Maxwell-Berger low noise underground research laboratory*. Il rassemble cinq laboratoires autour d'une coopération originale qui fait le lien entre géophysique et sciences médicales, en étudiant les caractéristiques du cerveau et des couches géologiques, mesurables à travers des champs électriques et électromagnétiques. Il vient enrichir le réseau de coopération du CNRS au Canada, composé actuellement de quatre *International Research Laboratories* (IRL), de douze *International Research Projects* (IRP) et d'une dizaine d'*International Research Networks* (IRN).

**RECHERCHE** Doté d'un budget de 95,5 milliards d'euros, le nouveau programme-cadre pour la recherche et l'innovation 2021-2027 de l'Union européenne est officiellement lancé. Retour sur ses nouveautés et leurs implications pour le CNRS. PAR LAURENCE STENVOT

# Horizon Europe, un nouveau souffle pour la recherche

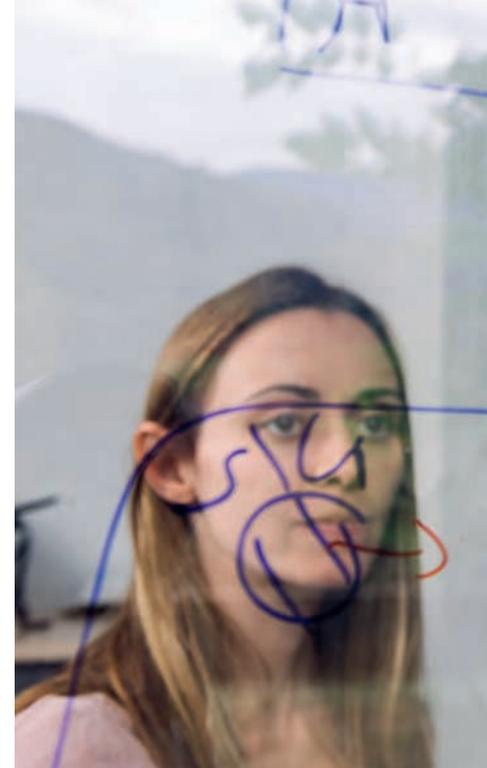
Après une campagne du monde de la recherche en faveur d'un programme-cadre mieux financé, le budget d'Horizon Europe a finalement été voté le 11 décembre 2020. Avec 95,5 milliards d'euros (Md€), il dépasse de 20 % les 79 milliards de son prédécesseur Horizon 2020. Et cela, sans prendre en compte un possible financement du Royaume-Uni, devenu pays associé<sup>1</sup> suite au Brexit.

Horizon Europe reprend les grands « piliers » de Horizon 2020, mais en accentuant son côté stratégique. Le premier pilier, « Excellence scientifique », doté d'un budget de 25 Md€, est consacré à la recherche fondamentale. Il comprend le Conseil européen de la recherche (ERC), doté de 16 Md€, les actions Marie Skłodowska-Curie (6,4 Md€) et les Très grandes infrastructures de recherche (2,4 Md€). Le deuxième pilier, « Problématiques mondiales et compétitivité industrielle européenne », a pour objectif de soutenir de grands projets

collaboratifs, avec une organisation en « clusters ». Il centralise la plus grosse part des financements avec 53,5 Md€. Et le troisième, « Europe innovante », doté de 13,6 Md€, est voué au développement de l'innovation et des applications (entreprises, start-up, etc.). Sans oublier un pilier transverse, ou « pilier couché », doté de 3,4 Md€ pour attirer des talents, favoriser leur circulation et empêcher un « brain drain » hors de l'UE.

## Plus de 600 projets ERC déjà financés dans les laboratoires du CNRS

Au cœur du pilier I, l'ERC espérait obtenir un budget supérieur pour devenir encore plus compétitif et augmenter les taux de réussite. Mais avec 16 milliards, il a évité le pire. Un soulagement pour la recherche fondamentale européenne au sein de laquelle les chercheurs du CNRS sont particulièrement présents : ils ont remporté le financement de plus de 600 projets ERC<sup>2</sup>, avec un taux de succès de 17 %, le premier

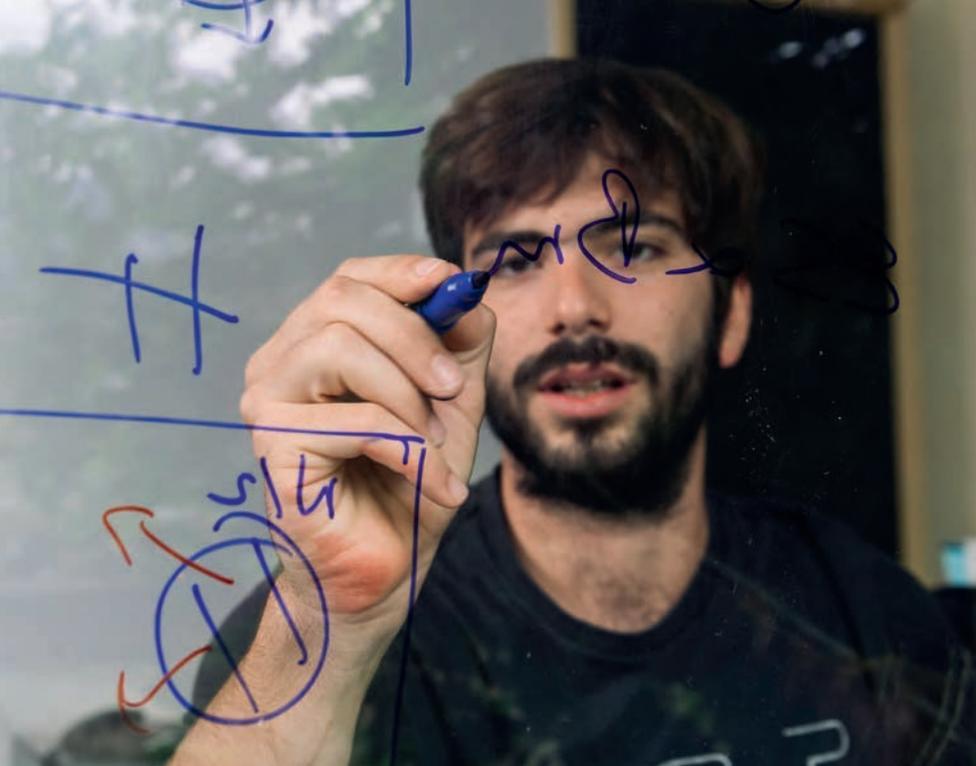


en Europe. « Cela montre la performance du CNRS tant au niveau de la qualité de ses chercheurs que de l'accompagnement des dossiers avec le programme Inciter/accompagner/Influencer, mis en place en 2020 », rapporte Alain Schuhl, directeur général délégué à la science (DGDS) du CNRS, expliquant que l'organisme se doit d'aller encore plus loin en « incitant entre autres tous les nouveaux entrants à postuler dans les 3 à 4 ans après leur arrivée ».

Le pilier II, quant à lui, est organisé en six « clusters » thématiques<sup>3</sup> dédiés à de grandes problématiques mondiales. « La majorité des fonds est placée sur la santé ; le climat – avec le Green Deal qui constitue la « super mission » du programme – et le numérique dont les enjeux consistent à mettre en place une Europe numérique capable de se doter de son propre cloud et de contrer l'hégémonie des Gafam<sup>4</sup> », explique Pascal Dayez-Burgeon, responsable du pôle Europe communautaire et directeur du Bureau du CNRS à Bruxelles.

On retrouve également dans ce pilier les cinq grandes missions qui visent à générer des solutions et initiatives autour de grands défis contemporains que sont l'adaptation au changement climatique, la protection des océans, la lutte contre le

1. Quatorze pays (anciennement associés à Horizon 2020) devraient être associés au nouveau programme, dont la Suisse. Chaque État associé devra verser à Horizon Europe l'équivalent des fonds qu'il aura perçus. 2. ERC Starting Grant, Advanced Grant, Consolidateur Grant. 3. Santé ; Culture, créativité et société inclusive ; Sécurité civile pour la société ; Numérique, industrie et



© CYRIL FRESILLON/SETACNRS PHOTO THÉRIQUE

cancer, les villes neutres en carbone et la santé des sols. « *Si l'on compare les objectifs de ce pilier au Contrat d'objectifs et de performance du CNRS et ses six grands défis*<sup>5</sup>, on est au cœur de ces grandes missions », note Alain Schuhl.

### EIC, la future banque de la recherche européenne ?

Une des principales nouveautés d'Horizon Europe : le Conseil européen de l'innovation (EIC) est intégré au pilier III « Europe Innovante ». Il s'adresse à des porteurs de projets

industriels pour les inciter à participer au financement et au montage d'entreprises.

Jean-Luc Moullet, directeur général délégué à l'innovation (DGDI) du CNRS, souligne que « *cette démarche traduit la volonté d'accompagner les projets les plus ambitieux dans le cadre d'une procédure unique* », qui combine des outils adaptés aux différentes étapes du cycle de développement des start-up « deep tech » issues des laboratoires publics de recherche. « *De fait, nos équipes sont pleinement*

► **Discussions théoriques sur les modèles d'évolution climatique dans le cadre de deux projets ERC, Biostases et Fragclim.**

*mobilisées pour identifier et accompagner dans leur démarche vis-à-vis de l'EIC les meilleures opportunités issues des laboratoires dont le CNRS assure une tutelle* », assure le DGDI.

### Une Europe de la recherche « plus stratégique »

Horizon Europe est marqué par une volonté d'être « plus stratégique » et met à ce titre l'accent sur l'interdisciplinarité et l'intersectorialité tout en préservant la liberté de la recherche, fondée sur la curiosité. Pour y parvenir, le programme encouragera le dialogue et la « co-construction avec les organismes de recherche et les entreprises » et se fixera des « indicateurs d'impacts de résultats ».

C'est notamment pour s'inscrire dans cette logique de co-construction que le CNRS participe au réseau du G6<sup>6</sup>. L'objectif est d'influencer pour être en position d'interagir avec Bruxelles. Le CNRS s'est ainsi doté d'un groupe de coordination Horizon Europe afin de « *coordonner l'ensemble de nos actions et donner des réponses à leurs interrogations* », précise Alain Schuhl. C'est l'objectif de la mission qui a été confiée à Christelle Roy, chargée de mission Europe auprès du DGDS, qui devrait aboutir au début du printemps prochain (lire encadré). ▮



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

## Le CNRS se dote de « groupes miroirs » dédiés à Horizon Europe

Pour rendre le nouveau programme-cadre plus accessible à ses chercheurs, pour dialoguer avec le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (Mesri) ou encore porter sa voix directement auprès des instances européennes, le CNRS se mobilise pour créer des groupes de travail miroirs.

« *Ces groupes font miroir aux Groupes thématiques nationaux (GTN) mis en place par le Mesri* », explique Christelle Roy. Chaque action de chaque pilier disposera de sa structure de coordination, et donc de son propre GTN. L'objectif est de « *décliner les enjeux stratégiques du CNRS* » et une « *position globale à l'Europe* ». Chaque responsable de groupes miroirs CNRS sera intégré au GTN du ministère équivalent et pourra ainsi « *porter la*

*voix du CNRS au ministère* », qui lui-même la portera aux représentants des instances européennes. « *Ces groupes miroirs feront aussi le lien avec les unités de recherche et nos scientifiques pour les inciter à postuler aux appels à projets d'Horizon Europe en particulier en proposant des projets collaboratifs* », souligne Christelle Roy.

Un plan d'actions permettant une meilleure organisation sera proposé dans les prochaines semaines, afin de mieux s'organiser pour atteindre l'un des objectifs du Contrat d'objectifs et de performance du CNRS : augmenter de 25 % les entrées financières provenant de l'Union européenne. Pour y arriver le CNRS se doit « *de se doter des moyens de sa politique européenne volontariste* », conclut Alain Schuhl.

espace ; Climat, énergie et mobilité ; Alimentation, bioéconomie, ressources naturelles, agriculture et environnement. 4. Acronyme qui désigne les géants du web : Google, Amazon, Facebook, Apple et Microsoft. 5. Changement climatique, inégalités éducatives, intelligence artificielle, santé et environnement, territoires du futur, transition énergétique. 6. Le G6 réunit le CNR, le CNRS, le CSIC, l'Association Helmholtz, la Communauté Leibniz et la Société Max-Planck.

# « Le CNRS se doit d'être irréprochable sur la question des pratiques de recherche »



© CHRISTIAN MALETTE

**ENTRETIEN** En 2018, le CNRS se dotait d'un référent « à l'intégrité scientifique » en la personne du physicien Rémy Mosseri. Il revient aujourd'hui sur ses missions et dresse un premier bilan des signalements durant ses deux ans d'exercice.

PROPOS RECUEILLIS PAR SOPHIE FÉLIX

## **Vous êtes référent à l'intégrité scientifique au CNRS depuis deux ans. Quelles sont vos missions ?**

**Rémy Mosseri** <sup>1</sup>. La plupart des opérateurs de recherche (organismes, universités ou écoles) ont nommé un « référent à l'intégrité scientifique » (RIS). C'était une demande forte du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, à la suite du rapport de Pierre Corvol <sup>2</sup> sur l'intégrité scientifique en 2016. J'ai moi-même été nommé au CNRS le 1<sup>er</sup> août 2018 avec deux missions principales : la formation à l'intégrité scientifique au sein de l'organisme et le traitement des signalements de méconduite. On décrit ces écarts à l'intégrité scientifique par la trilogie Fabrication de données/Falsification de données/Plagiat de travaux ou d'idées, à laquelle s'ajoute une « zone grise » de pratiques discutables (choix et ordre des auteurs d'une publication, conflits d'intérêt, etc.).

Côté formation, nous essayons d'intervenir de façon large, en parti-

culier lors de rencontres organisées par le CNRS (journées des nouveaux entrants, réunions de directeurs d'unité ou de délégués régionaux, etc.) pour décrire ces questions et les modalités mises en place au CNRS pour les traiter.

## **Quel bilan tirez-vous de ces deux années ?**

**R. M.** : Nous avons reçu à ce jour quelque 90 signalements et, après analyse, avons formalisé 54 saisines, souvent autour de querelles liées à la paternité des idées ou à l'interprétation d'un résultat lors de collaborations. Depuis quelques années, l'intégrité scientifique devient un enjeu majeur. Aujourd'hui, grâce à nos actions de communication et formation, la communauté connaît bien l'existence du dispositif. Pour autant, nous restons à un nombre régulier de nouveaux signalements.

Nous sommes encore en période d'apprentissage pour traiter au mieux les différents cas et espérons nous équiper bientôt de plusieurs outils

pour nous aider à mieux caractériser les méconduites scientifiques – logiciels d'analyse d'images pour repérer d'éventuelles manipulations de figures, ou de détection des plagiat par traduction. Les investigations sont longues. Une fraction non négligeable des saisines se résolvent via une action de médiation/conciliation mais il peut aussi arriver que l'enquête ne parvienne pas à conclure. Dans près de 50 % des cas finalisés, nous avons conclu à l'absence de faute, même si leur nombre reste encore faible pour tirer une conclusion. Et les cas graves restent heureusement rares.

Si la plupart des disciplines sont touchées, notre recul sur deux ans montre que les saisines visant des scientifiques en biologie sont plus nombreuses que le poids de la discipline au sein du CNRS. Il serait important de comprendre pourquoi : spécificités de la discipline, mauvaises pratiques anciennes encore non corrigées, compétition exacerbée par la course à la publication ? Les sciences humaines et sociales semblent également assez touchées, en particulier par des signalements de plagiat.

1. Directeur de recherche au CNRS, il a été membre du Collège du haut conseil de l'évaluation de la Recherche et de l'Enseignement supérieur, avant de rejoindre le comité d'éthique du CNRS en 2016.  
2. Administrateur honoraire du Collège de France et vice-président de l'Académie des sciences. Son rapport de 2016 contient 16 propositions de recommandations sur l'intégrité scientifique.

## Quels sont les enjeux pour l'organisme ?

**R. M. :** Un opérateur de recherche se doit d'être irréprochable sur la question des pratiques de recherche. Le CNRS a eu sa part d'affaires récentes, parfois très commentées. Prévenir le phénomène et mettre en place une structure pérenne pour traiter les cas était indispensable. Il y a un double enjeu de confiance en la qualité des recherches : pour la communauté scientifique, afin de faire progresser la science, mais aussi pour le grand public. Cette confiance est nécessaire pour que les chercheurs puissent porter une parole rationnelle et être écoutés dans les grands débats sociétaux à fort contenu scientifique, nombreux aujourd'hui.

De par sa taille, son caractère pluridisciplinaire et son implantation nationale voire internationale, et bien que nous n'ayons bien sûr pas plus de cas proportionnellement, le CNRS nécessitait une organisation particulière pour remplir cette tâche. Si je suis le point d'entrée unique des signalements et procède à leur première analyse, ils sont ensuite traités dans le cadre de la Mission à l'intégrité scientifique (MIS) du CNRS, que j'anime. Par leurs compétences disciplinaires, les personnes qui la constituent permettent une compréhension plus fine des cas signalés.

Enfin, tous les RIS avec lesquels nous sommes souvent en co-investigation, rassemblés dans le réseau Resint, partagent un certain nombre de principes. S'il doit être transparent quant aux modalités suivies, le traitement des saisines est entièrement confidentiel. Les signalements anonymes ne sont pas acceptés, mais nous pouvons en retour garantir la confidentialité quant à l'auteur du signalement. Nous appliquons un principe de présomption d'innocence pour les personnes mises en cause. Et au CNRS, si l'investigation montre qu'une personne a été accusée à tort, celle-ci reçoit un courrier officiel le signifiant : une réputation scientifique met des années à se construire et la rétablir est parfois difficile. ||

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

## En bref

# Ce coquillage est un instrument de musique vieux de 18 000 ans

C'est un véritable trésor qui dormait dans les réserves du Muséum d'histoire naturelle de Toulouse. Ce coquillage de 31 centimètres de long, décrit comme un « vase à eau » lors de sa découverte en 1931 sous le porche de la grotte ornée de Marsoulas (Haute-Garonne), vient de livrer sa vraie nature aux archéologues. Loin de servir de contenant, ce coquillage de la famille des *Charonia lampas*, un mollusque que l'on retrouve aujourd'hui encore dans le golfe de Gascogne, se révèle en réalité être un... instrument à vent. Cela en fait la première conque musicale jamais identifiée pour la période paléolithique, un objet contemporain de l'occupation de la grotte ornée pyrénéenne, il y a 18 000 ans de cela, par les hommes du Magdalénien. Pour mémoire, le plus vieil instrument à vent est une flûte en os de vautour datée de 40 000 ans.

Un examen approfondi de la conque a permis d'attester qu'elle avait bien été aménagée par les Magdaléniens de Marsoulas pour en faire un aérophone – un instrument de musique à vent. « Les spécialistes me l'ont confirmé : ces coquillages sont d'une extrême dureté et il est impossible que la pointe du coquillage – aussi appelée apex – ait été séparée accidentellement du spécimen », indique Carole Fritz, directrice du Centre de recherche et d'études de l'art préhistorique – Émile Cartaiac (Creap). Un second orifice, pratiqué au niveau de la deuxième spire du coquillage et révélé par tomographie, confirme l'intervention humaine. Autre modification visible : le bord extérieur du pavillon du coquillage a été taillé. Des traces de matière organique ont enfin été retrouvées près de la pointe de la conque de Marsoulas – peut-être



© C. FRITZ

► Cette conque provient de la grotte ornée de Marsoulas, dans les Pyrénées.

formaient-elles un embout pour faciliter le jeu du musicien ?

À l'invitation des chercheurs, un joueur professionnel de cor est venu souffler dans la conque, et l'analyse des fréquences produites a permis d'identifier trois sons proches des notes do, do dièse, et ré. « Il n'a pu en tirer davantage, car le bord coupant de l'orifice l'empêchait de bien positionner ses lèvres », commente Carole Fritz. Également sollicité, Emmanuel Kasarherou, directeur du musée du Quai Branly, a pu constater la parenté de l'objet avec les conques musicales présentes dans les collections du musée consacré aux arts premiers. « La conque dans le Pacifique est un objet extrêmement commun dont on fait encore de nos jours des instruments de musique », rappelle l'archéologue. ||

PAR LAURE CAILLOCE



© C. FRITZ

▼ La pointe du coquillage et le bord extérieur du pavillon ont été supprimés.

# À Nantes, une étude inédite sur la pollution des sols

VIVANT



TERRE



**ENVIRONNEMENT** Les scientifiques du programme Pollusols ont travaillé durant cinq années sur les pollutions diffuses causées par les métaux, les radioéléments ou encore les pesticides. Un enjeu majeur alors que les grandes métropoles lorgnent les friches industrielles et agricoles pour s'agrandir.

PAR LAURE CAILLOCE

**D**es jardins que le plomb empêche d'exploiter, une ancienne décharge imprégnée de résidus antibiotiques, des coquillages aux teneurs en cuivre problématiques... La première étude d'ampleur menée dans la région nantaise sur les pollutions diffuses constate la variété des dommages causés aux sols et aux eaux qui y ruissellent. « À la différence d'une pollution massive qui est localisée et a une origine connue, les pollutions diffuses se caractérisent par des faibles concentrations de contaminants, aux sources parfois difficiles à cerner, qui vont impacter des surfaces importantes », précise Thierry Lebeau, spécialiste de la pollution des sols au Laboratoire de planétologie et géodynamique<sup>1</sup> et pilote du programme Pollusols.

Le projet, qui rassemble dix-huit équipes de recherche, a été mené sur le bassin-versant aval de la Loire, d'Angers jusqu'à l'estuaire, et inclut des analyses de sols et des eaux. Longtemps passées sous le radar, les pollutions diffuses alertent aujourd'hui les scientifiques : « même si elles sont peu élevées, ces concentrations peuvent être problématiques pour la santé de l'environnement comme pour la santé humaine. On est ici sur de la toxicité chronique, avec un effet cumulatif dans le temps et une possible combinaison de polluants », rappelle le chercheur.

## Cuivre et plomb tétraéthyle dans l'estuaire

La production de plomb tétraéthyle par l'usine de Paimboeuf située entre Nantes et l'estuaire n'a pas été sans conséquences. Les rejets de ce produit, destiné à enrichir l'essence jusqu'à son remplacement par le bioéthanol dans les années 1990, ont contaminé l'eau du fleuve et les coquillages de l'estuaire. « Les analyses effectuées sur les archives d'huîtres (des échantillons d'huîtres ont été prélevés tous



©GREGA LUNIV, EIFFEL LUNIV, NANTES-IRSTV / POLLUSOLS



©POLLUSOLS

▼ Analyse des eaux souterraines de l'ancienne décharge de la prairie de Mauves (en haut) et prélèvement de carottes de sol dans un jardin partagé (en bas).

les six mois depuis quarante ans, Ndlr) montrent une diminution régulière de la concentration en plomb tétraéthyle depuis que l'usine a fermé, note toutefois Thierry Lebeau. Mais ce plomb à la signature caractéristique est toujours présent dans les sédiments au fond de l'eau, et pourrait être remobilisé si la température ou le pH de celle-ci venait à se modifier. »

Un autre polluant pose aujourd'hui question : le cuivre, dont la concentration a doublé en trente ans dans ces mêmes huîtres. Or cet oligoélément, indispensable à la vie, est à fortes doses un antiseptique puissant et devient toxique pour les êtres vivants. L'origine du cuivre retrouvé

1. Unité CNRS/Univ. de Nantes/Univ. d'Angers.



© JOEL KNOERY/IFREMER



© POLLUSOLS

► Recherche de traces de cuivre dans l'estuaire de la Loire.

► Essai de cultures potagères faiblement accumulatrices de plomb.

dans l'estuaire reste toutefois encore incertaine. « Il y a trois hypothèses possibles, indique Thierry Lebeau. La première est qu'il est issu de la "bouillie bordelaise" utilisée par les viticultures conventionnelle et biologique pour traiter la vigne. La deuxième, qu'il provient de l'abrasion des plaquettes de frein dont il est un constituant. Troisième origine possible : les peintures des bateaux, celles-ci intégrant du cuivre pour éviter la formation de films microbiens. » Des analyses sont en cours, qui espèrent distinguer les différents isotopes du cuivre et leurs provenances respectives...

### Uranium et tritium, les produits du nucléaire

Jusqu'aux années 2000, le massif armoricain a été exploité pour ses ressources en uranium, notamment sur les sites de Gétigné, près de Clisson, ou de la Commanderie, à Treize-Vents, au sud de Nantes. Lorsque le minerai extrait de ces mines à ciel ouvert contenait une quantité trop faible d'uranium, il était déposé de part et d'autre de la mine et a notamment servi de remblai pour construire des chemins. La mine inondée de Gétigné est par ailleurs toujours utilisée pour irriguer les champs. Si les acteurs du nucléaire parlent de « radioactivité naturelle renforcée » pour qualifier les mesures d'uranium dans la zone, les chercheurs de Pollusols vont plus loin. « On s'est intéressé au transfert

d'uranium dans le réseau hydrographique et dans les sols agricoles alentour, précise Thierry Lebeau. Force est de constater qu'on n'est plus sur du "bruit de fond" géologique, les concentrations sont plus importantes que cela. »

Les conséquences sur l'environnement sont plus difficiles à démêler, les effets croisés n'étant pas à exclure avec d'autres polluants. Les chercheurs de Pollusols travaillent encore à la mise en place d'indicateurs pertinents, en étudiant notamment les micro-organismes du sol. D'autres sites similaires en France révèlent néanmoins des déformations anatomiques chez les arthropodes du sol – comme les vers de terre –, très exposés aux polluants par l'eau qu'ils ingèrent et le contact direct de leur derme avec ces produits.

Quant au tritium, l'isotope radioactif de l'hydrogène rejeté en toute légalité dans les eaux de la Loire par les cinq centrales nucléaires qui la bordent ou bordent ses affluents, il se retrouve jusque dans les sédiments de l'estuaire. Les chercheurs pointent aussi une accumulation de ce radioélément toxique dans les végétaux, du fait de la facilité avec laquelle il se lie à la matière organique, qu'elle soit morte ou vivante.

### La reconversion d'une ancienne décharge

Prise en sandwich entre la Loire et une zone Natura 2000, la décharge de la prairie de Mauves, à Nantes, a accueilli des déchets ménagers, des gravats, mais aussi les déchets hospitaliers de la ville pendant vingt ans. « On y retrouve encore des thermomètres au mercure ou des plaquettes entières de médicaments, détaille Thierry Lebeau. L'analyse des eaux de ruissellement a, elle, révélé la présence de résidus pharmaceutiques, de bisphénol A issu des plastiques et même de micro-organismes antibiorésistants... » Sur cette décharge longue de 2 kilomètres et large de 500 mètres, les déchets ont été posés à même le sol sablonneux, sans étanchéification du fond, sur une dizaine de mètres d'épaisseur. Des voies de transfert des contaminants vers la Loire ont d'ailleurs été identifiées.

Comme sur d'autres friches de la périphérie nantaise, se pose la question du réemploi de ce terrain. « Vu le volume de déchets concerné, il est impossible d'excaver le sol pour dépolluer. Si aucune piste n'est encore privilégiée par la métropole pour la reconversion du site, il y a un préalable incontournable : son confinement, afin d'éviter que les eaux de pluie ne continuent d'y ruisseler. » Une couverture étanche constituée d'un voile géotextile et d'une couche d'argile pourrait être la solution retenue. Plusieurs scénarios sont ensuite possibles pour une ancienne décharge : créer un espace vert dédié à la promenade – à condition de ne pas y planter de végétaux aux racines trop longues qui risqueraient de percer la couverture étanche –, installer des panneaux solaires... La construction de logements ou de commerces est généralement déconseillée, car la fermentation des déchets dégage des biogaz susceptibles de générer des accidents.

▼ La pression foncière est forte dans la métropole nantaise, où le réemploi des terrains pollués se pose avec acuité.



### Dépolluer des jardins partagés contaminés au plomb

C'est le rêve de beaucoup, et pourtant : cultiver son potager en pleine ville peut s'avérer risqué pour la santé. À Nantes, les analyses effectuées dans la trentaine de jardins familiaux mis à disposition par la ville ont révélé que plus d'un tiers contenait des parcelles contaminées au plomb. À l'origine de cette découverte : une association de jardiniers qui s'est cotisée pour faire analyser son terrain. Alertée des résultats, la ville a contacté l'université de Nantes et financé une expertise. Les jardins les plus concernés par des pollutions ont été cartographiés, révélant également pour certains des teneurs préoccupantes en arsenic. « Les contaminations au plomb sont assez fréquentes dans les villes, du fait de la présence dans le passé de fonderies de plomb, explique Thierry Lebeau. Des analyses dans les jardins familiaux de Nancy, Lille, Strasbourg, Paris et Marseille ont d'ailleurs révélé des pollutions similaires. Le savoir permet d'agir sur le problème. »

Pour en savoir +  
Le site du programme Pollusols : [www.univ-nantes.fr/osuna/pollusols](http://www.univ-nantes.fr/osuna/pollusols)

“On ne pourra jamais dépolluer tous les sites contaminés, à Nantes comme ailleurs. On a cette pollution et on va devoir vivre avec.”

À Nantes, l'un des jardins a dû être temporairement fermé, d'autres ont vu leur terre remplacée, tandis qu'un jardin expérimental suivi par les chercheurs a continué son activité en modifiant la sélection des légumes cultivés. « Sur des sols contaminés au plomb, il faut éviter les légumes racines comme la carotte, les radis ou le navet, mais aussi le poireau, très accumulateur, préconise Thierry Lebeau. Et privilégier des légumes qui ne stockent pas ce métal comme la tomate, le chou, le haricot vert ou la pomme de terre. Dans tous les cas, il faut prendre soin de bien laver ses légumes avant de les consommer afin de ne pas ingérer de terre. »

Les scientifiques travaillent en parallèle sur des moyens naturels de dépolluer le sol. « Les villes manquent de terre végétale, excaver les sols modérément contaminés n'est donc pas la meilleure option », raconte Thierry Lebeau, qui préconise l'utilisation de plantes accumulatrices de plomb pour progressivement assainir les parcelles. C'est la méthode dite de phytoextraction. « Certains végétaux, comme la moutarde brune, sont de véritables "aspirateurs" à métaux. En pompant l'eau du sol, ils absorbent le plomb, mais aussi le cuivre ou le mercure, dont une partie se retrouve piégée dans les parties aériennes de la plante. Il suffit alors de récolter et d'orienter ces déchets végétaux vers le circuit adapté. » La méthode demande néanmoins d'être patient : dépolluer un sol par ce biais peut prendre de trois à... cinquante ans.

### Des usages adaptés en fonction des sols

Si différentes méthodes de dépollution sont à l'étude, les scientifiques de Pollusols avertissent : on ne pourra jamais dépolluer tous les sols contaminés, à Nantes comme ailleurs. La phytoremédiation est lente et ne concerne que certains polluants. Le lavage des sols avec des solutions chimiques, ou leur traitement thermique – les sols excavés sont alors « brûlés » à 1 000 °C – coûtent quant à eux cher et rendent la terre stérile... « On a cette pollution et on va devoir vivre avec », avertit Thierry Lebeau, qui préconise d'adopter une logique d'usage. « Il s'agit de trouver des usages compatibles avec la qualité de chaque sol », explique le chercheur. Sur les sols les plus pollués, on pourra par exemple construire un parking, ou une activité tertiaire qui ne crée aucun contact avec la terre.

La prise de conscience de l'importance des sols est en réalité relativement récente – elle date de la fin des années 1990. Il n'existe d'ailleurs à ce jour aucune directive européenne sur la qualité des sols, comme il peut en exister sur la qualité de l'eau ou de l'air. « Un projet de directive mis en chantier en 2006 n'a jamais abouti, du fait de l'opposition des lobbies. Il a été totalement retiré en 2014. Depuis, plus rien », regrette le chercheur. ■

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

# LES IDÉES



*On explore une piste pour dessaler  
l'eau de mer, on repense  
les troubles olfactifs à l'aune  
du Covid-19 et on réfléchit à la 5G.*

ILLUSTRATION : ALICE METEIGNIER POUR CNRS LE JOURNAL



VIVANT SOCIÉTÉS

# Avec le Covid-19, on met enfin le nez sur la perte de l'odorat

Par Moustafa Bensafi, Catherine Rouby et Camille Ferdenzi-Lemaître, chercheurs en neurosciences et psychologie de l'olfaction au Centre de recherche en neurosciences de Lyon <sup>1</sup>.

**La pandémie de Covid-19 nous a mis le nez dessus : oui, on peut être malade de l'odorat, le perdre brutalement, le récupérer très vite... ou non.** Et cela a des effets considérables sur la vie quotidienne. Les seuls, peut-être, à se réjouir discrètement de cette publicité inattendue furent les « anosmiques » d'antan, ceux d'avant le coronavirus. Ceux-là qui ne trouvaient souvent aucune oreille bienveillante pour entendre leurs maux et que les médecins ont si souvent déçus : « *On ne peut rien y faire* » (c'est faux), « *Ça va peut-être s'arranger tout seul* » (cela arrive, mais pas toujours) ou « *Ce n'est pas important chez l'humain* » (totalemment faux !). Et ils sont nombreux.

## Des troubles déjà très répandus

En effet, les perturbations de l'odorat, ou dysosmies, sont très répandues : on estime qu'entre 1 et 5 % de la population des pays occidentaux souffre d'anosmie – perte totale d'odorat – et que 20 à 25 % subissent des pertes partielles de ce sens, ou hyposmies. Nous avons mené il y a six ans une étude pour tester les capacités olfactives de 3 685 participants de tous âges, localisés dans toute la France, qui nous avait permis de chiffrer l'incidence de la dysosmie à 17 % en moyenne. Et de montrer que ce chiffre varie avec l'âge pour atteindre presque 30 % chez les plus de 60 ans. Cette prévalence a très certainement augmenté depuis la survenue du virus SARS-CoV-2, pour lequel la perte du goût et de l'odorat a rapidement été identifiée comme un des symptômes les plus spécifiques.

En France, plusieurs études ont estimé que 46 à 86 % des patients Covid étaient atteints de troubles



© LUGAND/STOCKADOBÉ.COM

olfactifs. Or ces troubles, lorsqu'ils sont dus à des infections, sont connus pour avoir une durée très variable, transitoire pour certaines personnes mais plus longue, voire permanente pour d'autres.

Une étude de notre laboratoire a confirmé cette variabilité pour les patients Covid-19. Sur la seule période du 8 avril au 8 mai 2020, la moitié des patients témoignant de leur perte olfactive n'avaient pas récupéré leurs facultés, dont certains depuis déjà deux mois.

## Des conséquences en cascade

Cette augmentation des cas, relayée par les médias, a permis de révéler au plus grand nombre les conséquences

► En France, en 2014-2015, l'incidence des perturbations de l'odorat était estimée à 17 % en moyenne, pouvant atteindre presque 30 % chez les plus de 60 ans.

des dysosmies sur la santé et la qualité de vie. Quelle que soit son origine, la perte olfactive conduit les patients à modifier leurs comportements, surtout ceux en lien avec les aliments. La richesse perceptive des aliments est tellement réduite que le plaisir de manger diminue, ce qui peut engendrer des problèmes importants dans le domaine nutritionnel. Nous avons constaté que les hyposmiques consomment plus de condiments salés et gras afin de rendre les ali-



À lire :

*Cerveau et odorat. Comment (ré)duquer son nez, de Moustafa Bensafi et Catherine Rouby, EDP Sciences, septembre 2020, 136 p., 22 €.*

<sup>1</sup>. Unité CNRS/Inserm/Univ. Lyon 1 Claude Bernard/Univ. Jean-Monnet Saint-Étienne.

ments plus goûteux. À cela s'ajoute le manque de motivation pour cuisiner, qui peut devenir un problème pour les patients et retentir sur leurs rapports avec leurs proches.

Par ailleurs, le déficit olfactif engendre une insécurité, qui peut être liée par exemple à la perte de contrôle sur sa propre odeur corporelle (est-ce que je sens la transpiration ? ai-je mauvaise haleine ? ai-je mis trop de parfum ?). D'où parfois de réelles difficultés dans la vie sociale, se traduisant par une tendance à l'isolement. Il n'est donc pas surprenant de constater que près d'un tiers des personnes dysosmiques présentent des symptômes dépressifs. De plus, dans le contexte du Covid-19, nous avons montré que plus le déficit olfactif se prolonge, plus la qualité de vie en souffre. Une fois la menace vitale écartée, sa prise en charge reste donc importante pour la santé mentale des patients concernés. Reste la question cruciale : peut-on traiter ces troubles olfactifs ?

### Une rééducation efficace...

Une bonne nouvelle, tout d'abord : dans la majorité des cas, on peut retrouver l'odorat. Ce que l'on savait déjà avant le Covid-19, c'est que 30 % des patients devenus dysosmiques à la suite d'une attaque virale récupéraient sans traitement. Mais de plus en plus d'études montrent qu'un entraînement olfactif quotidien de trois à six mois peut doubler les chances de récupération des capacités olfactives. Comme les autres systèmes sensoriels, l'odorat gagne à être stimulé. Des études sont en cours pour valider les effets de l'entraînement et plusieurs sites proposent

déjà des méthodes pour se rééduquer à la maison avec des odorants disponibles dans notre environnement domestique.

### ...mais ignorée des médecins

Un gros bémol, à présent : il y a un vrai défaut dans la prise en charge, dénoncé depuis plusieurs années par quelques médecins et scientifiques. Les patients se disent globalement très peu ou mal informés, que ce soit sur le diagnostic ou sur le pronostic de leur perte olfactive. On constate chez les médecins généralistes une large méconnaissance des troubles olfactifs, de leurs possibles étiologies et de leur prise en charge. Parmi les patients Covid-19 enquêtés au printemps 2020, qui ont consulté pour leur perte d'odorat, seule la moitié a reçu un diagnostic formel de dysosmie et moins de 5 % ont été orientés vers un spécialiste ORL. Dans plus de deux tiers des consultations, les troubles olfactifs ont été utilisés par le praticien de santé uniquement pour poser le diagnostic du Covid-19 sans le considérer comme un symptôme à traiter, malgré l'inquiétude de nombreux patients face à la perte d'un de leurs sens. La réponse prédominante à la question « comment récupérer l'odorat ? » était d'attendre une guérison spontanée.

L'ampleur même de la pandémie permet d'espérer des avancées thérapeutiques en regard du nombre croissant de personnes dysosmiques. Les efforts devraient porter sur l'information des praticiens de santé et sur le développement de kits odorants validés pour la rééducation, assortis d'enregistrement des performances au cours de l'entraînement. Enfin, l'accompagnement des patients au cours de cet entraînement devrait être pensé pour les aider à maintenir leur motivation sur le long terme. Ce sont là, pour tous les spécialistes de l'olfaction et leurs patients, les défis de l'après-Covid-19. **II**

**Liberation**

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 **Liberation**.



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

À lire

## Bande dessinée

Cet ouvrage, qui vient de recevoir le Grand Prix du livre d'archéologie 2020, rend hommage aux chercheuses qui ont joué un grand rôle dans l'exploration de l'Amazonie. En retraçant le parcours de dix-huit femmes scientifiques d'exception, l'auteur met également en avant les connaissances et le savoir parfois méconnu des tribus de la forêt, de l'art rupestre à l'architecture.

À la recherche de l'Amazonie oubliée, Laure Garancher, Éditions Delcourt, fév. 2021, 144 p., 18,95 €.



## Spatial

Si l'espèce humaine en rêve, les voyages dans l'espace sont encore loin de ressembler à de tranquilles croisières. Parmi les obstacles à surmonter : la réduction ou l'absence de gravité pendant de longues périodes, les rayonnements cosmiques, la vie en confinement, l'inactivité physique ou encore la délicate gestion de l'eau et de l'alimentation. Réalisé avec le soutien du Cnes et grâce à l'expertise de nombreux scientifiques, cet ouvrage constitue une synthèse assez captivante des connaissances actuelles relatives à l'adaptation et aux défis de l'exploration spatiale.

L'humain et l'espace. Ses adaptations physiologiques, Marc-Antoine Custaud, Stéphane Blanc, Guillemette Gauquelin-Koch et Claude Gharib (dir.), Books on Demand, déc. 2020, 344 p., 64 € (livre), 4,99 € (ebook).

À voir

## Neurosciences

C'est un programme riche qui attend les curieux des neurones lors de la 23<sup>e</sup> édition de la Semaine du cerveau, avec notamment une pièce de théâtre en ligne sur la mémoire, des conférences et débats accessibles de chez soi sur la neuroéducation, le microbiote ou les nouvelles technologies, ou encore des rendez-vous « Speed searching » en virtuel pour rencontrer des chercheurs. Sans oublier une conférence dévoilant les premiers résultats d'une étude sur les effets de la pandémie sur notre cerveau.



Semaine du cerveau, du 15 au 21 mars 2021, [www.semaineducerveau.fr](http://www.semaineducerveau.fr)

# À quoi sert la 5G ?



NUMÉRIQUE

ENTRETIEN Philippe Owezarski, directeur de recherche au CNRS,

nous explique les enjeux du déploiement de ce nouveau standard de télécommunication, qui suscite encore interrogations et résistances.

PROPOS RECUEILLIS PAR MARTIN KOPPE

**Vous êtes directeur du département Réseaux, informatique et systèmes de confiance du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS. Pouvez-vous nous expliquer ce qui motive le passage à la 5G ?**

**Philippe Owezarski** <sup>1</sup>. Les besoins croissants en bande passante disponible sur les réseaux cellulaires, et donc en débit, sont la première raison du changement de génération entre la 4G et la 5G. Les utilisateurs, de plus en plus accros au streaming sur appareils mobiles, veulent pouvoir regarder des vidéos en 4K (environ 4 000 pixels de large, soit 8 millions de points – ou pixels – par image, Ndlr) sur leur smartphone, même si l'intérêt est discutable vu la taille de l'écran. Cette demande pressante et la saturation de la 4G alimentent cependant le développement de services nouveaux, notamment à destination des professionnels.



**Quels sont les principaux changements ?**

**Ph. O.** Tout d'abord, trois classes de service seront bientôt proposées, avec des caractéristiques spécifiquement adaptées aux différents besoins des utilisateurs et de leurs applications. D'abord l'eMBB <sup>1</sup> : un service standard par rapport aux réseaux cellulaires actuels, mais avec une augmentation significative du débit. Puis l'uRLLC <sup>2</sup>, qui vise les applications ayant des contraintes temporelles ; les communications se feront avec un temps de latence extrêmement réduit, et donc une réactivité supérieure. Enfin, avec mMTC <sup>3</sup>, la 5G permettra d'uniformiser les communications pour l'Internet des objets, où de nombreux protocoles cohabitent actuellement. Ces trois classes de service arrivent avec un mécanisme de *slicing*, qui permet de découper en tranches la matrice de ressources de communication temps/fréquence. Chaque tranche fournira à ses utilisateurs la qualité de service souhaitée et, de plus, elles sont isolées les unes des autres pour éviter toute forme de perturbation entre elles.

Parallèlement, la 5G permet la *softwarization*, qui consiste à rendre les réseaux programmables sans avoir à intervenir sur leur infrastructure physique. Par exemple, si la demande

des utilisateurs change, il sera plus aisé d'adapter le débit ou de proposer des services spécifiques, sans avoir à modifier physiquement les équipements matériels du réseau, comme ceux qui pilotent les antennes.

En outre, les nouvelles antennes Mimo <sup>4</sup> pour la 5G peuvent adapter leur spectre de diffusion vers une zone ou un terminal précis, sans impacter les alentours. Tout cela est rendu possible grâce à des équipements parfaitement programmables de façon dynamique. Des intelligences artificielles (IA) pourront même être mises à contribution pour aider à optimiser les communications.

**Quels sont les services spécifiques qui intéressent les professionnels et les chercheurs ?**

**Ph. O.** Certains manipulent des données vidéo à très haute définition et nécessitant d'être transmises à très haut débit, comme le Centre national d'études spatiales (Cnes) qui utilise des réseaux mobiles satellites et cellulaires pour transmettre des images de téléobservation. Les services à faible latence sur réseaux cellulaires pourront aussi permettre de contrôler à distance des usines et différents procédés industriels, avec des temps de réaction très courts. Et ils intéressent

1. Enhanced mobile broadband, pour bande passante mobile améliorée. 2. Ultra reliable low latency communications, pour communications ultra fiables à basse latence. 3. Massive machine type communications, pour communications massives de type machine. 4. Multiple-input multiple-output, pour entrées multiples sorties multiples.



©CHRISTOPH DERNBACH/PICTURE ALLIANCE VIA GETTY IMAGES

► Installation d'antennes pour la 5G sur un mât radio à Berlin (Allemagne) à cinquante mètres de hauteur (26 mai 2020).

également la téléchirurgie, car il faut donner au chirurgien qui opère à distance le même rendu visuel sur ces gestes que s'il était physiquement dans le bloc où se trouve le patient.

Je pense que l'une des principales applications concernera les véhicules autonomes ou connectés. La centralisation des IA sur des serveurs, ou un *cloud*, va faciliter l'intégration des conditions globales de circulation, comme l'état du trafic et la signalisation, et proposer des calculs plus performants, car effectués sur des machines plus puissantes que l'électronique installée à bord d'un véhicule. Il faut que ces instructions soient transmises avec un débit et une réactivité que seule la 5G permet pour l'instant d'atteindre.

### Concrètement, où en sommes-nous du déploiement de la 5G ?

**Ph. O.** Nous passons techniquement à la 5G, mais, en termes de service, nous avons pour l'instant surtout accès à une sorte de 4G à haut débit. Les réseaux 5G déployés aujourd'hui utilisent bien des bandes de fréquences dédiées à la 5G, mais les mécanismes d'allocation des ressources hertziennes ne sont pas encore assez optimisés pour exploiter efficacement tout le spectre disponible. Normalement, le processus de standardisation de la 5G doit aboutir en 2023.

### Que savons-nous des risques pour la santé et l'environnement ?

**Ph. O.** Sur le plan énergétique, le déploiement du réseau va bien entendu consommer de l'électricité, mais je pense que ce sera à un niveau à peu près semblable à celui de la 4G. La disparition de la 2G et de ses antennes devrait d'ailleurs permettre quelques économies. La 5G va par contre contribuer à réduire la quantité d'émissions d'ondes électromagnétiques. Ses antennes massives vont en effet cibler les endroits où la demande est forte, plutôt que d'irradier indifféremment de larges zones. Mais comme l'augmentation du débit va nécessiter plus de puissance, il est encore difficile d'en faire le bilan exact.

Quant à la santé, nous avons eu les mêmes débats lors du lancement des générations précédentes. Les réseaux cellulaires fonctionnent depuis une trentaine d'années. Pourtant, nous n'avons pas vu de recrudescence de cancers du cerveau, l'une des maladies qui auraient pu être provoquées par les réseaux cellulaires. La prévalence de maladies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer a cependant augmenté, mais ce phénomène est plutôt imputé à l'allongement de l'espérance de vie. Je précise néanmoins que je ne suis pas spécialiste de ces questions et que je ne relate que les résultats d'études que j'ai pu lire. Il y a cependant une forme de moratoire de fait autour de la 5G en France, le gouvernement va pousser des études pour mieux mesurer les impacts sur la santé et la consommation énergétique. ■



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

À lire



## Toulouse

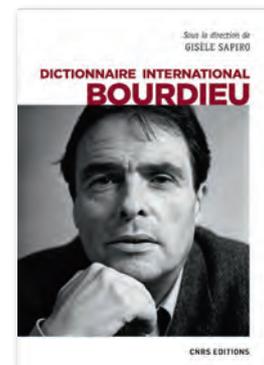
Fruit d'un monumental travail collectif, trois ouvrages retracent l'histoire de l'université de Toulouse qui trouve ses racines au XIII<sup>e</sup> siècle. Des facultés du Moyen Âge aux universités et grandes écoles d'aujourd'hui en passant par ses liens étroits avec le CNRS, ce sont ainsi près de huit siècles d'une aventure intellectuelle et scientifique hors normes qui y est retracée grâce aux contributions d'une vingtaine de scientifiques.

*Histoire de l'Université de Toulouse, Caroline Barrera et Patrick Ferté (dir.), 3 volumes coédités par les Éditions Midi-Pyrénéennes et l'université fédérale Toulouse Midi-Pyrénées, 2020.*

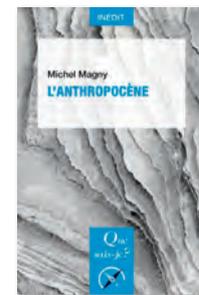
## Sociologie

Sociologues, politistes, historiens, anthropologues... En tout, ce sont 126 auteurs de 20 pays qui ont participé à cet ouvrage référence sur Pierre Bourdieu. De ses sujets de recherche à ses méthodes, en passant par les échanges qu'il a eus avec ses contemporains, ses passions et ses engagements politiques, près de 600 notices permettent d'éclairer la vie et l'œuvre de celui qui est aujourd'hui, près de vingt ans après sa mort, le sociologue le plus cité au monde.

*Dictionnaire international Bourdieu, Gisèle Sapiro (dir.), CNRS Éditions, novembre 2020, 1 000 p., 39 €.*



## Anthropocène



Par la pression qu'elle exerce sur la planète, l'humanité a ouvert une nouvelle époque géologique, comme l'explique Michel Magny dans cet ouvrage clair et pédagogique. Celui-ci rappelle l'histoire de ce concept, sans occulter les polémiques qui ont accompagné son adoption, et analyse les différentes facettes de la crise globale actuelle, allant du réchauffement climatique à l'érosion de la biodiversité, en passant par la pollution des écosystèmes.

*L'Anthropocène, Michel Magny, PUF, coll. « Que sais-je ? », janvier 2021, 128 p., 9 €.*



MATIÈRE

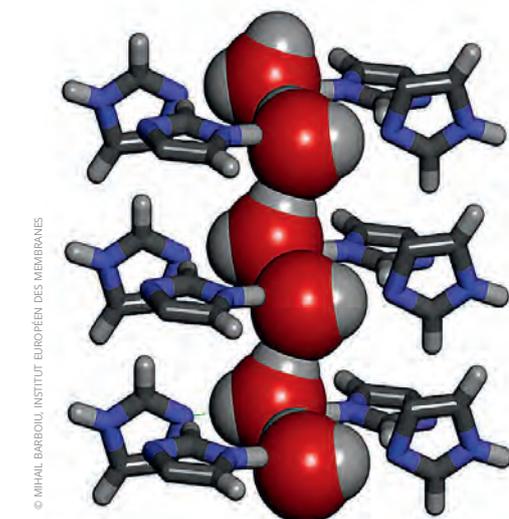
# Dessaler l'eau de mer grâce aux membranes bio-inspirées

Par Mihail Barboiu, directeur de recherche au CNRS et membre de l'Institut européen des membranes<sup>1</sup> de Montpellier.

**Plus de 2,2 milliards de personnes – soit un être humain sur trois – manquent d'eau potable.**

Compte tenu de l'évolution rapide de la croissance de la population mondiale et de ses activités économiques sur fond de changement climatique, de nombreux pays auront besoin de solutions urgentes. Dessaler l'eau de mer est une idée séduisante. Pour ce faire, des membranes filtrantes, laissant passer les molécules d'eau mais stoppant les ions qui composent le sel, ont été mises au point depuis une cinquantaine d'années. Mais leurs performances n'ont jusqu'à présent permis d'obtenir que des solutions très coûteuses en énergie, contribuant elles-mêmes au changement climatique. La membrane hybride que nous avons mise au point<sup>2</sup> pourrait changer la donne. Combinaison d'une matrice en polyamide, déjà utilisée par les industriels de la désalinisation, et de canaux artificiels d'eau, elle permet de dessaler trois fois plus d'eau et de consommer 12 % d'énergie en moins pour chaque mètre cube d'eau traité que les méthodes actuelles.

Environ 100 millions de mètres cubes d'eau par jour sont actuellement dessalés dans le monde. Plusieurs technologies de pointe sont utilisées. Elles sont majoritairement fondées sur un procédé inspiré de la nature : l'osmose. Celle-ci correspond par exemple au passage spontané d'eau à travers les pores d'une membrane qui sépare deux solutions de concentrations différentes en sel : l'eau passe de la moins concentrée à la plus concentrée, ce qui dilue cette dernière et



© MIHAIL BARBOIU, INSTITUT EUROPÉEN DES MEMBRANES

aboutit à réduire la différence de concentration entre les deux solutions. Mais pour dessaler l'eau de mer, il faut au contraire « pousser » l'eau dans le sens inverse à ce mouvement spontané, afin d'obtenir des concentrations en sel très différentes de part et d'autre de la membrane, voire une concentration nulle ou presque d'un côté. Il faut pour cela appliquer de fortes pressions sur l'eau. On parle d'osmose inverse sous pression.

La synthèse de telles membranes, dites biomimétiques car elles reproduisent des processus biologiques, bénéficie des progrès constants de la chimie. Plus d'un demi-siècle s'est écoulé depuis la conception de la première membrane utilisée pour le dessalement par osmose inverse. Réalisée sous la forme d'une couche mince de polyamide, elle présente une perméabilité d'eau allant de 1 à 1,5 litre par mètre cube par heure par bar, et un taux de rejet de sel de 99 %. Plus récemment, la fabrication de

membranes constituées de films minces en polyamide englobant des nanoparticules a amélioré la perméabilité avec cependant un plus faible taux de rejet du sel.

## Des protéines pour membranes bio-assistées

D'autres membranes, mises au point dans les années 2010, ont misé sur une imitation encore plus poussée de la nature. Elles incorporent des protéines, les aquaporines, formant des canaux perméables à l'eau et rejetant les ions. La découverte de ces aquaporines, qui assurent cette tâche au sein de la membrane des cellules biologiques, a valu le prix Nobel de chimie au biologiste américain Peter Agre en 2003. Grâce à elles, la perméabilité des membranes s'est améliorée d'environ de 30 %, mais avec une sélectivité aux ions réduite (le taux de rejet du sel n'est que de 97 %). Et surtout, les applications à grande échelle de membranes hybrides polyamide-aquaporines souffrent toujours de nombreux inconvénients : coût élevé de production des aquaporines par biosynthèse, faible stabilité, contraintes de fabrication, instabilité aux hautes pressions...

## Canaux artificiels et fils d'eau moléculaire

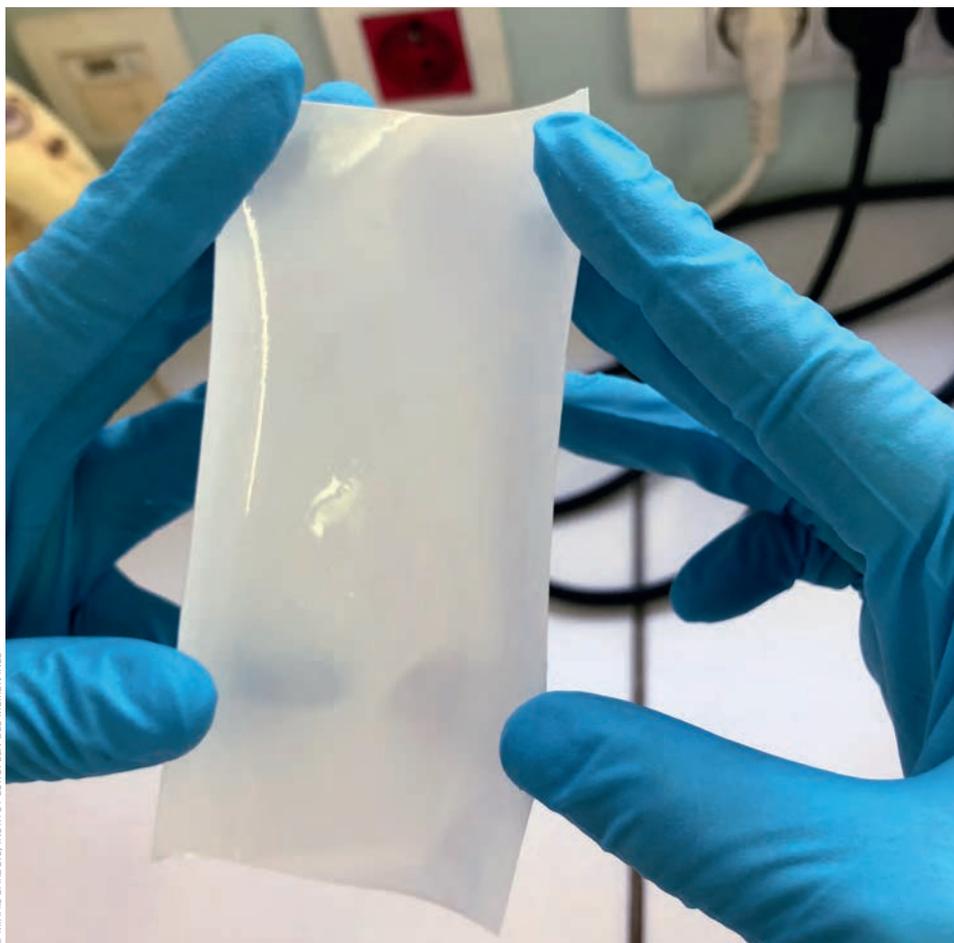
Pour améliorer les membranes pour le dessalement, les aquaporines peuvent être remplacées par des canaux synthétiques, les canaux artificiels d'eau (ou AWC pour *artificial water channel*), pour lesquels l'intérêt s'est considérablement accru ces dix

► Molécules d'eau alignées en file indienne dans un canal artificiel d'eau.

### POLYAMIDE

Matière synthétique dont la structure chimique se caractérise par la répétition d'un ou de plusieurs atomes ou de groupes d'atomes. Le nylon est un polyamide.

1. Unité CNRS/Univ. Montpellier/ENSC Montpellier. 2. Coordonnée par l'Institut européen des membranes de Montpellier, l'équipe du CNRS a coopéré avec des chercheurs de l'École polytechnique de Turin, de l'Université des sciences et technologies du roi Abdallah (Arabie saoudite) et du Lehn Institute of Functional Materials, School of Chemistry (Chine).



© MIHAIL BARBOIU, INSTITUT EUROPEEN DES MEMBRANES

dernières années. Nous avons par exemple travaillé sur des canaux dits « l-quartet » qui peuvent s'insérer dans une bicouche lipidique, semblable à la membrane de nos cellules biologiques. Nous avons alors découvert que pour traverser ces canaux, les molécules d'eau s'alignent sélectivement en file indienne (on parle de fils d'eau moléculaire).

Mieux encore : celles-ci sont orientées d'une façon bien précise qui s'explique par la polarité de la molécule d'eau conjuguée à l'asymétrie des canaux eux-mêmes. Comparé à un agencement aléatoire, cet arrangement dit **chiral** engendre une plus grande mobilité des molécules dans les canaux, favorisant ainsi les transports de matière, avec un apport énergétique extérieur réduit.

Ces canaux d'eau artificiels ont donc vite représenté une alternative prometteuse mais fabriquer à l'échelle du mètre de telles membranes biomimétiques s'est avéré complexe. Pour

► La membrane hybride bio-mimétique mise au point par les chercheurs.

#### **POLARITÉ DE LA MOLÉCULE D'EAU**

Une molécule d'eau ( $H_2O$ ) se comporte comme un petit aimant avec deux pôles positifs et un négatif. Cette polarité conduit les molécules d'eau à s'attirer les unes les autres.

#### **CHIRAL**

Un objet est chiral s'il n'est pas superposable à son image dans un miroir.

réussir ce passage à l'échelle, nous avons donc plutôt misé sur la combinaison des AWC avec l'éprouvé polyamide des premiers temps. Tout l'enjeu étant d'intégrer les AWC en douceur sans créer de défauts dans la membrane. Nous y sommes parvenus en améliorant le processus conventionnel de polymérisation utilisé pour produire les membranes polyamide. Et nous avons obtenu une structure hybride AWC-polyamide en forme de « super-éponge ». Ces travaux ont fait l'objet d'une demande de brevet en

2019 et de telles membranes hybrides sont en cours de développement avec plusieurs partenaires industriels.

#### **Des membranes hautement sélectives**

Leurs performances en perméabilité (3 litres par mètre cube par heure par bar) et rejet de sel (supérieure à 99,5 %) permettent de réduire de 12 % la facture d'énergie pour trois fois plus d'eau produite qu'avec les méthodes actuelles dont les rendements stagnent depuis cinquante ans. Elles constituent donc un changement d'échelle, tout en offrant une amélioration de la stabilité à long terme de ces matériaux et la réduction des dimensions des installations de dessalement. On pourrait aussi envisager l'utilisation de ces membranes pour la production d'une façon plus simple d'eau ultra-pure nécessaire à la fabrication des vaccins ou des composants de la microélectronique, tout en évitant d'utiliser des procédés coûteux d'échange ionique très sensibles à la dureté de l'eau dans certaines régions du monde.

Comprendre l'écoulement sélectif de l'eau dans des canaux artificiels est un domaine tendant un pont entre des recherches fondamentales et des applications industrielles. Étonnamment, des canaux artificiels d'eau de dimension nanométriques (un nanomètre vaut un millionième de millimètre, soit  $10^{-9}$  mètre !) permettent de fabriquer des mètres carrés de membranes pour produire des millions de mètres cubes d'eau dessalée par jour... C'est la beauté de la chimie qui a le pouvoir de construire ses objets à des échelles différentes et pour des applications si diverses. ■

Pour en savoir +

*Étonnante chimie. Découvertes et promesses du XXI<sup>e</sup> siècle, sous la direction de Claire-Marie Pradier, coordonné par Francis Teyssandier et Olivier Parisel, CNRS Éditions, 22 €, à paraître le 1<sup>er</sup> avril 2021.*

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



*Guillaume Morel*, directeur de l'Institut des systèmes intelligents et de robotique (Isir) <sup>1</sup>

# “Je me souviens...”

PROPOS RECUEILLIS PAR ANNE-SOPHIE BOUTAUD

*...de cette expérience menée en 2009 autour d'une technologie alors en pleine évolution: l'eye-tracking ou oculométrie. Concrètement, il s'agit de mesurer, d'enregistrer et d'analyser les mouvements oculaires d'un sujet sur un stimulus visuel par exemple. Si aujourd'hui ces dispositifs se sont largement répandus, cet appareil était alors assez novateur. Notre objectif était de démontrer que l'on pouvait piloter un robot par le seul regard. Ici, le robot est couplé à un casque dit eye-tracker dont est équipée Jamie Paik<sup>2</sup>. Il tient une caméra dont le flux vidéo est envoyé à Jamie via un écran; sur cet écran, elle fixe un élément de la scène qui l'intéresse; l'appareil*

*mesure l'endroit où elle regarde; puis le robot va déplacer la caméra afin que cet endroit se retrouve au centre de l'image. Cette boucle se répète toutes les 50 ms. Mis un temps en sommeil, ces travaux ont repris récemment grâce aux avancées technologiques permettant un recalage avec l'environnement immédiat. À l'Isir, le surgical cockpit<sup>3</sup>, un robot chirurgical qui repose sur le principe de co-manipulation avec le chirurgien<sup>4</sup>, cherche aujourd'hui à reprendre ces résultats pour intégrer le regard avec d'autres modalités d'interaction. Le but: robustifier la commande du robot.*

© BENOÎT RAJAU / ISIR / CNRS PHOTOTHÈQUE

**1.** Unité CNRS/Sorbonne Université. **2.** Aujourd'hui professeure et directrice du laboratoire de robotique reconfigurable de l'école polytechnique fédérale de Lausanne. **3.** Ce projet, mené au sein de l'équipe Agathe, est piloté par la chercheuse Marie-Aude Vitrani. Les chercheurs et chercheuses de l'Isir ont conçu le robot, les commandes et l'interface. **4.** Lire « Les robots s'installent au bloc » sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)





de Denis Guthleben,  
historien au CNRS

# Un institut, deux infinis

Le 14 avril 1971. Le Premier ministre Jacques Chaban-Delmas signe un décret « portant création d'un Institut national de physique nucléaire et de physique des particules ». Sa mission est ambitieuse : « développer et coordonner les recherches » dans ces domaines. Mais les projets qui les animent ne le sont pas moins, et le besoin est grand de doter la France d'une structure robuste et réactive pour maintenir le pays à la pointe de la recherche. Alors que l'IN2P3 célèbre ses 50 ans, bref retour sur une fondation originale...

## La physique sur « un coin de table »

À l'aube des années 1970, le nouvel institut ne s'implante pas sur une terre en friches. Il est en effet le dépositaire d'une longue tradition, qui a commencé à s'écrire au soir du XIX<sup>e</sup> siècle, autour des travaux sur la radioactivité et sur l'atome, et qui a connu des avancées déterminantes à partir des années 1930, avec d'une part les découvertes successives du neutron, de la radioactivité artificielle et de la fission, et d'autre part l'étude des rayons cosmiques. En France, l'arbre généalogique de l'IN2P3 compte ainsi des noms aussi illustres que Becquerel, Curie, Joliot, mais aussi Auger, de Broglie, Leprince-Ringuet...

*“L'IN<sub>2</sub>P<sub>3</sub> a été un acteur clé de la convergence fertile de l'infiniment petit et de l'infiniment grand”*

Le point commun de ces pionniers – et de ces pionnières, notamment Marie et Irène Curie ? Leurs expériences ne requéraient qu'un « coin de table », comme Frédéric Joliot l'a souvent rappelé ensuite avec nostalgie. Certes, l'image est idéalisée : on sait que certaines manip ont par exemple mobilisé l'électroaimant d'Aimé Cotton à Meudon-Bellevue, dont les 120 tonnes auraient nécessité un grand, très grand coin de table ! Il n'empêche qu'un saut d'échelle

survient bel et bien à partir des années 1940 et 1950, symbolisé en Europe par la création du Cern<sup>1</sup> : les projets, d'envergure nationale et de plus en plus internationale, mobilisent des dizaines, bientôt des centaines de scientifiques, et requièrent des instruments colossaux. L'IN2P3 est l'outil conçu pour accompagner cette évolution.

## Vers « les deux infinis »

Pour autant, sa genèse n'a pas été un long fleuve tranquille. Pour preuve, une décennie sépare l'idée originelle, portée à l'aube des années 1960 par le directeur de l'accélérateur linéaire d'Orsay, André Blanc-Lapierre, de sa réalisation en 1971, sous la direction de Jean Teillac, le patron de l'Institut de physique nucléaire voisin. Les débats ont été intenses, et parfois houleux, au fil de ces dix années. Envisagé dès le départ comme un « institut national du Centre national de la recherche scientifique » mais doté d'une forte autonomie, l'IN2P3 a suscité des craintes au CNRS : n'allait-on pas créer – oh le mauvais procès que voilà ! – une baronnie au sein même de notre organisme ?

Mais l'obstacle le plus coriace est venu de l'extérieur du CNRS : le CEA n'a pas montré un enthousiasme débordant, c'est peu de le dire, face à l'émergence d'un nouvel acteur sur le terrain de la recherche nucléaire. Pour parvenir à inaugurer l'IN2P3 en 1971, il a donc fallu s'y reprendre à plusieurs fois, en associant à chaque étape un haut-commissaire à l'énergie atomique coriace même s'il était plutôt bien disposé à l'égard du CNRS : Francis Perrin n'était autre que le fils de Jean Perrin, et on se délecte devant les archives qui le dévoilent en train de disputer avec l'institution fondée par son propre père ! Fort heureusement, passées ces premières réticences, les relations de l'IN2P3 et du CEA n'ont plus été ensuite, comme chacun sait, qu'une longue et belle histoire d'amour...

Nécessité a donc fait loi, ou décret : celui du 14 avril 1971 marque le début d'une formidable aventure scientifique et humaine, dont nos collègues de l'IN2P3 fêtent en 2021 les innombrables réalisations. Sans chercher à leur couper l'herbe sous le pied, l'une d'elles, en particulier, vaut d'être mentionnée : notre institut national a été un acteur clé de l'association des deux physiques, nucléaire et des particules, et de la convergence fertile de l'infiniment petit et de l'infiniment grand. Et, quand on y réfléchit bien, rapprocher deux infinis, c'est déjà une sacrée réussite ! ||

1. Voir « Le Cern, quelle histoire ! », CNRS Le journal, n° 278, automne 2014.

# CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS #9



**#9**

actuellement en vente  
en librairie et Relay

200 pages / **12,50 €**

**cnrs**

**CNRS EDITIONS**

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



SOUTENEZ LA RECHERCHE

# FAITES UN DON À LA FONDATION CNRS



© Frédérique Plas/CNRS Photothèque

**Le CNRS développe une recherche libre, dans tous les domaines, au meilleur niveau international et sur le long terme. Pour contribuer à faire avancer les connaissances, répondre aux grands défis de notre société et innover : soutenez la recherche, faites un don à la fondation CNRS.**

**fondation-cnrs.org** 