



Peut-on
se passer des
**modèles
animaux ?**

**Les derniers
mystères
du SOMMEIL**

**Les instituts
Carnot,**
carrefours
de l'innovation

Sur la piste de
**l'avion
du futur**

« À DÉCOUVERT »

Une collection de référence et une approche pluridisciplinaire
pour décrypter les grands enjeux contemporains.



Parution le 28/09/2017

39 €



39 €

CNRS EDITIONS

Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

cnrs formation entreprises

Organisme de formation continue

→ 230 formations technologiques courtes proposées
par le CNRS dans ses laboratoires de recherche

pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens
des secteurs public et privé

→ Domaines de formation

Big data, sciences de l'ingénieur, matériaux, biologie,
microscopie, spectrométrie, urbanisme... et plus encore

+ de 1300 stagiaires formés chaque année



Découvrez nos stages sur
cnrsformation.cnrs.fr



contact : cfe.contact@cnrs.fr ou +33 (0)1 69 82 44 55

[@CNRS_CFE](https://twitter.com/CNRS_CFE)

CNRS

LE JOURNAL

Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

Téléphone : 01 44 96 53 88

E-mail : lejourn@cnrs.fr

Le site Internet : <https://lejourn.cnr.fr>

Anciens numéros :

<https://lejourn.cnr.fr/numeros-papiers>

Gérer son abonnement au journal (pour les agents du CNRS) :

<https://lejourn.cnr.fr/abojournal>

Directeur de la publication :

Alain Fuchs

Directrice de la rédaction :

Brigitte Perucca

Directeur adjoint de la rédaction :

Fabrice Impériali

Rédacteur en chef :

Mathieu Ravaut

Chef de rubrique :

Charline Zeitoun

Rédacteurs :

Laure Cailloce, Claire Debôves,
Yaroslav Pigenet

Assistante de la rédaction et fabrication :

Laurence Winter

Ont participé à ce numéro :

Julien Bourdet, Audrey Diguët,
Grégory Fléchet, Laurianne Geffroy,
Mathieu Grousson, Denis Guthleben,
Martin Koppe, Fui Lee Luk, Saman
Musacchio, Émilie Silvoz, Vahé Ter
Minassian, Philippe Testard-Vaillant,
Jean-Baptiste Veyrieras

Secrétaires de rédaction :

Isabelle Grandrieux, Sandrine Hagège

Conception graphique :

Céline Hein

Iconographes :

Anne-Emmanuelle Héry,
Marie Mabrouk

Impression :

Groupe Morault, Imprimerie de Compiègne

2, avenue Berthelot – Zac de Mercières

BP 60524 – 60205 Compiègne Cedex

ISSN 2261-6446

Dépôt légal : à parution



Photos CNRS disponibles à :

phototheque@cnrs.fr ;

<http://phototheque.cnr.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 : le moteur Leap,
développé par Safran et GE.

PHOTO : CYRIL ABAD/CAPA PICTURES/SAFRAN

Les attentes de notre société, de plus en plus technologique, n'ont jamais été aussi fortes vis-à-vis de l'innovation, notamment grâce à une valorisation plus rapide des résultats de la recherche publique : espérance d'une relance économique par le progrès scientifique et technique, recherche de solutions à tous les maux – sociaux, environnementaux, de santé...

Sans développer une vision utilitariste de la science, la valorisation des résultats de la recherche issue de ses laboratoires est au cœur des missions du CNRS. Pour autant, l'innovation, de rupture en particulier, ne se décrète pas ! Elle ne peut que s'appuyer sur une recherche fondamentale libre, de long terme et du meilleur niveau. Elle doit être accompagnée, encouragée, facilitée. Elle est le fruit de la rencontre entre des femmes et des hommes, des idées, des compétences scientifiques et techniques et des problématiques industrielles ou sociales. Il est donc essentiel de favoriser ces rencontres et de permettre un brassage des idées et des cultures entre milieux académique et socio-économique. C'est notamment l'esprit des laboratoires com-

muns de recherche avec les entreprises, que le CNRS a créés en nombre (plus de 120 structures de recherche communes) et souhaite développer. C'est aussi l'esprit du label Carnot, qui distingue et encourage la recherche partenariale dans le milieu académique (*lire page 48*).

L'innovation est, aujourd'hui, plus proche que jamais de la recherche fondamentale, comme nous le montrent les nouveaux matériaux inspirés du graphène ou les travaux en aéronautique présentés dans ce numéro ; et le passage

de l'une à l'autre se fait aussi plus vite : parce que l'innovation la plus pointue est présente partout dans notre quotidien, mais aussi, sans doute, parce que les jeunes chercheurs sont toujours plus nombreux à se rêver en créateurs de start-up.

Face à ces défis et ces attentes, le CNRS adapte en permanence son dispositif d'accompagnement des chercheurs au milieu d'un univers foisonnant de structures de valorisation.

Michel Mortier,
délégué général à la valorisation du CNRS



© DÉLÉGATION PMA



GRAND FORMAT

13

Sur la piste de l'avion du futur	14
Changements de climat sur le Mont-Blanc	26
Peut-on se passer des modèles animaux ?	32



Un jour avec
Louise-Anne Cariou,
ingénieure sécurité

10

EN PERSONNE 5

Victor Malka, virtuose du laser	6
Claude Lorius distingué aux États-Unis	8
Trois nouveaux directeurs d'institut	9



54

Des villes
toujours plus grosses

EN ACTION 39

Les nouveaux matériaux inspirés du graphène	40
Des vols en ballon pour observer l'Univers	42
Les derniers mystères du sommeil	44
Ce que l'on sait de l'inceste en France	46
Les instituts Carnot, carrefours de l'innovation	48
Le CNRS unit ses forces en Amériques	50
Les grands reptiles marins montrent les dents	52
Les archives Grothendieck, mine d'or pour les chercheurs	53
Quelles réparations pour l'esclavage ?	56



Les nouveaux
chantiers du Comité
d'éthique

58

LES IDÉES 57

Pourquoi les humeurs jouent sur notre santé	60
Une sélection d'ouvrages à lire	61
Quels procédés pour l'usine de demain ?	63

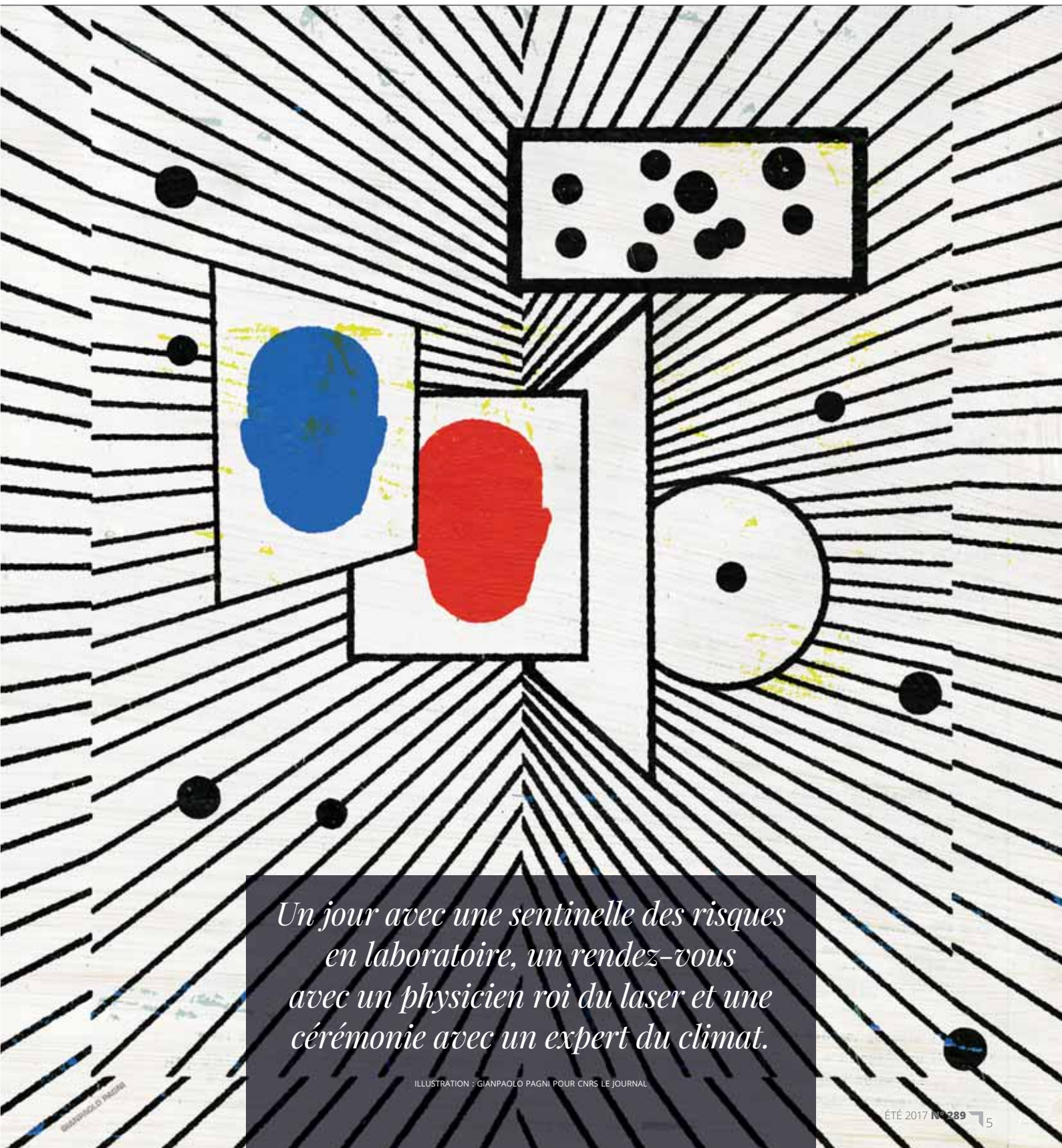
CARNET DE BORD

J. Robert-Lamblin nous raconte un souvenir de recherche 64

LA CHRONIQUE DE DENIS GUTHLEBEN

Jean Rouch l'Africain 66

EN PERSONNE



*Un jour avec une sentinelle des risques
en laboratoire, un rendez-vous
avec un physicien roi du laser et une
cérémonie avec un expert du climat.*

ILLUSTRATION : GIANPAOLO PAGNI POUR CNRS LE JOURNAL

MATIÈRE

Physique. Distingué par trois prix en 2017, Victor Malka apprivoise depuis plus de quinze ans l'accélération de particules à partir de lasers à la fois puissants et compacts. En ligne de mire de ses recherches, des applications en science des matériaux et dans le domaine médical.

Victor Malka, virtuose du laser

PAR GRÉGORY FLÉCHET

Comme en attestent les trois distinctions obtenues cette année à quelques semaines d'intervalle, les travaux de Victor Malka, directeur de recherche au CNRS, ont le vent en poupe. Après le prix Julius Springer de la Société allemande de physique reçu en avril, ce spécialiste de la physique des plasmas¹ au Laboratoire d'optique appliquée² (LOA) de Palaiseau, s'est vu remettre en mai le prix Holweck de la Société française de physique et de l'Institute of Physics, ainsi qu'un prix de la Société européenne de physique : « *Convaincre la communauté des physiciens de la pertinence de l'approche laser pour accélérer des particules à travers un plasma ne fut pas chose facile, mais cette récente succession de récompenses prouve que notre démarche suscite aujourd'hui un véritable engouement* », reconnaît le physicien.

La perspective d'utiliser un laser pour accélérer des électrons ou des protons remonte au début des années 1990. À l'époque, Victor Malka étudie la **fusion thermonucléaire** au Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses³ (Luli). Confronté à l'inertie de cette recherche de très haute volée, nécessitant un dispositif expérimental complexe autour duquel gravitent pléthore de scientifiques, le jeune physicien a du mal à trouver ses marques. « *J'ai fini par prendre conscience que la fusion nucléaire offrait trop peu de prise sur mon propre travail d'investigation, ce qui allait à l'encontre de l'idée d'autonomie que je me faisais du métier de chercheur* », se souvient Victor Malka, dont la carrière prend un tour nouveau vers 1994. Cette année-là, en collaboration avec une équipe de l'Imperial College London et de

ACCÉLÉRATEUR LASER-PLASMA

instrument permettant d'accélérer des particules de façon compacte et efficace grâce à l'interaction entre une impulsion laser de très grande intensité et un gaz produisant un plasma.

FUSION THERMONUCLÉAIRE

phénomène, à l'œuvre dans le soleil, par lequel des noyaux atomiques s'unissent pour former un noyau plus lourd.



l'université de Californie à Los Angeles, il parvient à générer pour la première fois, au Laboratoire Rutherford Appleton, en Grande-Bretagne, des faisceaux d'électrons de grande énergie.

Expériences fondatrices

Dans la foulée de ces résultats inédits, le chercheur français décide de réorienter ses travaux vers la thématique naissante des **accélérateurs laser-plasma**. À l'époque, la plupart des lasers sont encore de véritables mastodontes qui permettent de réaliser, au mieux, un tir toutes les 40 minutes. Victor Malka est toutefois persuadé que l'emploi d'appareils plus compacts et fonctionnant à une cadence plus élevée va permettre d'accroître les performances des accélérateurs laser-plasma. Le tout nouveau laser du LOA, qu'il rejoint au début des années 2000, va lui offrir l'outil idéal pour relever ce défi. Au sein de l'équipe « Sources de particules laser » qu'il met immédiatement sur pied, les résultats marquants ne vont pas tarder à se succéder. En 2002, les scientifiques parviennent tout d'abord à produire des faisceaux d'électrons à haut niveau d'énergie en faisant traverser un plasma par une impulsion laser

1. L'état plasma est l'état que la matière atteint lorsqu'elle est chauffée à des températures très élevées. 2. Unité CNRS/École polytechnique/ENSTA ParisTech. 3. Unité CNRS/École Polytechnique/CEA Paris/UPMC. 4. Organisation européenne pour la recherche nucléaire.



Son parcours en 6 dates

- 1990** Entre au CNRS comme chargé de recherche au laboratoire Luli, après avoir obtenu son doctorat en physique atomique des plasmas de fusion
- 2001** Crée son propre groupe de recherche au Laboratoire d'optique appliquée (LOA)
- 2002** Publie dans *Science* un premier article remarqué sur l'accélération laser-plasma
- 2003-2015** Professeur à l'École polytechnique
- 2004** Directeur de recherche au LOA
- Depuis 2015** Professeur à l'Institut Weizmann des sciences (Israël)

suffisamment remarquables pour qu'ils fassent l'objet d'une publication scientifique, constate-t-il. Quant aux applications concrètes, elles sont plus que jamais à portée de main. »

Cette technologie pourrait en effet être employée d'ici peu dans le secteur de la sécurité industrielle pour visualiser en trois dimensions et à haute résolution les défauts sur des matériaux à la fois denses et épais comme les carlingues d'avions ou les cuves de réacteurs nucléaires. La capacité d'un laser-plasma à produire des rayons X très intenses et cohérents offre par ailleurs la possibilité de développer l'imagerie médicale par contraste de phase. *« Contrairement à l'imagerie par rayons X conventionnelle, cette méthode permet d'obtenir des résolutions très fines, de l'ordre de quelques micromètres, ce qui autoriserait par exemple la détection de tumeurs cancéreuses à un stade très précoce »,* explique le chercheur. À plus long terme, elle pourrait en outre contribuer à démocratiser la radiothérapie par protons employée pour le traitement de certains types de tumeurs. Alors qu'un centre de protonthérapie comme celui d'Orsay s'appuie sur un accélérateur de particules à la fois très encombrant et très coûteux pour déposer des protons au plus près de la tumeur, Victor Malka et son équipe envisagent de faire de même à partir d'un accélérateur laser-plasma. *« Cela aurait l'avantage de rendre l'appareil moins cher et plus compact afin de proposer ce traitement non plus dans un centre de recherche mais directement à l'hôpital. »*

Pour l'ancien étudiant féru de mécanique quantique, qui applique volontiers le principe d'incertitude d'Heisenberg à ses propres travaux, l'émergence d'une innovation de ce genre n'est qu'une question de temps et d'énergie : *« Plus on consacre de moyens au développement d'une technologie et plus courte sera la durée nécessaire pour obtenir des résultats probants. »* Un principe que Victor Malka aura l'occasion de mettre en pratique dans un proche avenir à travers la création d'un laboratoire international associé entre le CNRS et l'Institut Weizmann des sciences, en Israël. **II**

de très grande intensité. Ces travaux, qui feront l'objet d'un article dans la revue *Science*, démontrent la possibilité de développer des accélérateurs de particules à la fois performants et compacts à partir de cette technologie. Ils offrent en outre à Victor Malka la reconnaissance de la communauté scientifique des plasmas : *« Peu de temps après la diffusion de cet article, j'ai reçu un coup de téléphone du responsable du Cern⁴ qui tenait à me féliciter pour la qualité de ces travaux tout en m'invitant à rejoindre ce grand projet européen. »* Deux ans plus tard, le groupe de chercheurs obtient – en même temps que deux autres équipes de l'université de Californie à Berkeley et de l'Imperial College London – des faisceaux de particules dont la qualité avoisine celle des faisceaux délivrés par les accélérateurs traditionnels, mais avec une distance d'accélération bien inférieure. Au fil du temps, d'autres travaux ne feront que confirmer le fort potentiel de l'accélération laser-plasma de particules.

Des applications à portée de main

La montée en puissance de cette recherche d'avant-garde, Victor Malka l'attribue à une certaine propension à entretenir la motivation au sein de son équipe. *« Après seulement une journée d'expérimentation sur une ligne laser, un doctorant obtient bien souvent des résultats*

Claude Lorius distingué aux États-Unis

MATIÈRE

Glaciologie. Claude Lorius a reçu le 4 mai 2017 le prestigieux prix américain Bower, pour ses travaux sur le climat. Retour sur une carrière hors norme avec son confrère Jérôme Chappellaz, à ses côtés lors de la cérémonie à Philadelphie.

PAR SAMAN MUSACCHIO

Vous avez accompagné aux États-Unis Claude Lorius, lauréat du « Bower Science Award » pour ses recherches pionnières sur le changement climatique. Cette nouvelle récompense vient s'ajouter à un palmarès impressionnant...

Jérôme Chappellaz¹ : Oui, Claude Lorius a déjà reçu de nombreux témoignages de reconnaissance. En France, avec la médaille d'or du CNRS en 2002, conjointement décernée à Jean Jouzel, son complice scientifique. Mais aussi sur le plan international, avec les prix Tyler, Blue Planet, Balzan... Cette nouvelle récompense revêt toutefois une saveur particulière, par la liste impressionnante de scientifiques de haut vol déjà récompensés par l'institut Franklin depuis 200 ans (Tesla, Einstein, Marie Curie...), mais aussi compte tenu du contexte climatosceptique exprimé au plus haut niveau de l'État américain... Claude a remis son smoking pour l'occasion, comme au festival de Cannes en 2015, qu'il clôturait avec le film de Luc Jacquet, *La Glace et le Ciel*, consacré à sa vie de scientifique².

Ces récompenses, c'est surtout l'occasion de mettre un coup de projecteur sur le fonctionnement de la recherche en général, telle que Claude a pu la vivre avec son équipe : un long processus de tâtonnement intellectuel exigeant de la patience, de l'intuition, de la prise de risque, une équipe ingénieuse et soudée autour de soi, pour éventuellement aboutir après des décennies d'effort. Mais c'est aussi l'occasion d'attirer les regards vers l'anthropocène, cette nouvelle ère géologique qui voit l'humanité laisser son empreinte indélébile sur l'environnement planétaire, et devant laquelle nous ne pouvons rester les bras croisés à regarder. C'est le combat de Claude depuis des décennies.

Quelle serait aujourd'hui la recherche sur le changement climatique sans le travail de Claude Lorius et de ses collaborateurs ?

J. C. : La science des carottes de glace, que Claude a lancée en France, a largement contribué à notre compréhension des mécanismes régulant le climat terrestre en conditions naturelles, mais aussi à mettre en perspective l'impact des activités humaines.

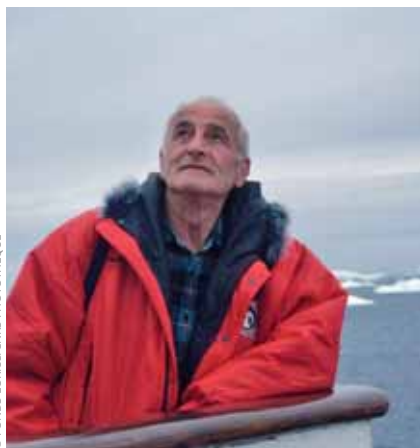
Quels sont les projets qui poursuivent aujourd'hui ces travaux ?

J. C. : Cette science demeure bien vivante ! Aujourd'hui, notre communauté tente de localiser en Antarctique de la glace formée il y a 1,5 million d'années. L'objectif est d'étudier la transition climatique qui s'est produite il y a environ 1 million d'années. Nous espérons pouvoir documenter pour la première fois avec précision l'évolution comparée du CO₂ et d'autres gaz à effet de serre, qui pourraient être responsables de ce changement majeur.

À Grenoble, nous abordons cette question de manière très innovante. Dans le cadre de mon projet ERC « Ice & Lasers », nous avons conçu une sonde embarquant un spectromètre laser. L'idée est de forer le glacier antarctique en deux mois et d'obtenir les informations confirmant l'existence de glace suffisamment ancienne, mais aussi de recueillir tout de suite une partie des données principales.

La science des carottes glaciaires évolue aussi dans sa lecture de l'alphabet naturel que contient la glace. Nous pouvons maintenant distinguer les éruptions volcaniques dont le panache a atteint la stratosphère, et dont l'effet sur le climat est important. Nous disposons aussi de nouveaux traceurs pour reconstruire l'évolution des feux de végétation, ou encore le degré d'humidité à la surface des océans, qui a généré la vapeur d'eau à l'origine des neiges et glaces que nous étudions.

Et puis nous nous sommes lancés dans un nouveau défi : collecter de la matière première de qualité à partir des glaciers de montagne, et la stocker en Antarctique pour les générations futures, avant qu'il ne soit trop tard. Ce projet dénommé « Ice Memory », initié en 2016 sur le Mont-Blanc, s'est poursuivi cette année sur le glacier Illimani, en Bolivie. ■



© FONDUS LORIUS/CNRS PHOTO THEQUE

1. Directeur de recherche à l'Institut des géosciences de l'environnement (CNRS/IRD/Univ. Grenoble-Alpes/Grenoble INP). 2. Lire son portrait publié à cette occasion : « Claude Lorius, une vie dans la glace », dans *CNRS Le journal* n° 281, août 2015.



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

Sabrina Fadloun remporte « Ma thèse en 180 secondes »

Le 14 juin, le studio 104 de la Maison de la radio, à Paris, accueillait la finale nationale 2017 de « Ma thèse en 180 secondes », organisée par la CPU et le CNRS. Seize doctorants, issus des universités et regroupements universitaires français, ont présenté leur travail de recherche en trois minutes chrono. Représentante de la Communauté université Grenoble-Alpes, Sabrina Fadloun est la grande gagnante de cette finale après avoir emporté le premier prix

du jury et le prix du public pour la présentation de sa thèse « Étude d'un procédé de dépôt de cuivre par MOCVD pour la réalisation de vias traversants à fort facteur de forme pour l'intégration 3D ». Avec Davina Desplan, finaliste du regroupement université Paris-Seine et deuxième prix du jury, elle représentera la France lors de la finale internationale du concours qui se tiendra à Liège, en Belgique, le 28 septembre.



© GHELIAN/MT180 - CPU-CNRS



» <http://mt180.fr>

La victoire dans la peau

Le 22 juin à Paris, au siège du Groupe LVMH, **Éric Robert** a reçu le prix académique du concours international « The Cosmetic Victories », qui récompense des porteurs de projets innovants de la filière parfumerie-cosmétique. Directeur de recherche CNRS au sein du Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés¹ (Gremi) à Orléans, il se voit distingué pour son projet PlasmaJets, un appareillage à base de plasma permettant des traitements de la peau à visée anti-âge.

1. Unité CNRS/ Univ. d'Orléans.

DEUX NOMINATIONS EN RÉGIONS

Gabrielle Inguscio est la nouvelle déléguée régionale pour la circonscription Bretagne et Pays de la Loire. Elle remplace Clarisse Lefort-David, devenue déléguée régionale de la circonscription Paris-Villejuif. Par ailleurs, Marie-Hélène Papillon a été nommée déléguée régionale pour la circonscription Île-de-France Sud. Elle prend la suite de Jean-Jacques Guillemot, qui exerçait ces fonctions par intérim depuis avril, en remplacement de Bertrand Minault.

Trois nouveaux directeurs d'institut

Ces derniers mois, trois instituts du CNRS ont accueilli un nouveau directeur.

Le 1^{er} juin, **Jacques Maddaluno**, directeur de recherche au CNRS, a pris la tête de l'Institut de chimie (INC), succédant à Dominique Massiot. Ingénieur de l'École nationale supérieure de chimie de Paris et docteur en chimie organique de l'université Pierre-et-Marie-Curie, Jacques Maddaluno a mené ses études postdoctorales à l'université de Stanford (États-Unis) avant de poursuivre ses travaux au sein des universités de Rouen et Paris-Descartes. Ses recherches, qui ont donné lieu à plus de 150 articles et un brevet, portent principalement sur la chimie organique, la chimie organométallique et la chimie théorique. Après avoir présidé la section 12 du Comité national de la recherche scientifique, Jacques Maddaluno avait rejoint l'INC en 2011 en tant que directeur adjoint scientifique.



© CNRS

Le 1^{er} juillet, **François-Joseph Ruggiu**, professeur des universités, a été nommé directeur de l'Institut des sciences humaines et sociales (INSHS), prenant la suite de Patrice Bourdelais. Membre du Centre Roland-Mousnier, cet ancien élève de l'ENS enseigne à Paris-Sorbonne. Spécialiste de l'histoire comparée de la société et de la famille en Europe à l'époque moderne, il étudie aussi l'histoire des sociétés américaines de la période coloniale. Il co-anime une grande enquête sur la population de Charleville et travaille en outre à une histoire de la noblesse dans le premier empire colonial français. Depuis 2010, il a occupé plusieurs fonctions à l'INSHS en tant que directeur adjoint scientifique, en charge des unités d'histoire,



© E. MASSON/CNRS

des dossiers liés à la valorisation, à la communication et à l'information scientifique et technique, de la politique de site et de la création du campus Condorcet.



© CNRS

Le 28 août, **Pascal Auscher** a succédé à Christoph Sorger à la direction de l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (Insmi). Professeur à l'université Paris-Sud depuis 2002, spécialiste d'analyse harmonique, ayant contribué à la théorie des ondelettes et aux équations aux dérivées partielles, il a participé à la démonstration de la conjecture de Kato. Directeur du Laboratoire amiénois de mathématique fondamentale et appliquée (2000-2002), il est chargé dès 2006 de l'évaluation des laboratoires et des formations dans sa discipline au sein du ministère de la Recherche puis devient, de 2007 à 2009, l'un des délégués scientifiques de l'Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur. Membre du conseil scientifique de l'Insmi (2010-2014), coordinateur jusqu'à récemment d'un laboratoire international associé avec l'Australie, il a passé le premier semestre 2017 à l'université de Berkeley (États-Unis).



UN JOUR AVEC

Louise-Anne Cariou

Ingénieure prévention et sécurité

PAR LAURIANNE GEFFROY

> 9 H 30

TEST DE LA QUALITÉ DE L'AIR

C'est au pas de course que la journée commence pour Louise-Anne Cariou, ingénieure prévention et sécurité de l'Institut des sciences chimiques de Rennes¹. Ici, 478 personnes innoveront dans tous les domaines de la chimie, de la catalyse aux matériaux électroactifs tels que ceux utilisés dans les LED.

Ce matin, elle doit aller tester l'efficacité du nouveau système de ventilation des laboratoires de chimie organique, s'assurer que les composés organiques volatils ou COV², qui s'évaporent lors des synthèses chimiques, sont efficacement évacués. Postée au dernier étage du bâtiment, Louise-Anne vérifie que les fumigènes libérés sous les « sorbonnes » – ces hottes de laboratoire protégées par des parois – sont bien aspirés par les cheminées d'extraction et qu'aucune trace de COV ne réside dans les locaux. Des filtres à la sortie des sorbonnes permettent d'avoir des rejets extérieurs conformes à la législation, sans risque pour l'environnement. « *La qualité de l'air est une priorité, car les COV peuvent irriter les muqueuses, provoquer des nausées ou des maux de tête*, explique la jeune femme. *Certaines personnes sont particulièrement sensibles à ces produits.* »

Sa mission

Ingénieure au CNRS, elle met tout en œuvre pour assurer la sécurité et les bonnes conditions de travail du personnel de l'Institut des sciences chimiques de Rennes. Elle a reçu en 2017 la médaille de cristal de l'organisme.

système aéraulique ne font que commencer. Louise-Anne Cariou, qui jongle avec les codes du travail, de la santé publique et de l'environnement, doit aller annoncer aux assistants de prévention – des personnels qui l'épaulent dans sa mission –, la fermeture de certains bureaux et salles d'expériences d'une équipe de recherche. C'est avec une bonne dose de diplomatie, et des solutions en

poche, qu'elle leur expose le planning. « *Le dialogue est pour moi essentiel, souligne-t-elle, et les gens sont ici très conscients que l'on agit pour leur santé et la qualité de leur environnement. Plus de 80 personnes sont*

d'ailleurs impliquées activement sur les questions de sécurité. » Demain, c'est avec l'équipe de chantier qu'elle doit négocier.

> 13 H

CHASSE AUX DOULEURS

Avant de redescendre à son bureau, Louise-Anne pousse la porte de l'atelier de l'un des trois souffleurs de verre du laboratoire, qui conçoivent et réalisent des pièces sur mesure pour les expérimentations des chercheurs. Il y a encore quelques mois, ces derniers se plaignaient de douleurs articulaires et de maux de tête récurrents. Pour mieux comprendre l'origine du problème et aménager des solutions pertinentes, l'ingénieure



> 11 H

SUIVI DE CHANTIER

Les travaux de modernisation des cheminées d'extraction et du

1. Unité CNRS/Université de Rennes 1/ENSIC de Rennes/Insa de Rennes. 2. Les COV les plus connus sont le butane, le toluène, l'éthanol (alcool à 90°), l'acétone et le benzène. 3. RForce4 : Réduire, Réutiliser, Réparer, Recycler.

sécurité n'a pas hésité à chausser des lunettes bleues et à souffler des pièces de verre durant une semaine. Conclusion : c'est la position, le port de charge et la répétitivité des mouvements qui sont en cause. Aujourd'hui, grâce à la ténacité de Louise-Anne, de la médecine de prévention et des tutelles, deux exosquelettes ont été installés dans les ateliers pour soutenir le bras des souffleurs de verre et accompagner tous leurs gestes. « *Depuis, les douleurs articulaires sont parties !* » se réjouit-elle.

➤ 14 H 30

EXPERTISE RÉGIONALE

Pas le temps de se poser. Louise-Anne Cariou a rendez-vous sur le site de l'École nationale supérieure de chimie de Rennes – qui héberge, à quelques bâtiments de distance, des équipes de l'unité – pour y livrer des flacons d'effluents prélevés dans l'environnement d'un autre laboratoire

breton. Louise-Anne souhaite s'assurer qu'aucune trace de formaldéhyde (formol), utilisé notamment par les chercheurs pour conserver des plantes, ne se retrouve dans le milieu, et mettre en place, si nécessaire, des mesures de prévention. Cette fois-ci, c'est pour la délégation régionale CNRS Bretagne et Pays de la Loire qu'elle intervient. Parallèlement à l'Institut, la jeune femme consacre en effet 20 % de son temps à la région, lui apportant son expertise en risques chimiques mais aussi en radioprotection.

➤ 17 H

MISSION RECYCLAGE

La journée se calme enfin... ou presque. Un collègue passe une tête dans son bureau pour lui demander comment transporter des produits chimiques synthétisés en laboratoire vers Toulouse. Louise-Anne l'aiguille vers l'unité Ulysse du CNRS, spécialisée dans le transport de matières dangereuses, et peut désormais s'atteler à la rédaction de ses comptes rendus. Elle doit travailler sur la gestion des déchets du labo avec le groupe de travail RForce⁴, qu'elle a mis en place notamment avec son collègue Gilles Alcaraz, référent « déchets chimiques » du laboratoire. « *On essaye par exemple de recycler certains produits pour limiter leur impact sur l'environnement. On décontamine également du matériel électrique et électronique afin qu'il puisse être pris en charge par la filière classique de traitement des déchets*, explicite Louise-Anne Cariou. *Cela limite les pollutions sur le milieu, mais aussi les coûts !* » II



© PHOTOS : L. GÉFFROY

➤ Louise-Anne contrôle les installations : à gauche, un ballon de distillation ; ci-dessus, un exosquelette destiné à soulager les souffleurs de verre.

Nomination

Michel Mortier délégué général à la valorisation du CNRS

Michel Mortier a été nommé en juin délégué général à la valorisation du CNRS par Alain Fuchs, président de l'organisme. Sa mission : assurer le pilotage et la coordination de l'ensemble des activités du CNRS en matière de valorisation et de transfert. Michel Mortier, 51 ans, était depuis janvier 2012 conseiller du président sur les politiques de sites et plus spécifiquement en charge des relations avec l'Idex de Bordeaux. Entre 2010 et 2011, il avait été chargé de mission auprès d'Alain Fuchs sur les questions d'innovation et de valorisation de la recherche en lien avec le programme d'investissements d'avenir.

Directeur de recherche au CNRS et spécialiste des matériaux inorganiques pour l'optique et la photonique, Michel Mortier dirige l'Institut de recherche de chimie Paris¹. Entre 2010 et 2013, il a été directeur du département Henri-Moissan, une fédération de plusieurs laboratoires de recherche situés au sein de Chimie ParisTech.

Succédant à Nicolas Castoldi, nommé directeur adjoint du cabinet de Frédérique Vidal, ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, Michel Mortier devient membre du directoire du CNRS aux côtés du président, de la directrice générale déléguée à la science, Anne Peyroche, du directeur général délégué aux ressources, Christophe Coudroy, et de la directrice de cabinet, Marie-Hélène Beauvais.



Lire aussi l'éditorial
de Michel Mortier p. 3

1. Unité CNRS/Chimie ParisTech.

Frédérique Vidal, ministre de la Recherche

En mai, Frédérique Vidal, alors présidente de l'université de Nice Sophia-Antipolis, a été nommée ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. Titulaire d'un doctorat en sciences de la vie, elle rejoint l'université de Nice en 1995 comme maître de conférences et devient professeure des universités en 2004. Ses recherches portent sur la génétique moléculaire, avec la mise en place de modèles cellulaires et animaux.



© MESRI/ARPICTURES

Cédric Villani à la tête de l'Opecst

Le 13 juillet, le mathématicien Cédric Villani, médaille Fields 2010 et député de l'Essonne, a été élu à la présidence de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Opecst). Composée de 18 députés et 18 sénateurs, cette délégation parlementaire a pour mission « d'informer le Parlement des conséquences des choix de caractère scientifique et technologique afin, notamment, d'éclairer ses décisions ».

Un chercheur distingué au Canada

Lluís Mir, directeur du laboratoire Vectorologie et thérapeutiques anticancéreuses¹, a reçu en août la médaille d'or Balthasar van der Pol, à Montréal. Ce prix récompense notamment ses travaux pionniers dans le domaine prometteur de l'électroporation.

1. Unité CNRS/Univ. Paris-Sud/Institut Gustave-Roussy.

Le meilleur jeune économiste

Antoine Bozio, 39 ans, directeur de l'Institut des politiques publiques et chercheur associé à PSE-École d'économie de Paris, a reçu en mai 2017 le prix du meilleur jeune économiste – décerné par *Le Monde* et le Cercle des économistes – pour ses travaux sur l'évaluation des politiques publiques.

TATIANA GIRAUD LAURÉATE DE L'INSTITUT DE FRANCE

Le 7 juin ont été remis les grands prix des fondations de l'Institut de France. Tatiana Giraud, directrice de recherche au CNRS, a reçu le grand prix scientifique de la Fondation Louis D. Directrice adjointe du laboratoire Écologie, systématique et évolution¹, médaille d'argent du CNRS en 2015, elle étudie les mécanismes permettant aux organismes d'évoluer et de s'adapter aux changements environnementaux, avec pour modèle biologique les champignons. Ses travaux ont permis de mieux comprendre comment émergent les nouvelles maladies de plantes dans les écosystèmes naturels et agricoles.

Parmi les autres récompenses, le grand prix d'archéologie de la Fondation Del Duca a distingué le programme de recherche Thanar mené depuis 2002 sur l'île de Thasos, en Grèce. Dirigées par Arthur Muller au laboratoire Histoire, archéologie, littérature des mondes anciens (Halma)², les fouilles menées en collaboration avec l'université d'Athènes et sous l'égide de l'École française d'Athènes et du ministère de la Culture grec ont livré des découvertes sur ce site antique exceptionnel.

1. CNRS/univ. Paris-Sud. 2. Unité CNRS/Univ. Charles-de-Gaulle/Min. de la Culture et de la communication/Inrap.



© ARPICTURES

Disparition de Gérard Férey, médaille d'or 2010 du CNRS



© F. PLAS/CNRS PHOTO THEQUE

Gérard Férey s'est éteint le 19 août 2017. Né en 1941, ce chimiste, spécialiste mondial des solides poreux, avait reçu la médaille d'or du CNRS en 2010 pour ses travaux sur ces matériaux aux multiples applications pour l'environnement (comme le piégeage du CO₂) ou la santé (pour l'encapsulation de médicaments). Membre de l'Académie des sciences, lauréat de nombreux prix prestigieux, il avait notamment mis au point, avec son équipe de l'Institut Lavoisier de Versailles¹, le MIL-101, capable de piéger 400 fois son volume de gaz.

1. Unité CNRS/UVSQ.

 Lire son portrait sur lejournale.cnrs.fr

GRAND FORMAT



*Voyage dans les avions de demain,
ascension des plus hauts sommets
des Alpes et tour d'horizon
des modèles animaux en biologie.*

ILLUSTRATION : GIANPAOLO PAGNI POUR CNRS LE JOURNAL



MATIÈRE

NUMÉRIQUE

Matériaux, moteurs, systèmes embarqués...
La science est partout à bord d'un avion.
De nombreuses recherches visent à le rendre
plus léger, plus performant, plus sûr et moins
polluant. Panorama de ces travaux qui
préparent les avions de demain.

UN DOSSIER RÉALISÉ PAR

MATHIEU GROUSSON ET JEAN-BAPTISTE VEYRIERAS

Sur la piste de l'avion du futur



Les avions font partie de ces objets qui concentrent le génie humain. Même si leur allure nous semble presque inchangée depuis cinquante ans, elle cache des évolutions impressionnantes auxquelles une centaine de laboratoires du CNRS a largement contribué. Tous ces engins profitent aujourd'hui de nouveaux matériaux, de structures plus fiables et allégées, d'écoulements optimisés de l'air autour des ailes, d'une meilleure combustion dans les turboréacteurs, d'une diminution du bruit, des émissions nocives et de la consommation de carburant, d'un meilleur contrôle du givrage, d'un freinage plus performant ou encore – n'en jetez plus ! – d'une aide au pilotage optimisée. Structure, motorisation, systèmes embarqués : ces trois composantes de l'avion, d'un coût similaire, ont toutes bénéficié des avancées de la recherche.

La révolution composite

Penchons-nous tout d'abord sur la structure, à savoir le fuselage, les ailes, l'empennage, mais aussi ces ...

Yves Rémond

est professeur de mécanique des matériaux, polymères et composites à l'université de Strasbourg (ECPM). Il est directeur adjoint scientifique de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (Insis) du CNRS.



... structures cachées qui confèrent à l'avion sa rigidité et sa résistance. Leurs contraintes sont nombreuses, liées au roulement sur la piste, aux vibrations et à la fatigue créée par les sollicitations en vol, aux variations de température et au vieillissement des matériaux.

Toutes ces structures ont d'abord été entièrement métalliques, puis allégées avec l'utilisation de matériaux de plus en plus performants. Car les métaux sont parfois lourds et inutilement résistants pour l'usage qu'on leur demande. Des alliages plus légers ont donc été rapidement utilisés. Puis, nous sommes entrés dans l'ère des matériaux composites, avec des renforts de fibres de carbone noyées dans des polymères. Pour l'A320 d'Airbus, déjà ancien, on trouvait ainsi près de 4,5 tonnes de structures en composites, permettant un gain de plus d'une tonne par rapport à une structure métallique... et une économie de plusieurs milliers de tonnes de kérosène sur la vie de l'avion. Pour l'A380, la pièce composite sur laquelle viennent s'accrocher ses ailes gigantesques a permis un allègement de l'avion de 3 tonnes. De 5 % de la masse de la structure il y a quarante ans, on dépasse désormais les 50 % de composites sur les derniers avions de ligne. Ces matériaux ont même conquis les freins ! Lointains héritiers des modèles à tambour d'avant 1950, ce sont aujourd'hui des freins en carbone-carbone, capables de garder leurs propriétés jusqu'à 2 000° C et d'évacuer en quelques secondes d'atterrissage toute l'énergie cinétique d'un avion.

Revers de la médaille, les matériaux composites possèdent des modes d'endommagement bien plus complexes à prévoir que les métaux. Pour ces derniers, déjà, l'apparition de fissures dues à la fatigue n'a été comprise que tardivement. C'est en effet suite à des implosions d'avion en plein vol, dans les années 1950, que des études ont permis de découvrir le rôle joué par la fatigue, c'est-à-dire l'effet de sollicitations répétées qui à la longue génèrent des fissures, alors que les mêmes contraintes appliquées en continu auraient été très bien supportées. Ce n'est qu'à partir de là que des calculs en fatigue apparurent systématiquement pour les avions.

La présence de fissures dans la structure d'un avion est normale et très surveillée, mais il s'agit de prévoir leur propagation, un exercice très complexe qui dépend de nombreux paramètres. Les dernières recherches permettent de l'anticiper avec précision, et donc de prédire la durabilité de l'avion.

Paradoxe intéressant : les matériaux composites se fissurent très tôt dans leur vie, mais résistent bien mieux

à la fatigue que les alliages. En revanche, ils sont davantage sensibles que les alliages métalliques à la présence de trous, qui vont constituer un départ d'endommagement. On se dira qu'il suffit de ne pas faire de trous dans un avion ! Hélas, c'est le mode d'assemblage le plus largement utilisé pour sa construction et l'on a ainsi plusieurs millions de trous dans certains gros avions de ligne actuels. C'est dire si le calcul de la prévision des ruptures au voisinage de ces trous est important. Et au final, les structures trouées des avions étant aussi sollicitées en fatigue, les composites s'en sortent largement mieux que les alliages.

Des moteurs première classe

La motorisation fait également l'objet de progrès considérables. Pourtant, les phénomènes qui s'y déroulent sont très complexes avec, pêle-mêle, des écoulements turbulents, une combustion à maintenir et des températures très élevées à supporter car plus la température sera haute, meilleur sera le rendement du moteur. Aussi des chercheurs œuvrent à mieux comprendre la combustion, avec un impératif en tête : la société demande à juste titre une diminution des consommations de carburant et des nuisances sonores, et une augmentation de la fiabilité. Le LEAP, très récent dernier-né des moteurs d'avion développé par Safran et General Electric, est un bel exemple de progrès fondé sur des recherches menées depuis des décennies par les laboratoires du CNRS avec ses partenaires. Permettant de réduire la consommation de près de 15 % et les émissions d'oxydes d'azote de 50 %, il équipera la plupart des nouveaux avions monocouloirs et a déjà été vendu à plus de 14 000 exemplaires, ce qui constitue un record.

Terminons par les systèmes embarqués, qui représentent l'ensemble des équipements informatiques de pilotage et de commande, de capteurs, radios, radars, etc., et doivent résister avec une fiabilité absolue à toutes les contraintes du vol : secousses, vibrations, froid intense à l'extérieur, chaleur extrême à proximité de la combustion, durée de vie de plusieurs années, résistance aux intempéries et à la foudre. En outre, ils consomment une énergie qu'il faut réussir à embarquer. Il y a, par exemple, de 400 à 600 kilomètres de câbles dans un A380. Enfin, toutes les connexions demandent à être sécurisées, ce qui représente également un défi permanent... relevé dans de nombreux laboratoires français.

Bien d'autres domaines, parfois étonnants, restent à explorer. C'est le cas notamment des essais sur « mésostructures », qui visent à limiter au maximum le nombre d'essais à réaliser pour concevoir un nouvel avion tout en augmentant la quantité d'informations obtenues. La recherche a encore beaucoup d'idées pour faire voler les avions du futur. II

“Les dernières recherches permettent de prédire la durabilité d'un avion.”

Le régime minceur des avions de ligne

En quelques années, les chercheurs et ingénieurs qui travaillent sur les structures et les matériaux des avions sont parvenus à réduire le poids de ces appareils de plusieurs tonnes. Une avancée majeure qui préfigure de nouvelles performances aéronautiques.



L'Airbus A350-XWB, constitué de matières composites, lors d'une démonstration en vol au Salon du Bourget de 2015.

Is rendent les avions plus résistants mais aussi plus légers, et permettent ainsi de réduire leur consommation. Depuis les années 1980, le succès des matériaux composites ne se dément pas. Leur proportion dans la structure des avions de ligne ne cesse en effet de croître, dépassant les 50 % sur certains modèles récents. Cantonnée aux pièces secondaires dans un premier temps (bords d'attaque¹, volets mobiles², etc.), leur utilisation s'étend désormais au fuselage et aux ailes, et même aux parties les plus sollicitées de l'avion, c'est-à-dire la liaison ailes-fuselage. « *Mais sans la modélisation et la simulation de pointe développées par les chercheurs et les ingénieurs, les matériaux composites n'auraient pas prospéré aussi rapidement* », souligne Francisco Chinesta, chercheur à l'Institut de calcul intensif et à l'Institut de recherche en génie civil et mécanique³ (GeM).

L'envol des nouveaux matériaux

Avec sa forme de chauve-souris géante et un poids n'excédant pas les 300 kilogrammes, *Éole*, l'avion conçu par l'ingénieur Clément Ader (1841-1925), pouvait s'élever de 20 centimètres au-dessus du sol sur presque 50 mètres. Un avion doublement précurseur puisque sa structure, de bois et de tissu, intégrait déjà des matériaux composites naturels. En 2011, soit 121 ans après le premier vol d'*Éole*, le Boeing 787 fend les airs avec la moitié de son

poids en matériaux composites, à l'instar de la dernière version de son nouveau concurrent, l'Airbus A350. Entre-temps, pourtant, le métal avait largement remplacé toile et bambou. Dans les années 1970, le célèbre et imposant Boeing 747 n'était, lui, constitué que d'alliages d'aluminium.

« *Les travaux sur l'utilisation de matériaux composites dans l'aéronautique ont démarré dans les années 1970* », se souvient Olivier Allix, professeur au Laboratoire de mécanique et technologie⁴ (LMT-Cachan) et coresponsable du laboratoire commun EADS-ENS « Inno-Campus ». « *Les composites dans un avion sont principalement constitués d'une matrice organique renforcée par des fibres de carbone, pour les pièces de la structure comme le fuselage ou les ailes, précise le chercheur. Outre leur légèreté, leur immense avantage est d'être insensibles à la corrosion et très peu sensibles à la fatigue, à la différence des métaux. On voit également émerger des composites à matrice en céramique, restreints à certaines pièces de moteur, et seuls à même de supporter de fortes températures.* » Enfin, des architectures tissées très résistantes aux impacts sont aujourd'hui utilisées dans un moteur comme le LEAP de Safran, qui permet des gains de consommation et de pollution de l'ordre de 30 %.

Sur le plan mécanique, et dans des conditions normales de vol, ces matériaux montrent des propriétés ...

1. Il s'agit de la surface saillante à l'avant d'une aile sur laquelle l'air vient se diviser pour s'écouler de part et d'autre de l'aile. 2. Actionnés en bout d'aile ou à l'arrière de l'empennage, ils permettent au pilote de diriger l'appareil dans les airs. 3. Unité CNRS/Univ. de Nantes/École centrale de Nantes. 4. Unité CNRS/ENS Paris-Saclay/UPMC.

... supérieures pour ce qui est du rapport poids-résistance, en comparaison des alliages métalliques. *« La résistance, on la doit aux fibres de carbone tissées, un peu comme du tissu, explique Francisco Chinesta. C'est résistant, mais cela ne tient pas la forme, tout comme le tissu d'un vêtement. On imprègne alors les fibres avec une matrice organique, généralement un polymère, qui va permettre de maintenir les fibres et de fixer une forme. »* Bilan : ces matériaux sont non corrosifs, plus légers et plus résistants que les métaux. Dès lors, l'utilisation de ces composites a été fortement encouragée après les chocs pétroliers des années 1970 afin, notamment, de réduire la facture de carburant.

Mais ces avantages ont aussi leurs revers. Ainsi, les composites semblent moins adaptés aux imprévus de vol tels que la foudre ou les oiseaux. Leur faible capacité à conduire le courant, à la différence des métaux, oblige en effet les constructeurs à *« ajouter, par exemple, de grandes poutres en cuivre dans le fuselage pour jouer le rôle de masse et dissiper le courant lors d'un foudroiement en plein vol »*, évoque Philippe Olivier, directeur de l'Institut Clément-Ader⁵, dont les équipes étudient les structures, les systèmes et les procédés mécaniques en aéronautique. La capacité des composites à absorber des chocs violents lors d'une collision en vol avec des oiseaux ou des projectiles est

également moindre que celle des métaux. Enfin, l'usinage des pièces et la réparation de structures endommagées peuvent se révéler plus délicats et plus coûteux.

L'usine du futur

Ces limitations actuelles, Philippe Olivier et les équipes de l'Institut Clément-Ader souhaitent les dépasser. En lien étroit avec les industriels – dont Airbus –, ce groupe de chercheurs répartis entre Toulouse, Albi et Tarbes s'intéresse de près à la fabrication des pièces composites. Afin de rendre l'usinage de ces pièces plus rapide et moins onéreux, des procédés de fabrication à bas coût



Contrôle d'une aube fabriquée par tissage en 3D de fibres de carbone, destinée au moteur LEAP, au centre Safran d'Issy-les-Moulineaux (Essonne).



Le « plug ARCOCE », un cône d'éjection en composite à matrice céramique, a effectué son premier vol en 2015 sur un A320.

ont été conçus au sein de l'Institut. À l'instar de la start-up Aurock, *« créée par d'anciens doctorants du laboratoire, qui propose aux industriels un processus de mise en forme original et économique à l'aide de moules en béton fibré »*, témoigne Philippe Olivier.

L'un des facteurs limitants pour l'usinage des pièces composites est le temps de chauffage nécessaire pour leur imprimer leur forme définitive. *« Pour accélérer la cadence, nous avons d'autres machines en cours d'évaluation »*, indique le chercheur. Du chauffage par induction ultrarapide aux infrarouges, en passant par le « formage superplastique » emboutissant une pièce par simple pression de gaz, ce sont autant de pistes pour faire baisser le coût tout en réduisant le cycle de production.

En tant que spécialiste des procédés de fabrication des composites, Francisco Chinesta connaît bien les problématiques d'usinage : « *Mon travail consiste à comprendre puis à modéliser les procédés industriels de mise en forme des pièces finales de l'avion. Et ce faisant, à déterminer "la trace" mathématique du matériau dans la machine*, précise ce chercheur féru de simulations numériques. *Une fois que j'ai transcrit le procédé en équations, je teste sur ordinateur des milliers de scénarios afin de faire encore mieux : enlever quelques kilogrammes, fabriquer plus vite ou avec moins d'énergie.* »

Des matériaux conçus in silico

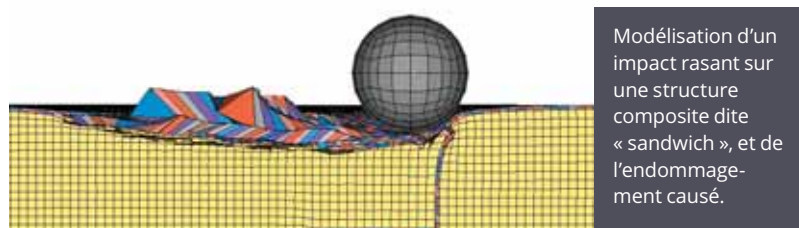
Et même si, compte tenu du grand nombre de paramètres à considérer, les simulations peuvent prendre des jours, voire des semaines, le gain pour les industriels est décisif. « *C'est grâce aux approches numériques, qui se sont largement imposées depuis le début des années 2000, que l'on peut aujourd'hui envisager l'étude de nouveaux matériaux composites mieux à même de résister au foudroiement ou aux impacts* », se réjouit Francisco Chinesta.

Les approches numériques sont également au cœur de la nouvelle plateforme STIMPACT dont Olivier Philippe a contribué à la création. Grâce à l'utilisation de lanceurs à air comprimé, uniques en leur genre et conçus par le chercheur et son équipe de Toulouse, elle offre la possibilité d'étudier tous les types d'impacts que peut subir, à faible ou à grande vitesse, un avion. En outre, « *l'utilisation de caméras à très haut débit, capables de filmer 100 000 images par seconde, nous permet de réaliser des analyses spatio-temporelles sans précédent* », indique le scientifique. Il a présenté les premiers résultats issus de la plateforme lors du Salon du Bourget, en juin 2017. Les avancées conjointes des instruments et des méthodes de traitement informatique permettent également à Philippe Olivier et à ses équipes de proposer aux industriels des processus mobiles mieux adaptés à la réparation de pièces composites détériorées.

« *L'endommagement des matériaux composites est désormais bien mieux compris et prédit grâce aux approches numériques, qui permettent d'intégrer tout le savoir accumulé sur la physique complexe de ces matériaux* », rappelle Olivier Allix. Les travaux pionniers menés au LMT-Cachan sous l'impulsion de Pierre Ladevèze ont permis le développement d'outils désormais « *intégrés dans la plupart des codes industriels* ». Toutefois, les avancées les plus récentes dans le domaine ne sont pas encore utilisées en routine : « *Lorsque les industriels effectuent des simulations, leurs outils ont au moins dix ans de retard sur ceux de la recherche. Ce n'est que*

lorsqu'un essai se passe mal que nos outils numériques de dernière génération viennent à la rescousse pour éclairer ce qui s'est passé », note le chercheur.

Si la révolution numérique chemine plus lentement du fait de la rigueur des processus d'homologation, elle fera la différence dans les années à venir. « *Le nombre de données acquises depuis les années 2000 grâce à ces nouvelles techniques expérimentales croît plus vite que la loi de Moore⁶* », souligne Olivier Allix. Couplées à des bancs d'essais de plus en plus précis dans leurs mesures, ces approches *in silico* pourraient permettre de simuler la tenue des matériaux en considérant l'avion dans son ensemble, et non plus seulement ses sous-



© INSTITUT CLEMENT ADER

parties. Une « rupture méthodologique » qui pourrait accélérer à terme l'intégration de nouveaux matériaux composites encore plus performants. « *Cela demeure un défi, mais la possibilité de réaliser plus rapidement et avec un plus grand réalisme les tests d'endommagement par simulation est désormais en ligne de mire* », se félicite Olivier Allix.

Vers des avions 3.0

Un horizon numérique que Francisco Chinesta voit encore plus riche en données. « *On demande désormais aux matériaux davantage que par le passé. La légèreté et la tenue en vol ne suffisent plus, il faut à présent qu'ils jouent un rôle actif* », souligne le chercheur. Les successeurs du futur A350 pourraient bien être ces premiers « avions connectés », bardés d'une myriade de capteurs intégrés au sein même des matériaux : « *C'est le début de l'ère du big data et du "diagnostic en ligne" : toutes les informations que l'on va récolter à chaque moment du vol nous renseigneront sur la tenue de la structure, nous permettront d'affiner les modèles et en retour de prévenir les problèmes. L'intelligence artificielle au cœur même des matériaux, voilà la grande révolution à venir* », s'enthousiasme Francisco Chinesta. Pour ainsi dire, et paradoxalement, le constituant phare de nos avions semble désormais bien être ce nouvel alliage fait de carbone, de polymères et... d'immatériel. ■ J.-B. V.

5. Unité CNRS/Univ. de Toulouse Paul-Sabatier/Insa Toulouse/Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace/École des mines d'Albi-Carmaux.

6. Elle a été formulée en 1965 par l'ingénieur et cofondateur d'Intel, Gordon E. Moore. C'est une loi dite « exponentielle » : elle prédit le doublement annuel des capacités des microprocesseurs d'ordinateur à coût constant.



Les avions d'aujourd'hui sont truffés d'ordinateurs. Les scientifiques sont aux avant-postes pour s'assurer de leur bon fonctionnement et les prémunir contre les bugs.

Poste de pilotage de l'Airbus A350, à l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle.

Objectif sûreté pour les logiciels embarqués

Commandes de vol, pilote automatique, communications entre la machine et l'équipage... À bord d'un avion, de nombreux éléments logiciels sont critiques et n'ont aucun droit à l'erreur. Depuis 30 ans, leur sûreté doit beaucoup à la communauté informatique française, championne des langages dédiés au contrôle-commande et des logiciels anti-erreur.

Un langage adapté aux flots de données

Tout commence dans les années 1980 par une intuition géniale de plusieurs informaticiens. Les spécialistes le savent bien : un logiciel dit de « contrôle-commande » doit prendre périodiquement des décisions en un temps limité, à partir d'un flot continu d'informations extérieures. L'idée fut de programmer ce logiciel de telle sorte qu'il traite ce flot de manière simultanée plutôt que séquentielle. Les langages synchrones étaient nés.

« L'idée est aussi puissante que de négliger les frottements en mécanique, explique Marc Pouzet, du département d'informatique de l'École normale supérieure¹ (DI ENS). On sait bien que cela ne décrit pas la réalité, mais cela permet de construire une théorie robuste sur laquelle s'appuyer. » En l'occurrence, ici, d'écrire des programmes indépendamment des processeurs sur lesquels ils seront exécutés.

Cette idée est notamment au cœur du langage Lustre, développé par Nicolas Halbwachs et Paul Caspi, du laboratoire Verimag². Sa force ? « Il a la même logique que celle adoptée par les automaticiens, habitués à raisonner en termes de flots de données traversant des composants électroniques », précise Nicolas Halbwachs. C'est la raison pour laquelle il est rapidement adopté par Airbus pour la programmation des commandes de vol de ses avions. Sous sa forme industrialisée, Lustre devient le logiciel SCADE, utilisé par la suite pour



Lire aussi le portrait d'Ali Zolghadri, médaille de l'innovation 2016 du CNRS, sur lejournale.cnrs.fr. Cet expert de l'automatique est à l'origine d'un algorithme important utilisé sur l'A350.

« dessiner » les commandes de l'A340, de l'A380, puis de l'A350. Aujourd'hui, SCADE est utilisé partout dans le monde. « *Ce logiciel et ceux qui s'en inspirent sont désormais une évidence dans l'univers du contrôle-commande* », poursuit l'informaticien. D'où une évolution permanente. « *Exploré en collaboration avec Airbus, un des sujets brûlants est de déterminer la façon d'implémenter SCADE sur des processeurs massivement parallèles*³ », indique Marc Pouzet.

Prévenir les bugs et les pannes

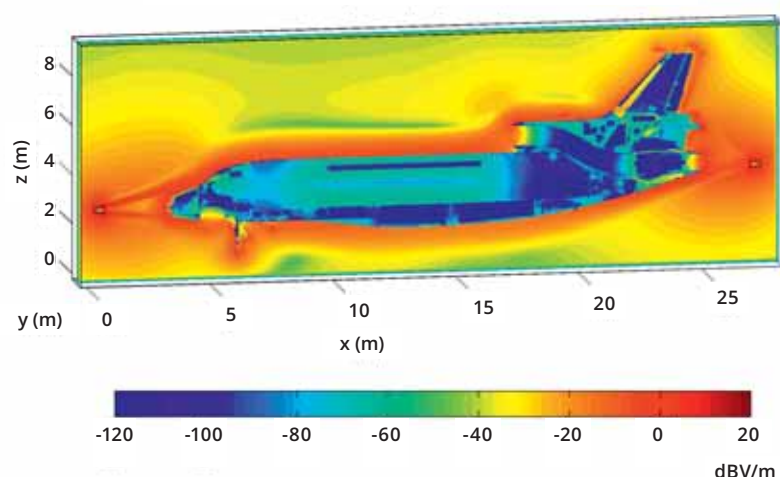
Par ailleurs, comment garantir qu'un logiciel de contrôle-commande se comporte correctement ? La réponse est donnée par le logiciel Astrée, spécialisé dans les risques d'écriture au mauvais endroit, de division par zéro, de problèmes liés aux opérations en virgule flottante et autres sources potentielles de plantage. « *Dans l'absolu, on sait depuis Turing qu'une telle ambition est vouée à l'échec, relativise David Monniaux, lui aussi chercheur à Verimag et impliqué dans le développement d'Astrée. Mais dans le cadre plus restreint des programmes de contrôle-commande, Airbus nous a d'abord sollicités pour une preuve de concept.* »

“La sûreté des avions doit beaucoup à la communauté informatique française.”

Le résultat est au-delà des espérances et Airbus applique la première version d'Astrée aux commandes de vol de l'A340-600, puis de l'A330. Ce qui n'empêche pas les chercheurs de l'améliorer sans cesse. Xavier Rival, du DI ENS, détaille : « *La communauté informatique travaille sur plusieurs fronts. Par exemple, l'adaptation d'Astrée aux langages asynchrones, utilisés dans l'aviation pour l'analyse des pannes ou les annonces audio*

et visuelles aux pilotes. L'amélioration des diagnostics lors de la détection d'un bug potentiel fait également l'objet d'importants transferts technologiques. Enfin, l'extension d'Astrée à des preuves de sécurité – vulnérabilité d'un programme face à des attaques extérieures, robustesse d'une plateforme informatique quel que soit le logiciel qu'on y installe... – est un domaine très actif. » ■ M. G.

NIVEAU DU CHAMP ÉLECTRIQUE



Distribution du champ électrique dans un avion Falcon soumis à un test d'attachement de la foudre.

Le problème de la foudre

L'avion utilisant de plus en plus l'énergie électrique, il faut s'assurer qu'il est immunisé contre la foudre. Autrement dit, qu'en cas de foudrolement – ce qui survient environ toutes les 3 000 heures –, le courant parasite induit sur la structure et qui se couple au réseau revient bien à la masse, sans dommages pour les équipements.

Pour ce faire, les avionneurs soumettent leurs avions à une batterie de tests grandeur nature. De leur côté, Alain Reineix et Christophe Guiffaut, de l'Institut de recherche XLIM⁴, ont mis en place, en partenariat avec Dassault Aviation, un logiciel capable de modéliser toute la topologie de câblage et la complexité de la structure d'un avion. Résultat : une cartographie du champ électromagnétique dans tout l'avion et des courants parasites induits sur les câblages, permettant d'évaluer les contraintes pour les équipements sensibles. « *Nous sommes les seuls à réaliser ce type de modélisation complète* », précise Alain Reineix.

1. Unité CNRS/ENS Paris/Inria. 2. Unité CNRS/Univ. Grenoble-Alpes/Grenoble INP. 3. Un traitement massivement parallèle consiste à utiliser un grand nombre de processeurs pour effectuer un ensemble de calculs simultanément. 4. Unité CNRS/Université de Poitiers/Université de Limoges.

La quête du moteur idéal

Les moteurs à réaction des avions de ligne consomment moins, font moins de bruit et ont une fiabilité accrue. Gros plan sur les améliorations récentes réalisées grâce au lien étroit entre laboratoires et industriels, et sur les prochains défis à relever.

Pour fendre les cieux, il faut savoir s'appuyer sur l'air. Et sans une propulsion efficace, la portance n'est rien. Symbole de ce couplage essentiel, les avions civils affichent sous leurs ailes d'imposants moteurs à réaction. Ceux-ci sont le théâtre de phénomènes complexes que les scientifiques veulent toujours plus maîtriser et optimiser. Dans ce domaine, le CNRS a tissé un partenariat efficace avec l'industrie. Tant et si bien que le groupe Safran, qui a connu le plus grand succès commercial de l'aviation civile avec son célèbre CFM56, enregistrait fin juin plus de 14 000 commandes pour son nouveau moteur LEAP, aboutissement de recherches de longue haleine.

« Le LEAP a été conçu comme le CFM56, en partenariat avec General Electric. Il est le fruit d'avancées technologiques portant sur chaque élément du moteur », indique Sébastien Candel, du Laboratoire d'énergétique moléculaire et macroscopique, combustion¹ (EM2C), à Châtenay-Malabry.

Petite, mais complexe

Parmi ces éléments, la chambre de combustion joue un rôle majeur : « C'est elle qui fournit à bord de l'appareil toute l'énergie nécessaire au vol, poursuit le chercheur. L'énergie issue de la combustion du kérosène et de l'air est transformée en énergie mécanique pour la propulsion et en énergie électrique pour les systèmes de commande de vol et pour ceux qui assurent le confort des passagers. »

Pourtant, la chambre de combustion ne représente qu'une toute petite partie des imposants turboréacteurs. Elle prend la forme d'un foyer annulaire proche de la taille d'une roue de voiture. Rien à voir, toutefois, avec la chambre de combustion des moteurs à explosion qui équipent nos automobiles : « À l'inverse d'un moteur à explosion où la combustion se fait de façon cyclique avec un allumage à chaque cycle, celle d'un turboréacteur doit être assurée en permanence. C'est un problème complexe car la flamme doit être stabilisée dans un écoulement à grande vitesse », explique Sébastien Candel. Pour ce faire, les chercheurs et les industriels n'ont eu de cesse de rendre la solution de plus en plus élégante et performante : « Pour nous, l'objectif est double : assurer à la fois la stabilité de la flamme et une combustion la plus complète possible avec les émissions de polluants les plus réduites », souligne-t-il.

À cette fin, la chambre de combustion possède une géométrie particulière : « D'une part, la multi-perforation des parois permet d'assurer la tenue de la chambre malgré les très hautes températures qui existent dans la zone de combustion. D'autre part, la combustion est induite par un grand nombre d'injecteurs aérodynamiques qui alimentent la chambre en kérosène et en air. Au moyen de plusieurs vrilles, le flux d'air entraîne avec lui le nuage de gouttelettes de kérosène. Cette rotation de l'écoulement induit une zone dans laquelle les gaz chauds de la combustion sont mis en recirculation afin

d'initier en continu la combustion du mélange frais issu de l'injecteur », précise le physicien. L'énergie thermique ainsi produite est alors transformée en énergie mécanique au moyen d'une turbine couplée au compresseur et à la soufflante². Au final, c'est l'éjection des gaz en sortie de réacteur via la tuyère qui induit la force de propulsion : leur expulsion vers l'arrière se traduit alors en une poussée vers l'avant pour l'avion.

Le principe de la « propulsion à réaction » est en fait connu depuis... Issac Newton (1643-1727) et sa troisième loi dite d'action-réaction. Celle-ci permet de montrer que la force propulsive est directement reliée au débit-masse du moteur et à la différence entre la vitesse des gaz éjectés et la vitesse de l'air en amont du moteur (la vitesse de l'avion). C'est aussi un Anglais, sir Frank Whittle, qui, au début des années 1930, ayant compris qu'il fallait comprimer le flux d'air pour tirer un travail à partir du cycle moteur et obtenir la force de propulsion, avait donné corps au premier turboréacteur. « Depuis les premiers brevets de Franck Whittle, la technologie a beaucoup évolué, souligne Sébastien Candel, et une distance énorme sépare son travail des architectures actuelles. »

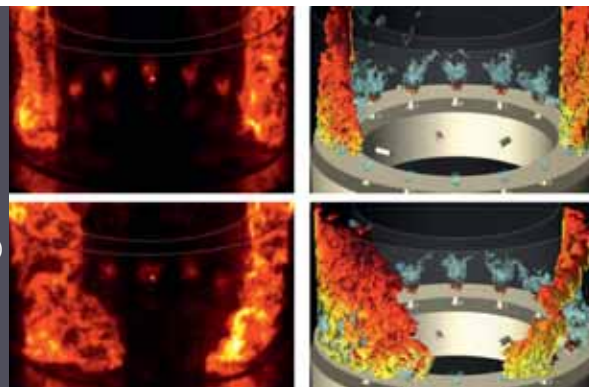
“La consommation de kérosène des moteurs a été réduite d'un facteur deux.”

Combustion in vitro et in silico

Cette complexité grandissante des turboréacteurs a été rendue possible par une maîtrise accrue de l'aérodynamique interne, de la mécanique, des matériaux et, bien sûr, de la combustion. Et cet « art du feu », Sébastien Candel et ses collègues d'EM2C en ont acquis une connaissance théorique et pratique qui les place au meilleur niveau international. En premier lieu, grâce à un banc expérimental unique en son genre : un foyer annulaire aux parois en quartz, dénommé Micca, mimant la petite chambre de combustion d'un réacteur. Sa particularité : là où les matériaux employés pour les réacteurs d'avion sont opaques, le quartz laisse passer la lumière : « On peut ainsi observer la dynamique de combustion, analyser au moyen d'essais l'allumage circulaire du foyer à partir de l'étincelle d'une bougie, déterminer les mécanismes qui conduisent au couplage entre la combustion et les modes acoustiques du système, explique Sébastien Candel. Le système est idéalisé mais il nous permet de réaliser des avancées importantes, notamment sur la question des instabilités de combustion. »

Unique en son genre, le foyer Micca (à gauche) a des parois en quartz permettant d'observer la combustion. On voit ici que la simulation (à droite) des deux mêmes phases d'allumage concorde avec la combustion réelle.

© EM2C



Ces instabilités sont les ennemies des chercheurs et des industriels : « Les améliorations récentes des turboréacteurs se sont faites au prix d'une combustion plus sensible aux phénomènes d'instabilité, qu'il faut donc savoir maîtriser », précise Sébastien Candel. La force de son laboratoire est de pouvoir coupler l'expérimentation, la théorie et la simulation numérique au moyen du calcul à haute performance. Et les progrès dans ce domaine sont « fantastiques » : « On est à présent capable de simuler avec une bonne précision ce qui se passe à l'intérieur de la chambre de combustion au moment de l'allumage du foyer. Et la concordance entre les simulations et les observations est même surprenante », se réjouit-il.

Ces avancées numériques profitent aussi aux ingénieurs. Le logiciel de simulation aux grandes échelles, AVBP, développé par l'équipe de Thierry Poinot, du Cerfacs³ de l'IMFT⁴ à Toulouse, et les modèles élaborés dans les laboratoires du CNRS sont directement partagés avec les ingénieurs de Safran. Cette boîte à outils est un atout pour relever les défis à venir : « Grâce à des avancées scientifiques et technologiques, l'industrie a réussi à réduire d'un facteur deux la consommation de kérosène des moteurs. Il faut compter aujourd'hui un peu plus de quatre litres par passager transporté et par 100 kilomètres, soit un ordre de grandeur comparable à celui d'une automobile. Or, le passager vole à 900 kilomètres/heure. Mais on peut encore progresser, notamment pour réduire les émissions de dioxyde d'azote et de particules de suie », estime Sébastien Candel.

Plus gros mais moins bruyant

Même si Safran et Airbus ont annoncé en 2011 le lancement de recherches sur des moteurs hybrides alliant combustion et énergie électrique, il demeure pour le moment difficile de changer de paradigme : « L'énergie obtenue ...

1. Unité CNRS/CentraleSupélec. 2. Elle est le seul élément visible d'un moteur pour les passagers d'un vol commercial. Positionnées à l'avant du réacteur, ses larges pales en rotation aspirent l'air ambiant et l'envoient dans le réacteur pour générer la poussée. 3. Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique. 4. Institut de mécanique des fluides de Toulouse (CNRS/Univ. Paul-Sabatier/INP Toulouse).

... par kilogramme de kérosène est environ 40 fois plus élevée que celle qui est stockée dans un kilogramme des meilleures batteries et, même en tenant compte du rendement thermodynamique, il reste un facteur 15 entre les deux », prévient Sébastien Candel. Pour remplacer les 240 tonnes de kérosène d'un A380, il faudrait ainsi 3 600 tonnes de batteries. Et l'amélioration du rapport puissance-poids est l'objectif premier des motoristes et des aviateurs. Les imposants turboréacteurs double flux, qui sont devenus la norme dans l'aviation civile, sont de ce point de vue remarquables et semblent donc avoir encore de beaux jours devant eux. D'autant que l'utilisation d'un double flux d'air en entrée, couplé à l'augmentation du diamètre de la soufflante, a permis d'améliorer le rendement, de diminuer la consommation et d'atténuer le bruit d'éjection en sortie de réacteur.

À chaque décollage, les habitants situés à proximité des aéroports ont ainsi pu constater une réduction « de plusieurs dizaines de décibels au cours des trente dernières années », indique Daniel Juvé, directeur du Centre lyonnais d'acoustique, laboratoire d'excellence. Mais le passage aux réacteurs double flux n'est pas la seule explication. Les travaux de Daniel Juvé et de ses collègues du Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique⁵ (LMFA) y ont également contribué. « La question clé désormais est de savoir si l'on pourra encore baisser significativement ce bruit ou si l'on approche d'un plafond de verre pour ces types de motorisation », précise-t-il. Une réponse d'autant plus attendue que la réglementation internationale sur les nuisances sonores va continuer à se durcir. De nouvelles architectures d'avion, avec des moteurs implantés au-dessus des ailes par exemple, ou de façon plus prospective, de type « aile volante », sont d'ailleurs étudiées à la fois par les chercheurs et les industriels.

Une cartographie des bruits

Pour mieux cerner les sources de bruit des réacteurs, le LMFA s'est équipé d'un impressionnant banc d'essai pour l'étude des performances aérodynamiques et du bruit des soufflantes de réacteurs (Équipex Phare). Une maquette à l'échelle 1/3 d'une soufflante (la partie amont du moteur, qui est la plus bruyante) est ainsi installée dans une chambre sourde. Cette dernière permet de mesurer les sons émis sans que ceux-ci ne soient réfléchis par les parois et sans que le bruit extérieur ne vienne troubler la mesure : « En son sein, des réseaux de plusieurs centaines de microphones permettent alors de localiser les différentes sources du bruit », décrit Daniel Juvé. La chaire industrielle ADOPSYS, cofinancée par l'Agence nationale de la recherche et le groupe Safran, a permis de doter le laboratoire de nouveaux équipements encore plus performants, couplant mesures

Banc d'essai pour l'étude des performances aérodynamiques, acoustiques et vibratoires d'une soufflante de turboréacteur, dans le cadre de l'Équipex Phare.



© A. CHEZIEREAL-TDS-SAFRAN

Pose d'une structure en nid-d'abeilles destinée à piéger les émissions sonores, sur le site de Safran au Havre, spécialisé dans les nacelles pour moteurs d'avion.



© D. JUVÉ

Simulation numérique directe du bruit émis par un jet supersonique heurtant un obstacle. Elle permet de voir les variations de densité dans l'écoulement et sur la paroi ainsi que la pression acoustique rayonnée (laboratoire LMFA).



multi-microphoniques et caractérisation des écoulements par des méthodes optiques.

Car pour cartographier au mieux les sources de nuisance, les chercheurs doivent associer l'acoustique à la mécanique des fluides dans leurs mesures et leurs calculs. « Les nacelles des turboréacteurs deviennent de plus en plus grosses et l'interaction entre les jets propulsifs et la voilure augmente, multipliant les sources de bruit », explique Daniel Juvé. « Toutefois, ajoute-t-il, grâce aux essais en chambre sourde et aux

simulations numériques intensives, nous sommes parvenus à mieux comprendre les phénomènes aéro-acoustiques à l'œuvre et à proposer des solutions pour la réduction des bruits. »

Des « pièges sonores »

Ces solutions, le Laboratoire acoustique de l'université du Maine⁶ les connaît mieux que personne. « *L'idée est simple : une fois les sources identifiées, on cherche à les neutraliser* », indique Yves Auregan. La solution phare consiste à placer autant de « pièges sonores » possibles à proximité des sources de bruit du moteur. En premier lieu, un jeu de parois perforées d'une myriade de petits trous au-dessus d'une structure en nid-d'abeilles. Chaque petit trou joue alors le rôle d'un résonateur de

Helmholtz⁷, piégeant les fréquences sonores ciblées. Mais cette approche atteint désormais ses limites : « *L'évolution vers des moteurs de diamètre de plus en plus grand s'accompagne d'une augmentation de bruits plus bas en fréquence, plus difficiles à atténuer. En parallèle, les contraintes imposées sur la taille des nacelles ne permettent plus d'augmenter l'épaisseur des structures en nid-d'abeilles* », souligne le chercheur.

Face à cette impasse, le laboratoire d'Yves Auregan s'est associé au groupe Safran au sein d'une nouvelle chaire industrielle, MACIA, dédiée aux matériaux acoustiques innovants : « *Notre objectif est d'optimiser au maximum l'existant tout en explorant des solutions de rupture à l'aide de nouveaux matériaux moins encombrants et plus absorbants, comme les métamatériaux⁸. Nous étudions aussi la possibilité d'utiliser des matériaux qui transforment le son en électricité pour mieux dissiper le bruit* », détaille-t-il.

La glace, ennemie des moteurs

Si nos oreilles sont sensibles au bruit, les moteurs, eux, n'aiment pas le givre. En s'accumulant à l'entrée du réacteur, la glace peut se révéler fatale si des morceaux se détachent et sont aspirés par le moteur. Au risque, alors, d'endommager sa structure interne, voire d'en provoquer l'arrêt. Ce phénomène de « givrage moteur » est désormais bien compris, mais les outils d'évaluation de la résistance au givrage des appareils demeurent rudimentaires.

Basé au Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie⁹ (ICube) de Strasbourg, Yannick Hoarau a mis à profit une collaboration avec l'université de Montréal pour apporter une solution innovante à la modélisation des phénomènes de givrage. « *Les modèles numériques des industriels ne prennent pas en compte facilement la modification des trajectoires de l'air induites par les couches de glace. Or, les points d'impact des gouttes d'eau qui viennent geler à la paroi dépendent de ces flux d'air qui les transportent* », explique-t-il. Dans un article remarqué¹⁰, Yannick Hoarau a montré qu'il était possible d'utiliser des approches numériques intégrant naturellement le changement de forme des parois de l'avion à mesure que la glace s'y accumule.

Ces récentes contributions sont autant d'innovations transversales qui seront, à n'en pas douter, au cœur des moteurs de demain. **II J.-B. V.**



© P. STROPPAS/SAFRAN



Retrouvez ces articles et découvrez d'autres textes et vidéos dans notre dossier spécial Avion sur lejournal.cnrs.fr

5. Unité CNRS/Univ. Jean-Monnet/Univ. Claude-Bernard/École centrale de Lyon/INSA Lyon. 6. Unité CNRS/Univ. du Maine/ÉSÉO. 7. Si vous avez déjà soufflé dans le haut d'une bouteille vide, vous connaissez le principe de ce dispositif créé dans les années 1850 par le scientifique allemand Hermann von Helmholtz (1821-1894). Il fut le premier à formaliser ce phénomène de résonance de l'air dans une cavité. Un principe aujourd'hui utilisé aussi bien dans les voitures ou les avions que dans les instruments de musique. 8. En acoustique, il s'agit de matériaux artificiels dont les propriétés physiques facilitent le contrôle de certaines fréquences sonores. 9. Unité CNRS/Univ. de Strasbourg/INSA Strasbourg/ÉNGÉE Strasbourg/Inria/Télécom ParisTech. 10. « A Single Step Ice Accretion Model Using Level-Set Method », D. Pena, Y. Hoarau, É. Laurendeau, *Journal of Fluids and Structures*, 2016, vol. 65 : 278-294.



1

Changements de climat sur le Mont-Blanc

TERRE

Glaciologie. Le réchauffement climatique entraîne une réduction spectaculaire des glaciers du Mont-Blanc. Ces derniers ont-ils déjà connu, depuis la dernière glaciation, des reculs encore plus importants ? Pour le savoir, les scientifiques du projet ANR « VIP Mont-Blanc¹ » sont allés échantillonner, à l'automne 2016, les roches de ce massif.

TEXTE AUDREY DIGUET

PHOTOS JEAN-FRANÇOIS BUONCRISTIANI/
BIOGÉOSCIENCES/CNRS PHOTOTHÈQUE

¹. Coordonné par Jean-Louis Mugnier, de l'Institut des sciences de la Terre de Chambéry.

1. Depuis 10 000 ans, la Terre a connu des périodes de réchauffement climatique d'origine naturelle, avec un apogée durant « l'optimum climatique holocène » (il y a 5 000 à 9 000 ans), où tous les glaciers du Mont-Blanc ont fortement diminué.

2. Les chercheurs se rendent sur place pour tenter d'évaluer ces fontes. L'hélicoptère leur permet d'emporter le matériel nécessaire et d'accéder aux différents secteurs où ils ont prévu de procéder à des prélèvements de roches.



3. Lorsqu'une roche n'est plus recouverte de glace, tel ici le Jardin de Talèfre, un îlot rocheux de 3 km², elle est bombardée de particules cosmiques, produisant des isotopes rares comme le béryllium 10.

3





4



5

4. et 5. Les particules cosmiques n'affectent que les premiers mètres de roche, sous la surface. Les prélèvements permettront de mesurer l'accumulation d'atomes de béryllium 10 dans les roches et de déterminer ainsi la durée totale d'exposition aux rayons cosmiques, donc celle du retrait du glacier.

Pour cela, le scientifique découpe des cubes de roche de 10 cm^3 qui seront analysés dans les laboratoires du CEREGE, à Aix-en-Provence, grâce à la méthode dite de datation d'exposition par les isotopes cosmogéniques.



6



 Visionner l'intégralité du diaporama
sur lejournal.cnrs.fr



6. Des mesures effectuées grâce à un niveau de terrain permettront de reconstituer le relief environnant afin d'évaluer son incidence sur l'exposition des roches aux rayons cosmiques et de corriger les analyses.



7. Au total, 76 échantillons sont prélevés. D'après les premières analyses, les glaciers du Mont-Blanc auraient connu, dans les 10 000 dernières années, des retraits plus importants que le niveau actuel. Reste aujourd'hui à définir leur ampleur et leur chronologie.





Peut-on se passer des modèles animaux?

VIVANT



Contribution majeure aux progrès de la biologie et de la médecine, l'expérimentation animale reste la cible de critiques, malgré un encadrement de plus en plus strict. Espèces concernées, protocoles mis en place, méthodes alternatives... *CNRS Le journal* fait le point sur cet enjeu capital de la recherche contemporaine.

PAR YAROSLAV PIGENET

Dans son *Traité de la maladie sacrée*, Hippocrate écrivait à propos de l'épilepsie : « On peut reconnaître la vérité de ceci sur les brebis, qui sont sujettes à être atteintes de cette maladie, et surtout sur les chèvres chez qui elle est très fréquente. Si on ouvre la tête d'une chèvre, on trouve le cerveau humide, plein d'eau et exhalant une mauvaise odeur. D'où il ressort évidemment que ce n'est pas un dieu qui afflige ici le corps, mais bien la maladie. Il en est de même pour l'homme¹. » Celui que l'on considère comme le père de la médecine était ainsi le premier à décrire et utiliser un modèle animal pour observer et tenter d'expliquer² les causes physiques d'une maladie humaine qu'on

pensait d'origine surnaturelle. Il faudra attendre la naissance du clone Dolly pour que le modèle brebis retrouve brièvement la faveur des chercheurs, mais 2 500 ans plus tard, cette méthode d'investigation et d'observation des organismes vivants demeure l'un des piliers de la recherche biologique et médicale contemporaine : les modèles animaux ont été à l'origine de plus de 70 prix Nobel, et de la plupart des avancées biomédicales des 150 dernières années. Cela va du modèle du lapin qui a permis à Pasteur d'inventer le vaccin contre la rage, à celui de la mouche drosophile grâce auquel Jules Hoffmann, prix Nobel 2011, a dévoilé les mécanismes de l'immunité innée, en passant par le modèle du rat avec lequel John O'Keefe, May-Britt Moser et Edvard Moser, nobélisés en 2014, ont compris comment le cerveau traite l'information spatiale.

L'instauration d'un cadre

Toutefois, s'ils ont connu un essor extraordinaire depuis la Seconde Guerre mondiale, ces modèles ont également montré certaines limites, et de plus en plus de voix se sont élevées pour condamner l'exploitation irraisonnée des animaux et réclamer une meilleure prise en compte de leur souffrance. Bien avant que cette demande ne prenne de l'ampleur, la communauté scientifique a tenté d'y répondre en établissant dès la fin des années 1950 une règle visant à réduire au strict minimum le recours aux animaux. C'est d'ailleurs dans ce cadre philosophique et sous la pression grandissante du public que les législateurs ont élaboré depuis une trentaine d'années de nouvelles lois, directives et recommandations éthiques encadrant de plus en plus sévèrement le recours à l'animal dans la recherche, fixant même comme objectif ultime le remplacement de

toute expérimentation sur les vertébrés par des méthodes substitutives. Un but que la plupart des chercheurs n'estiment toutefois pas réaliste, même à long terme, si ce n'est au prix d'un ralentissement sensible des progrès de la recherche biomédicale et d'une diminution drastique de la sécurité sanitaire.

Avec les études sur les tissus, les cellules et les molécules biologiques, l'utilisation des modèles animaux fait partie des principaux outils à la disposition du biologiste pour interroger et comprendre le vivant. Elle seule permet d'étudier les réponses intégrées d'un organisme ainsi que les interactions entre cellules, tissus et organes qui le composent. Elle seule permet aussi, sans recourir à l'expérimentation sur l'homme, d'analyser les

causes des maladies, d'envisager des traitements et d'en tester l'efficacité. Au fondement de toute expérimentation animale, il y a un organisme qui va servir de modèle à un autre, plus sensible, moins accessible ou plus difficilement manipulable.

« *Du point de vue scientifique, on choisit un modèle animal selon trois critères principaux : d'abord la similitude du modèle avec les caractéristiques du phénomène étudié chez l'espèce cible – souvent l'homme –, ensuite, en recherche biomédicale, le degré de similitude entre le mécanisme biologique de la maladie humaine étudiée et celui du modèle lui-même, enfin en recherche préclinique, la similitude des réponses à un traitement pharmacologique, explique le généticien Yann Héroult³. Un modèle animal est aussi la résultante d'un ensemble de données génétiques, de l'interaction de son génome avec l'environnement dans lequel il est étudié et des approches méthodologiques mises en œuvre pour l'analyser.* »

La spécialisation des modèles

À partir des années 1950, l'expansion de la recherche biomédicale va en effet aller de pair avec la multiplication et la spécialisation des modèles animaux, débouchant sur des avancées majeures dans tous les domaines de la biologie, tant fondamentaux qu'appliqués. Au modèle brebis d'Hippocrate vont ainsi s'ajouter la souris, le lapin, le rat, le poulet, le poisson zèbre, le macaque, etc., ainsi que les superstars des modèles invertébrés : la mouche drosophile et le ver nématode. La place des modèles animaux dans les sciences biologiques et médicales ne va cesser de s'accroître tout au long du ^{xx}e siècle, le nombre d'articles scientifiques y faisant référence atteignant un record au ...



Portrait d'Hippocrate, gravure extraite d'un ouvrage du chirurgien français Ambroise Paré (1561).

1. *Le Serment ; la loi ; de l'art ; du médecin...*, Hippocrate, traduction Charles Daremberg, Paris, Lefèvre, 1843, 566 p., p. 482. 2. Sa méthode expérimentale a fait florès mais la théorie des humeurs qu'il en tira s'est avérée complètement fautive. 3. Directeur scientifique de l'Institut clinique de la souris, à l'Institut de génétique et de biologie moléculaire et cellulaire (CNRS/Inserm/Université de Strasbourg).

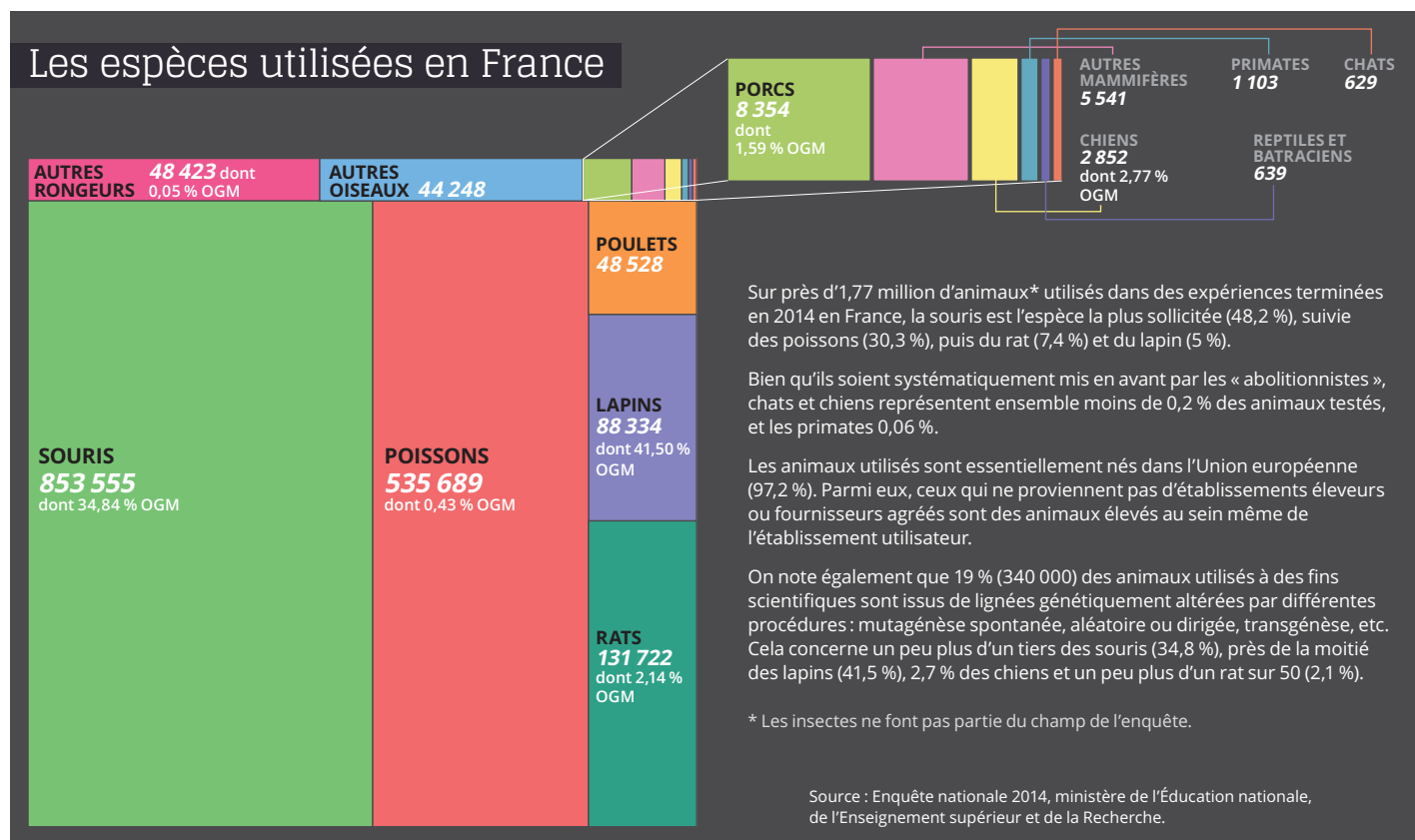
... cours des années 1990. D'autant qu'en plus de s'être diversifiés et spécialisés, ces modèles ont connu récemment une évolution majeure avec l'usage d'animaux génétiquement édités, grâce auxquels des variations génétiques fines permettent de modéliser encore plus précisément des mécanismes physiopathologiques de plus en plus nombreux. On peut citer l'exemple de ces souris génétiquement modifiées de manière à ce qu'elles puissent être infectées par la bactérie *listeria*, fournissant un modèle pour étudier la listériose humaine. Cette spécialisation des modèles a poussé les chercheurs à créer des banques d'animaux modèles. « Principalement constituées de gamètes ou d'œufs congelés, ces banques contiennent des modèles

animaux de référence, possédant des caractéristiques phénotypiques et génétiques bien définies et déjà décrites dans la littérature scientifique, précise Yann Hérault, qui a été directeur du laboratoire Transgènèse et archivage d'animaux modèles⁴, à Orléans. Elles permettent, en les conservant dans des bases de données informatiques interrogeables à distance, de garantir la préservation des caractéristiques génétiques et des informations zootechniques sur ces modèles, ainsi que de les rendre largement accessibles à la communauté scientifique. »

Entre épistémologie et éthique

Reste qu'en dépit de sa contribution incomparable aux progrès de la biologie et de la médecine, le recours aux modèles animaux est désormais

la cible de critiques de plus en plus virulentes, tant sur le plan épistémologique qu'éthique. « La biologie moderne s'est construite sur le constat de l'unité du vivant. Le fait que nos gènes possèdent 60 % d'homologie avec ceux de la mouche drosophile et 90 % avec ceux de la souris nous a permis, grâce à l'expérimentation animale, d'élucider plusieurs mécanismes physiologiques fondamentaux et certaines pathologies, mais il reste délicat de postuler que ce qui se passe dans le cerveau d'un poisson ou d'un rongeur modélise parfaitement tout ce qui se passe dans celui d'un humain ; ainsi le recours à des primates modèles est parfois indispensable pour étudier des processus neurobiologiques ou comportementaux complexes, explique le chercheur Jean-Stéphane



4. CNRS. 5. Chercheur à l'Institut des neurosciences Paris-Saclay (CNRS/Univ. Paris-Sud/CEA/Inra/Inserm/Univ. Jean-Monnet). 6. Organe sur puce électronique.



© H. RAGUET/ICNS PHOTOTHÈQUE

Les souris transgéniques de l'Institut clinique de la souris (ICS) constituent des modèles de référence pour l'étude de certaines pathologies humaines.



© P. LATRON/INSERM

Gamètes et œufs de souris sont conservés au département animalerie de l'ICS, à Illkirch-Graffenstaden, au sud de Strasbourg.



Joly⁵. *Devant le nombre de plus en plus grand d'organismes modèles à sa disposition, le biologiste se doit aujourd'hui de bien s'interroger sur la pertinence de celui ou ceux qu'il va choisir pour répondre à la question qu'il se pose.* » Toutefois, bien plus que les interrogations sur la validité et la valeur prédictive des modèles animaux, ce sont celles concernant le statut et le bien-être de l'animal qui, trouvant un écho croissant auprès de la population, ont fini par mettre l'expérimentation animale sur la sellette.

Des méthodes substitutives

La communauté scientifique n'a d'ailleurs pas attendu que le grand public et le législateur s'y intéressent pour réfléchir aux problèmes éthiques posés par l'expérimentation animale et à l'élaboration de méthodes alternatives. Ainsi, dans leur ouvrage *The Principles of Humane Experimental Technique*, William Russell et Rex Burch ont défini dès 1959 la règle dite « des 3 R ». Celle-ci consiste à développer et à favoriser les méthodes d'investigation pouvant se substituer à l'utilisation de l'animal (*Replacement*, substitution en

français), mais aussi celles capables de réduire le nombre d'animaux utilisés (*Reduction*) ou encore de diminuer la douleur ou le stress imposés à ces animaux (*Refinement*, raffinement ou amélioration en français). Cette philosophie des 3 R va de fait servir de cadre à la communauté scientifique, mais également inspirer la plupart des recommandations éthiques, règlements et lois élaborés depuis pour réguler le recours à l'expérimentation animale.

Dans les 3 R, le premier R désigne donc les méthodes qui évitent l'utilisation d'une espèce animale donnée dans un domaine où elle était jusqu'alors nécessaire. Cette substitution peut consister en un remplacement d'animaux vertébrés, dont la sensibilité est considérée comme élevée, par des animaux dont le potentiel de perception de la douleur

est réputé moins grand, comme certains invertébrés notamment.

« Pour les remplacements "complets" d'animaux, on peut par exemple envisager des méthodes d'investigation passant par un dispositif *in vitro* faisant interagir des éléments biologiques comme les tissus, les cellules, les organites, les biomolécules, ou par un dispositif *ex vivo* constitué d'un organe bio-artificiel (aussi appelé organoïde) obtenu à partir de cultures de cellules-souches, ou bien encore par des dispositifs *in silico* ou organ-on-a-chip⁶ réalisant des simulations bio-informatiques basées sur la modélisation mathématique des données biologiques », indique Jean-Stéphane Joly.

Les outils de ce type se multiplient, tel l'I-Wire, un système bioélectronique qui permet d'étudier les propriétés biomécaniques du cœur humain. Composé d'un fil de cellules tendu entre deux supports sensibles, l'appareil réagit à certains médicaments de la même façon que le font les cellules du cœur. Grâce à ce système, les chercheurs espèrent mieux connaître l'effet du stress sur le cœur sans recours aux êtres vivants. « Les progrès potentiels ...

“La biologie moderne s'est construite sur le constat de l'unité du vivant.”

... sont importants, mais je préfère le terme de méthodes complémentaires à celui d'alternatives car, même quand elles seront parfaitement au point – et elles ne le sont pas encore –, aucune ne sera en mesure de fournir les réponses qu'apporte aujourd'hui l'expérimentation sur des organismes entiers, tempère le chercheur. Ces méthodes pourront en revanche être combinées dans des approches intégratives combinant in vitro, ex vivo et in silico où l'animal ne sera utilisé qu'en dernier recours, lorsque les "alternatives" n'auront pas permis d'apporter les informations suffisantes. »

À ce titre, les méthodes de « substitution » s'apparentent de facto aux méthodes de réduction, le deuxième R, dont le but est de réduire le nombre d'animaux utilisés dans les études plutôt que de les éliminer complètement. « Ces méthodes de réduction sont déjà largement mises en œuvre dans nos laboratoires, rappelle le vétérinaire Ivan Balansard, délégué scientifique au bureau éthique et modèles animaux du CNRS⁷. Elles consistent en particulier à concevoir des plans d'expérience plus efficaces ainsi que des tests statistiques plus pertinents, qui vont permettre d'obtenir des résultats significatifs sur des effectifs réduits. Elles passent aussi par le partage de banques de données de résultats expérimentaux, la création de centres de ressources d'animaux modèles au génome ou au phénotype bien établi, ainsi que par la réutilisation d'animaux. » On notera que, par la quantité inédite d'informations qu'il permet de recueillir, l'essor récent des techniques « omiques⁸ » de mesure à haut débit du matériel génétique ou des protéines permet, lui aussi, un usage plus parcimonieux des animaux.

Diminuer stress et douleurs

Enfin, les méthodes relevant du troisième R (*Refinement*, soit amélioration) désignent les modifications apportées aux conditions d'élevage ainsi qu'aux procédures expérimentales et d'observation dans le but de réduire le stress et la douleur des animaux utilisés. Elles se traduisent par exemple par l'utilisation de techniques d'exploration non invasives telles que l'imagerie RMN, la télémetrie, le recours systématique à l'anesthésie, l'évaluation comportementale, notamment. Ce sont également

toutes les bonnes pratiques de zootechnie⁹ qui améliorent la vie des animaux tout en augmentant la validité des modèles.

En France, les deux premiers R sont inscrits dans le Code rural depuis 1987. Celui-ci a été complété en 2013 par six décrets transposant la directive européenne 2010/63/UE, qui établit la règle des 3 R comme cadre de toute recherche animale. Ainsi, cette réglementation protège tous les vertébrés (et les céphalopodes), dont elle régule les conditions d'élevage, et soumet toute utilisation



Ce babouin de Guinée participe à des tests d'intelligence via un dispositif dans lequel il peut entrer librement, à la station de primatologie du CNRS.



Souris en phase exploratoire dans un labyrinthe de Barnes. Ce test de mémoire spatiale permet d'étudier des pathologies liées à des déficits neurocognitifs.

7. Il est également directeur adjoint du Centre d'exploitation fonctionnelle et de formation en primatologie (CNRS/Aix-Marseille Université). 8. Techniques à haut débit permettant une analyse simultanée d'un grand nombre de variables, elles comprennent notamment la génomique, la transcriptomique (expression des gènes et leur régulation), la protéomique (analyse des protéines) et la métabolomique (étude des métabolites produits). 9. La zootechnie est l'ensemble des sciences et techniques mises en œuvre dans l'élevage, la sélection et la reproduction des animaux domestiques. 10. Unité CNRS/Aix-Marseille Université.

Objet des études en France et sévérité des procédures

Source : Enquête nationale 2014, ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Cette enquête concerne les expériences terminées en 2014.

Les quatre degrés de gravité des procédures expérimentales sont définis en fonction de l'intensité de la douleur, du stress ou du dommage que l'animal risque de subir :

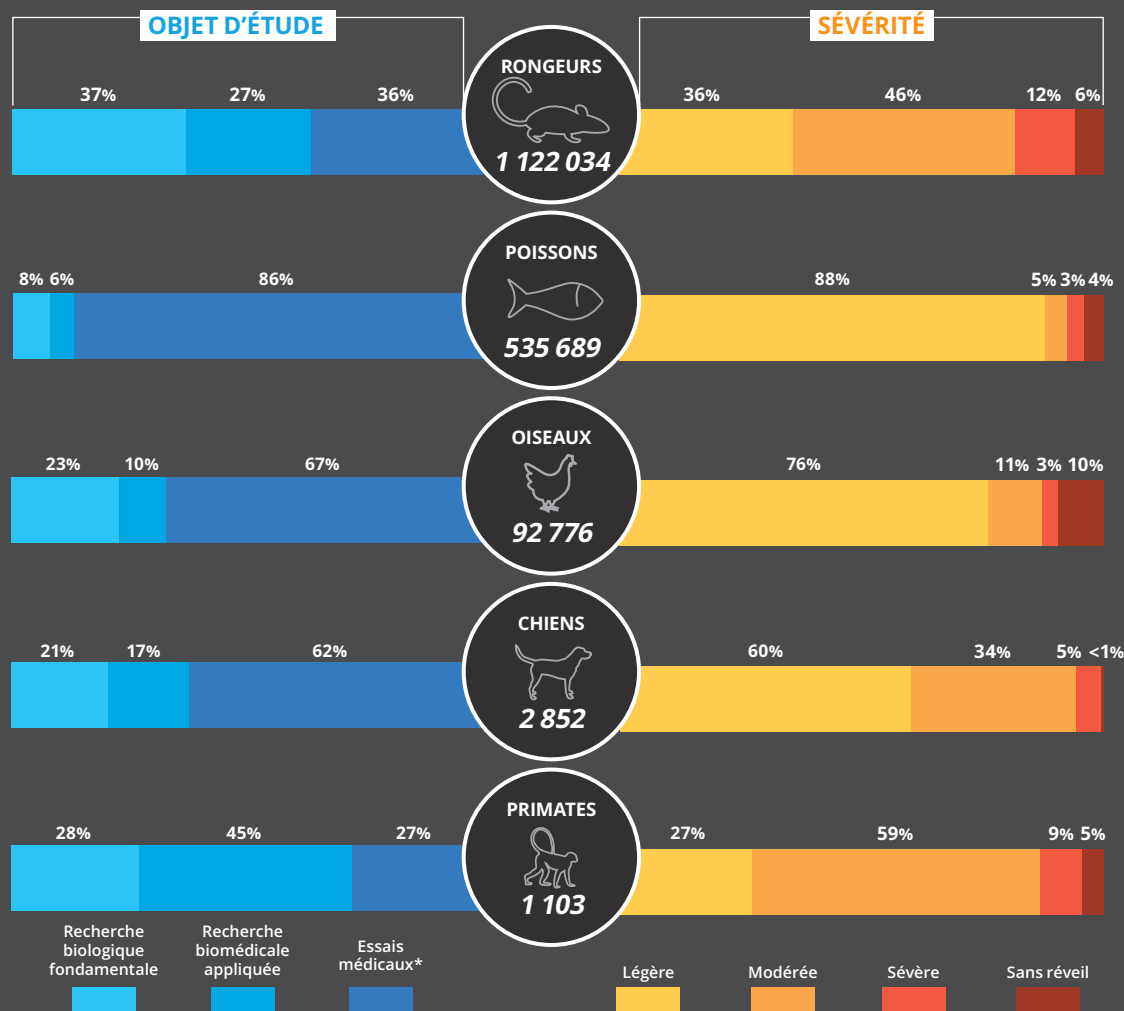
Légère : l'animal est susceptible d'éprouver une douleur ou une angoisse légère et de courte durée, sans incidence significative sur son état général.

Modérée : l'animal est susceptible d'éprouver une douleur ou une angoisse modérée ou de nature à avoir une incidence légère sur son état général.

Sévère : l'animal est susceptible d'éprouver une douleur ou une angoisse intense ou prolongée, de nature à avoir une incidence grave sur son état général.

Sans réveil : l'animal est anesthésié et ne reprend pas conscience à l'issue de la procédure.

* Test cliniques (médicaments) et de toxicité des denrées alimentaires et des produits manufacturés.



d'animaux à l'approbation d'un comité d'éthique agréé. Elle ne s'applique toutefois pas aux autres invertébrés comme les insectes. Elle restreint par ailleurs fortement le recours aux primates modèles et aux carnivores (chiens, chats et furets) et interdit l'utilisation des grands singes.

Des personnels bien formés

Ces nouvelles règles ont été parfaitement intégrées par la communauté scientifique. « En France, et plus généralement en Europe, la recherche animale repose sur des personnels bien formés dans des structures réglementées, s'efforçant d'utiliser les méthodes les moins invasives

possible, avec des protocoles standardisés, robustes, reproductibles et surtout respectueux du bien-être animal, de l'éthique et plaçant la règle des 3 R au centre de leur réflexion, témoigne Yann Hérault. De plus en plus de protocoles sont organisés en batterie, donnant un tableau clinique basé sur plus de 200 paramètres physiologiques et comportementaux pour chaque individu, en minimisant le mal-être, en affinant les méthodes et en réduisant le nombre d'animaux étudiés. »

Ces progrès et ces réglementations sont néanmoins jugés insuffisants par une partie du public. L'initiative citoyenne européenne

(ICE) « Stop Vivisection », prônant notamment l'interdiction de toute expérimentation sur l'animal au profit de méthodes substitutives, a été lancée en 2012 et signée par 1,17 million de citoyens de l'UE. Outre la guérilla que mènent certains activistes contre les centres de recherche animale, les scientifiques supportent assez mal le procès d'intention qui leur est fait quant à leur supposée indifférence au bien-être animal. « Nous ne sommes ni des sadiques, ni des robots, souligne Guillaume Masson, directeur du Centre d'exploitation fonctionnelle et de formation en primatologie¹⁰. Quand on travaille quasi quotidiennement ...

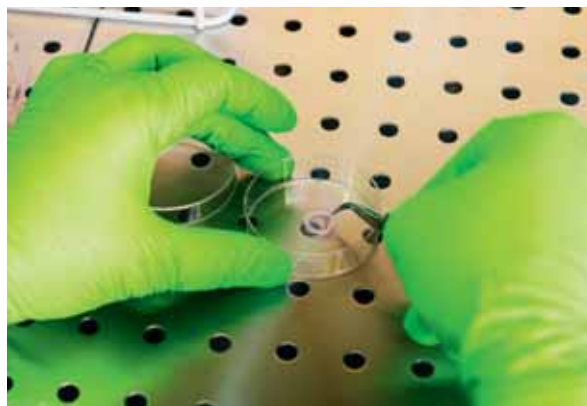
... avec un groupe de macaques pendant plusieurs mois voire années, on s'attache fortement à eux, on fait tout pour leur rendre la vie pas seulement supportable, mais agréable, comme le ferait un maître aimant pour son compagnon animal. » Et quoiqu'ils comprennent et acceptent la multiplication des contrôles encadrant l'expérimentation, certains chercheurs s'interrogent sur les priorités du législateur. « Nous respectons scrupuleusement toutes les règles européennes et françaises dans nos expériences sur les poissons zèbres, pointe la généticienne Laure Bally-Cuif, directrice adjointe du laboratoire Bases génétiques, moléculaires et cellulaires du développement¹¹. Je note cependant qu'en Europe, aujourd'hui, la qualité de vie d'un poisson zèbre en laboratoire fait l'objet d'infiniment plus d'attention que celle des milliers de poissons qui finissent asphyxiés ou mutilés dans les filets de la pêche industrielle. »

L'inquiétude des chercheurs

Dans la réponse qu'elle a publiée en 2015 à l'ICE « Stop Vivisection », la Commission européenne jugeait prématuré un bannissement immédiat, mais elle concédait « partager la conviction que l'expérimentation animale doit être progressivement supprimée en Europe ». Une position¹² qui inquiète beaucoup les chercheurs, car peu d'entre eux croient qu'on pourra un jour, même à long terme, se passer totalement des études sur les modèles animaux.

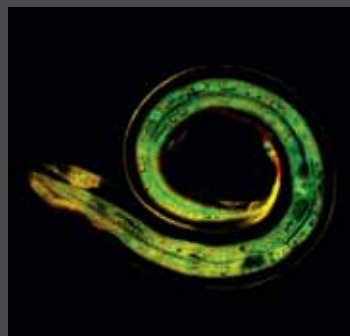
En réalité, l'interdiction complète des tests sur l'animal est déjà appliquée en Europe depuis 2009 dans le domaine des produits cosmétiques, et cela pourrait un jour poser problème : « En cosmétologie, les tests peuvent être pratiqués sur des cultures isolées de peau humaine – la technique est assez bien maîtrisée –, mais il faut savoir que cette peau

bio-artificielle ne comporte ni poils, ni terminaisons nerveuses, ni vaisseaux sanguins, bref rien de tout ce qui fait de la peau un organe et pas un simple tissu, insiste Jean-Stéphane Joly. Ainsi, les tests pratiqués vont pouvoir nous dire si tel ou tel produit est irritant ou localement cancérogène, mais nous ne saurons pas si d'éventuelles nanoparticules entrant dans sa composition peuvent gagner la circulation sanguine et interférer avec notre système immunitaire. » Dans le développement de nouveaux médicaments, renoncer à l'expérimentation sur un ou plusieurs modèles animaux revient à reporter le risque sur l'être humain. Le scandale de la thalidomide, cet



Substitut de peau humaine créé *in vitro* à partir de cellules extraites lors d'une biopsie. Cette technique permet de limiter les tests *in vivo* sur les animaux.

Expérience sur un ver nématode. C'est grâce à ce modèle animal que fut découvert le mécanisme de mort cellulaire programmée, à l'origine du prix Nobel de médecine, en 2002.



anti-nauséeux prescrit dans les années 1950 aux femmes enceintes et qui a entraîné la naissance de dizaines de milliers d'enfants malformés, illustre dramatiquement ce risque. La molécule avait été testée sur des rates gravides, sans qu'aucun effet tératogène ne soit détecté. Or, la thalidomide n'est pas métabolisée de la même manière par les rongeurs et par les primates. « Il faut se méfier de la facilité du modèle animal unique et généraliste, prévient Ivan Balansard. On viole aussi l'éthique en utilisant un modèle inadéquat ! »

Depuis le désastre de la thalidomide, le recours à une espèce « non-rongeur » est devenu obligatoire dans les essais précliniques des médicaments. « La difficulté est la même pour la recherche fondamentale, où se restreindre à l'étude des molécules, des cellules et des tissus risque de freiner – si ce n'est de stopper – tout progrès dans notre compréhension de la mécanique et des interactions complexes entre constituants qui caractérisent tout organisme vivant, poursuit le chercheur. Même si de nouvelles approches et des méthodes d'exploration révolutionnaires émergent, l'utilisation de modèles animaux demeurera encore longtemps indispensable au progrès scientifique et médical. La recherche biologique en a besoin car c'est tout simplement le seul moyen dont nous disposons pour observer et comprendre le fonctionnement de l'organisme et des grandes maladies systémiques comme le cancer. Bien entendu, cette recherche doit se faire dans le plus grand respect des règles d'éthique et de bien-être animal. » II

11. Unité CNRS/Institut Pasteur. 12. Faisant l'objet d'une plainte de « Stop Vivisection » auprès du Médiateur européen, cette réponse de la Commission a été jugée bien fondée dans une décision du 18 avril 2017.



Lire notre dossier paru dans
CNRS Le journal n° 277 (été 2014)
ou sur lejournale.cnrs.fr

Voir aussi le site du Gircor (groupe
interprofessionnel de réflexion et de
communication sur la recherche)
» www.recherche-animale.org

EN ACTION



*Étudier le ciel depuis une montgolfière,
percer les mystères du sommeil,
partir au Mexique puis questionner
l'esclavage et l'inceste.*

Les nouveaux matériaux inspirés du graphène

MATIÈRE

Électronique. Premier matériau de l'épaisseur d'un seul atome, le graphène a ouvert la voie à de nombreux autres matériaux ultrafins. Ces derniers pourraient trouver de multiples applications en électronique et en optique.

PAR JULIEN BOURDET

SEMI-CONDUCTEUR

Se dit d'un matériau qui passe de l'état isolant à l'état conducteur dès qu'on lui apporte une certaine quantité d'énergie (chaleur, lumière ou champ électrique).

Ultraflexible, ultraléger, remarquablement transparent, plus résistant que l'acier et plus conducteur d'électricité que le cuivre... La liste des qualités du graphène, feuillet constitué d'une unique couche d'atomes de carbone disposés en nid-d'abeilles, est impressionnante. À peine ce matériau dit bidimensionnel (ou 2D) était-il isolé en 2004 qu'on lui promettait une foule d'applications. Il devait notamment révolutionner l'électronique. Or, dans ce domaine, le graphène n'a pour l'instant pas tenu ses promesses. Loin d'être découragés, les chercheurs tentent aujourd'hui de développer de nouveaux matériaux cousins du graphène, car bidimensionnels comme lui, qui pourraient ouvrir la voie à l'électronique de demain.

Bien qu'il soit imbattable pour transporter rapidement les électrons, le graphène souffre d'un handicap : contrairement aux matériaux dont sont faits les transistors de nos ordinateurs, il n'est pas **semi-conducteur**. C'est cette impasse qui a poussé les chercheurs à partir en quête de nouveaux matériaux aussi fins que le

graphène mais qui soient, en outre, semi-conducteurs. L'enjeu est de taille : avec ces matériaux 2D, on pourrait affiner jusqu'aux dimensions de l'atome (ou presque) les canaux par lesquels, dans les transistors en particulier, transitent les électrons. Et donc repousser d'autant les limites de la miniaturisation.

Le silicène, base des futurs transistors ?

Dans cette course, un premier matériau a sorti son épingle du jeu : le silicène. Comme son nom l'indique, celui-ci est au silicium ce que le graphène est au carbone : c'est un feuillet d'une seule épaisseur d'atomes de silicium, organisés eux aussi en nid-d'abeilles. « *Mais à la différence du graphène, le réseau cristallin du silicène est légèrement ondulé. C'est cette caractéristique qui permet de le rendre semi-conducteur* », explique Guy Le Lay, du laboratoire Physique des interactions ioniques et moléculaires¹, à Marseille. S'ajoute à cela que dans le silicène, tout comme pour le graphène, les électrons sont extrêmement mobiles. Autre avantage : le silicène pourrait s'intégrer naturellement à l'industrie électronique, qui repose essentiellement sur le silicium (dont le silicène est un dérivé).

Reste que le silicène n'est pas dépourvu de défauts. À commencer par sa fabrication, qui est bien plus compliquée que celle du graphène, lequel s'obtient grâce au graphite, un matériau naturel. La synthèse du silicène se fait, elle, *via* un procédé appelé épitaxie : on bombarde avec un faisceau d'électrons du silicium pur ; ses atomes

1. Unité CNRS/Aix-Marseille Université. 2. Unité CNRS/Aix-Marseille Université/Université de Toulon/ISEN de Toulon/Polytech³ Marseille. 3. Unité CNRS/INSA Toulouse/Université Toulouse 3. 4. Unité CNRS/Onera.

► Substrat de saphir revêtu de molybdène, un métal de transition qui interagit fortement avec la lumière.



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

viennent alors se déposer sur un substrat dont la structure les contraint à s'agencer sur le réseau en nid-d'abeilles. Or tout est dans le choix du substrat. Des tentatives ont été menées avec l'argent en 2012, mais ses propriétés conductrices le rendent inopérant.

D'autres essais sont réalisés pour fabriquer du silicène, sur des substrats non métalliques cette fois. Ainsi l'équipe d'Isabelle Berbezier, de l'Institut des matériaux, de microélectronique et des nanosciences de Provence², est parvenue cette année pour la première fois à synthétiser du silicène à la surface de graphène. Pourquoi du graphène ? « L'idée est de mettre à profit la facilité à transférer du graphène sur d'autres matériaux », explique-t-elle.

Avant qu'un transistor à base de silicène équipe nos ordinateurs, il faudra toutefois que les chercheurs surmontent un autre obstacle : très réactif, ce matériau s'oxyde très vite à l'air libre. Ainsi, le premier transistor mis au point en 2015 n'a survécu que deux minutes. Mais là encore, les chercheurs redoublent d'efforts pour prolonger la durée de vie du silicène, avec de bons résultats.

Sur la piste d'autres matériaux 2D

D'autres matériaux que le silicène sont également à l'étude. Parmi eux, le germanène, composé d'atomes de germanium, le stanène (fait d'étain), ou encore le phosphorène (fait de phosphore). Difficile de dire lequel d'entre eux s'imposera.

Tout aussi prometteurs sont les dichalcogénures de métaux de transition (DMT). De l'épaisseur de trois atomes, un feuillet de DMT est constitué d'atomes d'un métal de transition (comme le molybdène ou le tungstène) pris en sandwich entre des atomes de soufre ou encore de sélénium. La fabrication de ces matériaux est simple et identique à celle du graphène : elle consiste à détacher, avec un ruban adhésif, un feuillet à la surface d'un matériau naturel fait d'un empilement de couches. Cela explique en partie pourquoi ces semi-conducteurs ont pris une petite longueur d'avance sur d'autres matériaux 2D comme le silicène. En 2011, une équipe annonçait ainsi avoir mis au point le premier transistor à base de disulfure de molybdène (MoS_2). Malheureusement, les DMT ont un point faible : contrairement au silicène, ils transportent mal les électrons. Si bien qu'aujourd'hui, très peu misent sur ces matériaux dans ce domaine.

Les promesses de l'optoélectronique

Les DMT promettent en revanche de nombreuses applications dans l'optoélectronique, qui s'intéresse aux dispositifs capables d'émettre ou d'absorber de la lumière. Car non seulement ces matériaux sont semi-conducteurs, mais ils interagissent avec la lumière de façon très efficace. « Un seul feuillet de MoS_2 est capable d'absorber 15 % de la lumière qu'il reçoit. C'est dix fois plus que ce dont sont capables les matériaux actuels comme

l'arséniure de gallium », note Xavier Marie, du Laboratoire de physique et chimie des nano-objets³, à Toulouse.

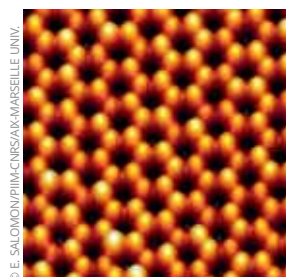
Cette capacité extraordinaire peut ensuite être utilisée pour leur faire convertir la lumière en électricité. Réciproquement, on peut transformer de l'électricité en lumière en injectant des électrons dans le feuillet de DMT. Grâce à cette habileté, les DMT sont promis à un brillant avenir. Ils pourraient permettre la réalisation de cellules photovoltaïques plus sensibles, de sources de lumière miniaturisées (LED, laser), ainsi que de photodétecteurs plus petits, pour les télécommunications par fibres optiques notamment. Ultraflexibles comme le graphène, ils pourraient également constituer les systèmes d'affichage de futurs écrans souples. De nombreux prototypes ont déjà été fabriqués et testés.

Alors que les physiciens continuent à mettre au jour de nouveaux matériaux 2D et cherchent à mieux comprendre leurs propriétés, certains ont franchi un pas supplémentaire : « L'idée est qu'en mariant plusieurs matériaux, on pourra tirer parti des propriétés uniques de chacun d'entre eux.voire créer des matériaux aux propriétés complètement nouvelles », se réjouit Annick Loiseau, du Laboratoire d'étude des microstructures⁴, à Châtillon.

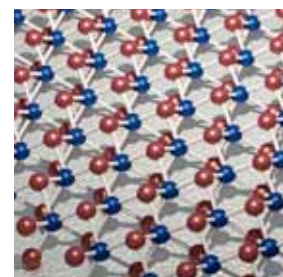
Le succès est déjà au rendez-vous. Une équipe a ainsi combiné du MoS_2 et du graphène pour créer les jonctions au cœur des cellules photovoltaïques et des photodétecteurs, exploitant l'habileté du semi-conducteur à absorber la lumière et l'aptitude du graphène à transporter les électrons. Le concept a ensuite été repris dans l'autre sens pour créer, cette fois, une diode électroluminescente avec du MoS_2 pris entre deux électrodes de graphène. Et bien d'autres idées fleurissent encore.

Reste qu'aujourd'hui, tous les dispositifs faisant appel à des matériaux 2D sont encore cantonnés aux laboratoires. Pour les en faire sortir, les chercheurs devront faire sauter un verrou, celui de leur production à grande échelle. « Aujourd'hui, la fabrication de tous ces nouveaux matériaux ressemble plutôt à de la haute couture, souligne Annick Loiseau. On n'est pas encore capable de les produire ni de les manipuler sur de grandes surfaces, un impératif pour qu'ils puissent trouver un jour des applications en électronique. » Les chercheurs l'ont bien compris et y travaillent d'arrache-pied. Les successeurs du graphène n'ont pas fini de faire parler d'eux. II

► Comme le graphène, le silicène présente une structure en nid-d'abeilles (vue au microscope à effet tunnel).



© E. SALOMON/PIIM-CNRS/AIX-MARSEILLE UNIV.



© R. BROOKSCIENCE PHOTO LIBRARY/COSMOS

► Modèle de monocouche de dichalcogénure de métaux de transition (DMT), de l'épaisseur de trois atomes.

Des vols en ballon pour observer l'Univers

PAR VAHÉ TER MINASSIAN

UNIVERS

Astrophysique. Plus économique que le satellite, le ballon stratosphérique permet aux chercheurs d'observer le cosmos en embarquant un télescope à 40 000 mètres d'altitude. Ainsi de la nacelle scientifique Pilot, qui a achevé en avril 2017 une mission dans le ciel austral en vue d'étudier les poussières interstellaires de notre galaxie.

Il y a certains des avantages des satellites, sont bien meilleur marché et permettent de tester dans des conditions quasi réelles les technologies spatiales de demain. Cinquante-six ans après leur premier vol au-dessus de l'Hexagone, en octobre 1961, les ballons stratosphériques conservent toute leur place dans la boîte à outils des scientifiques, et notamment au sein de la recherche française, l'une des plus actives au monde sur le sujet. La seule année 2017 est ainsi le cadre de trois campagnes à forte participation française en Australie, en Nouvelle-Zélande et aux États-Unis.

Un milieu proche du vide spatial

C'est que « *plusieurs disciplines pourraient difficilement se passer de cette méthode simple pour positionner momentanément des instruments à des altitudes allant de vingt à quarante kilomètres, inatteignables par des avions* », explique Martin Giard, délégué aux affaires spatiales à l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS.

Sans ballons, les spécialistes en aérologie seraient dans l'incapacité de mesurer *in situ* les divers phénomènes stratosphériques liés à la pollution, au climat, à la météo... Et les astrophysiciens perdraient l'accès à un milieu propice à l'observation du cosmos dans des conditions proches de celles du vide spatial. En effet, l'atmosphère terrestre bloque une partie du rayonnement des astres.



▼ Le ballon stratosphérique sur le point d'être lâché depuis le désert australien pour le deuxième vol de la mission Pilot, le 16 avril.

Conséquence : les télescopes au sol ne peuvent sonder le ciel sur certaines longueurs d'onde.

En plaçant les détecteurs en hauteur, dans un environnement raréfié en air, les scientifiques se dotent d'un moyen précieux pour réaliser des images dans ces parties manquantes du spectre lumineux. Un lâcher de ballon étant bien plus économique et facile à mettre en œuvre que le lancement d'un satellite, et les instruments qu'il transporte dans sa nacelle étant souvent récupérables, le procédé peut aussi être employé pour réaliser des essais « grandeur nature » de dispositifs destinés à être, plus tard, placés en orbite. Une mission spatiale

offrant, quant à elle, des prises de données sur des temps plus longs.

Poussières interstellaires

Après un premier vol réalisé en septembre 2015 au Canada, la campagne Pilot, achevée le 17 avril sur l'aéroport d'Alice Springs (Australie), illustre parfaitement ces atouts. Conçue par l'Irap¹, l'IAS², le CEA³ et le Cnes⁴, l'expérience consiste en un télescope dont le détecteur est une matrice de 2 048 bolomètres refroidis à une température de 300 millièmes de kelvin. « Elle a pour but de mesurer, sur certaines portions du ciel austral, un phénomène dit de "polarisation du rayonnement des

1. Institut de recherche en astrophysique et planétologie (CNRS-Univ. Paul-Sabatier). 2. Institut d'astrophysique spatiale (CNRS/Univ. Paris-Sud).

3. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. 4. Centre national d'études spatiales. 5. Participant au projet, côté français : l'Irap, le laboratoire Astroparticule et cosmologie (CNRS/CEA/Univ. Paris-Diderot/Observatoire de Paris) et le Laboratoire de l'accélérateur linéaire (CNRS/Université Paris-Sud) ainsi que le Cnes, fournisseur de la nacelle pointée. 6. Unité CNRS/Aix-Marseille Université.



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

poussières du milieu interstellaire », indique François Boulanger, directeur de recherche à l'IAS d'Orsay. La détection de ce signal, situé dans l'infrarouge lointain, est impossible depuis le sol aux longueurs d'onde où il est le plus fort. Elle constitue pourtant l'un des rares moyens dont disposent les astrophysiciens pour cartographier le champ magnétique dans les nuages interstellaires de la Voie lactée, et ainsi étudier le rôle qu'il joue dans la formation des étoiles. Elle intéresse aussi les cosmologistes car cette émission lumineuse d'origine galactique se superpose au « rayonnement fossile de l'Univers » (ou fond diffus cosmologique), compliquant la découverte, tant espérée, des fameuses « ondes gravitationnelles primordiales » censées apporter la preuve définitive de la théorie de l'inflation.

800 000 m³ gonflés d'hélium

Après un mois et demi de préparation, « Pilot » a pris son envol le 16 avril à 5 h 30 du matin. Emportée par le plus gros des « ballons stratosphériques ouverts » du Cnes – un mastodonte de 800 000 m³ gonflé d'hélium et pouvant atteindre les 15 mètres de diamètre –, la nacelle pointée d'une tonne, avec l'expérience à son bord, s'est rapidement élevée dans les airs pour dépasser les 40 kilomètres d'altitude. L'équipe a alors pu, durant trente-trois heures et quarante minutes, récolter des données avant que l'engin entame une descente et atterrisse en douceur dans une zone désertique située à plusieurs centaines de kilomètres du point de départ. Il y sera récupéré le lendemain par hélicoptère : intact.

Pleinement satisfaite de son aventure australienne, l'équipe de Pilot prévoit un troisième vol dès 2018 depuis la base de Kiruna, en Suède. Elle espère aussi développer un nouveau télescope sous ballon baptisé « Bside ». Une appétence pour les aérostats que Jean-Philippe Bernard, responsable scientifique de Pilot et directeur de recherche à l'Irap, justifie

par « le coût et la rapidité de développement de ce type d'expériences, dont le principal intérêt est de permettre une exploration du ciel en polarisation à des longueurs d'onde nouvelles, jamais utilisées ».

200 galaxies dans le viseur

Les chercheurs de Pilot ne sont pas les seuls à avoir été séduits par ces engins aériens. Le 25 avril à 10 h 50, un ballon stratosphérique américain de 532 000 m³ était lâché depuis Wanaka, en Nouvelle Zélande, emportant pour cent jours les 2,5 tonnes de l'expérience internationale à participation française EUSO-SPB⁵, dédiée à la détection des rayons cosmiques à ultra-haute énergie.

Et septembre 2017 verra se dérouler à Fort Sumner, au Nouveau Mexique (États-Unis), la première campagne « Fireball 2 ». Piloté par le CalTech, la Columbia University et le Laboratoire d'astrophysique de Marseille⁶ (LAM) et impliquant le Cnes au titre de responsable du développement de la nacelle pointée, le projet est dédié à l'étude des échanges de gaz entre le milieu intergalactique et les galaxies. Les flux entrant dans les galaxies fournissent la matière première nécessaire à la formation des étoiles. Mais du gaz peut aussi être éjecté par ces objets, avant, parfois, d'y revenir. L'objectif de « Fireball 2 » est de « caractériser ce cycle et ses liens avec la formation d'étoiles », précise Bruno Milliard, du LAM. L'observation, dans le domaine de l'ultraviolet, de ces gaz intergalactiques étant impossible à réaliser depuis le sol pour l'essentiel de l'histoire de l'Univers, l'équipe a conçu un « spectrographe multi-objets » capable de fonctionner à partir d'un des ballons stratosphériques d'un million de mètres cubes de la Nasa. Elle espère ainsi pouvoir réaliser, durant les huit heures du vol, des images de plus de 200 galaxies. Là encore, grâce aux aérostats. Ces irremplaçables éclaireurs du cosmos placés aux avant-postes de la recherche scientifique... II

En bref

SUCCÈS POUR MOMENTUM

Avant l'été, le CNRS a lancé l'appel à projets Momentum. Son but : permettre à de talentueux jeunes scientifiques indépendants d'imaginer et de mener à bien un projet innovant au sein d'un laboratoire. En développant leurs propres projets dans les treize domaines émergents et transdisciplinaires définis par l'organisme, les lauréats de CNRS-Momentum contribueront à étoffer la recherche des unités qui les accueilleront. À la clôture de l'appel fin juin, 438 dossiers avaient été jugés éligibles. Les noms des lauréats de cette bourse allouée pour une période de trois ans seront dévoilés à l'automne.

L'APA, PAS À PAS

La Fondation pour la recherche sur la biodiversité a coordonné l'élaboration d'un guide sur l'« accès aux ressources génétiques et le partage des avantages découlant de leur utilisation ». Ce guide est destiné à éclairer la nouvelle réglementation, dite APA, qui encadre les activités de recherche sur les ressources génétiques au sens large – de l'ADN à l'espèce, en passant par les produits du métabolisme.



En ligne sur le site
>> www.fondationbiodiversite.fr

UNE CONVENTION AVEC PSL

Le 20 juillet 2017, le CNRS et l'université Paris Sciences et Lettres (PSL), ainsi que les établissements qui la composent, ont signé une convention pluriannuelle de site. Celle-ci vise à expliciter et dynamiser une coopération scientifique déjà riche et fructueuse, couvrant la quasi-totalité des domaines de recherche placés au meilleur niveau européen et international.

UN NOUVEL ACCÉLÉRATEUR AU CERN

En mai, le Cern a inauguré le Linac 4, un nouvel accélérateur linéaire. Conçu avec des contributions de plusieurs laboratoires français, celui-ci doit entrer en service en 2020 et deviendra alors le premier maillon de la chaîne d'accélérateurs de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire. Long de près de 90 mètres, il fournira des faisceaux de protons à de nombreuses expériences et permettra notamment au Grand collisionneur de hadrons (LHC) d'atteindre une luminosité plus élevée.



>> <https://home.cern/fr>

VIVANT

SOCIÉTÉS

Neurobiologie. Le sommeil, activité vitale à laquelle nous consacrons un tiers de notre vie, ne permet pas seulement de reprendre des forces. Il favorise aussi la mémoire, déclenche la production d'hormones, renforce le système immunitaire, régule le système cardiovasculaire et estompe les émotions négatives. Mais les chercheurs soupçonnent à présent d'autres fonctions capitales du sommeil. Florilège des dernières découvertes.

ET SI LES BÉBÉS DORMAIENT POUR DÉVELOPPER LEUR CERVEAU ?

Le sommeil paradoxal, qui représente la moitié des phases de sommeil pendant les premiers mois de vie (contre 20 % à l'âge adulte), contribuerait activement au développement cérébral des tout-petits. C'est ce que cherche à prouver Mark Blumberg, spécialiste du développement de la motricité chez le bébé rat et chercheur à l'université d'Iowa. « *Son idée est très astucieuse*, explique Isabelle Arnulf, chef du service des pathologies du sommeil à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris. *Il s'intéresse aux brèves secousses musculaires dites "twitches" qui caractérisent le sommeil paradoxal et qui sont particulièrement abondantes lors de la période néonatale. Selon Mark Blumberg, elles stimuleraient des récepteurs situés dans les muscles, lesquels, en retour, en informeraient le cortex* ». Ainsi, lorsque des twitches provoquent des sursauts des doigts de bébé, le cortex apprend l'existence de ces extrémités et leur aptitude à fonctionner. « *Un peu comme un électricien qui se trouverait dans une immense pièce truffée d'interrupteurs et de lampes, et qui actionnerait chaque bouton pour comprendre à quelle lampe il est relié : le corps du nouveau-né utiliserait les twitches pour s'auto-explorer pendant le sommeil et activer la genèse et l'organisation de circuits nerveux* », résume Isabelle Arnulf, également chercheuse à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière.



MOLÉCULE ANTI-SOMMEIL ET SOMNIFÈRE NOUVELLE GÉNÉRATION

Le cerveau profiterait du sommeil pour se débarrasser de ses déchets et notamment de la protéine bêta-amyloïde, impliquée dans la maladie d'Alzheimer. C'est l'hypothèse de la neurobiologiste Maiken Nedergaard, du Centre médical de l'université de Rochester (New York). Reposant sur le réseau de microcanaux qui sillonne l'organe et charrie le liquide céphalo-rachidien (LCR), ce tout-à-l'égout cérébral serait surtout actif durant le sommeil. « *Les expériences conduites sur des souris montrent que l'espace extracellulaire (entre les cellules cérébrales, NDLR) augmente de 60 % quand les rongeurs s'endorment, facilitant la circulation du LCR dans le tissu cérébral, et ainsi l'évacuation des déchets*, commente Pierre-Hervé Luppi, du Centre de recherche en neurosciences de Lyon². *Cette démonstration est intéressante, mais elle n'a fait l'objet, pour l'instant, que d'une seule publication.* » Une théorie qui reste donc à confirmer...

DORMIR POUR SE LAVER LA TÊTE ?

Mieux comprendre les troubles du sommeil, comme la narcolepsie ou

l'insomnie, est un enjeu majeur pour peaufiner des stratégies thérapeutiques. L'équipe de Jian-Sheng Lin, au Centre de recherche en neurosciences de Lyon, s'intéresse aux mécanismes responsables du maintien de l'éveil et de la vigilance. Les chercheurs se focalisent sur deux neurotransmetteurs : l'orexine et l'histamine.

« *Nos travaux montrent que les neurones à orexine sont impliqués dans l'éveil locomoteur, c'est-à-dire l'éveil lié à la réalisation d'un exercice physique*, explique Jian-Sheng Lin. *Ces neurones jouent aussi un rôle clé dans le maintien de la posture, ce qui explique que le déficit en orexine entraîne la narcolepsie. Les neurones à histamine, eux, semblent plutôt régir l'éveil lié à l'exploration d'un nouvel environnement, ainsi que l'éveil lié à la recherche*



Lire l'intégralité
de l'article sur
lejourn.cnr.fr

du sommeil

PAR PHILIPPE TESTARD-VAILLANT

INSOMNIES, ÉCRANS ET SMARTPHONES

▲ Les flashes des smartphones perturberaient davantage l'horloge biologique qu'une lumière continue.

Si 20 à 30 % des Français tombent difficilement dans les bras de Morphée et 10 % souffrent d'insomnie chronique, les téléphones et autres écrans, qui squattent aujourd'hui les chambres à coucher, en sont-ils responsables ? « *Il y a encore peu de temps, des niveaux faibles de lumière n'étaient pas supposés avoir d'impact sur le sommeil, commente Claude Gronfier, de l'Institut cellule souche et cerveau (Inserm). Or, des travaux récents menés à la Harvard Medical School de Boston révèlent que l'exposition prolongée, le soir, même à de très basses intensités (environ 20 lux pour un smartphone, 30 lux pour une tablette, 100 lux pour un ordinateur), dérègle l'horloge biologique.* » De même, une expérience conduite en 2016 par Raymond Najjar, de l'Institut de recherche sur l'œil de Singapour, révèle qu'être exposé la nuit, les yeux ouverts, à de brefs flashes de lumière pendant une heure retarde davantage l'horloge biologique que le fait d'être soumis à une lumière continue pendant le même laps de temps. Un

smartphone qui s'allume la nuit à la réception de SMS a donc de fortes chances de perturber l'horloge de sujets même endormis...

Et ce n'est pas tout. Certes, nous sommes tous sensibles à la lumière bleue des diodes électroluminescentes (LED) : elle augmente la sensation de bien-être et bloque la sécrétion de mélatonine (hormone favorisant l'endormissement). Mais la sensibilité nocturne aux écrans est d'autant plus forte que l'exposition à la lumière solaire est réduite pendant la journée. Or « *l'horloge biologique fonctionne plus lentement à l'adolescence qu'à l'âge adulte et déclenche l'endormissement plus tard, poursuit Claude Gronfier. Ce retard est donc probablement amplifié chez les jeunes qui utilisent un écran avant de se coucher.* » Quant aux seniors, qu'ils ne se frottent pas trop vite les mains. Bien que le cristallin, les années passant, brunisse et laisse passer moins de lumière riche en longueurs d'onde bleues, cette opacification ne diminue pas la sensibilité de l'horloge biologique des sujets âgés à la lumière des écrans.



de nourriture, le manque d'histamine déclenchant la somnolence. Par ailleurs, ces deux systèmes localisés dans l'hypothalamus agissent de concert pour contrôler l'éveil "anticipatoire" (quand l'animal compte sur – ou attend – un événement prévisible, comme un repas), ainsi que l'éveil associé à l'activité sexuelle. »

Utilisé en médecine du sommeil depuis quelques mois, le pitolisant, une molécule « éveillante » issue de ces recherches et augmentant le largage d'histamine dans le cerveau, permet de lutter contre l'hypersomnolence et les attaques narcoleptiques. « *Certaines formes d'insomnie ayant partie liée avec la surrégulation d'histamine, l'un de nos objectifs est maintenant de concevoir un médicament ciblant ce neurotransmetteur et offrant un sommeil beaucoup plus proche du sommeil naturel que celui, lourd et "non physiologique", qu'apportent les multiples somnifères actuels* », indique le scientifique.

Nul doute qu'à l'avenir, l'optogénétique aide à percer d'autres mystères du sommeil. Cette technique, qui permet de cibler avec précision de petites populations de neurones et d'en contrôler l'activité en les allumant ou en les éteignant à l'aide d'un faisceau lumineux, « *s'avère un outil précieux pour progresser dans notre compréhension de la neurobiologie de la veille et du sommeil, se réjouit Patrice Bourgin, de l'Institut des neurosciences cellulaires et intégratives de Strasbourg³. Identifier les réseaux de neurones qui sous-tendent les différents états de vigilance et percer leur rôle, en cas de dysfonctionnement, dans certains troubles du sommeil, débouchera à terme sur de nouvelles solutions thérapeutiques.* » Bien des nuits blanches attendent les spécialistes du sommeil...

LES PROMESSES DE L'OPTOGÉNÉTIQUE

1. Unité CNRS/Inserm/UPMC. 2. Unité CNRS/Univ. Claude-Bernard/Univ. Jean-Monnet/Inserm.
3. Unité CNRS/Univ. de Strasbourg.

Ce que l'on sait de l'inceste en France

Dans votre rapport, réalisé par une douzaine de chercheur(e)s de diverses disciplines (histoire, sociologie, neurosciences...) dans le cadre de la mission « Sciences en société » du CNRS, vous dressez un état des lieux des connaissances et proposez des pistes d'analyse et d'action contre l'inceste. Aujourd'hui, ce phénomène nous horripile, mais cela a-t-il toujours été le cas ?

Sylvie Cromer : Non. La perception sociale et culturelle de l'inceste a évolué au fil des siècles, même si cette évolution n'a rien de linéaire. Au Moyen Âge, par exemple, l'inceste était considéré comme un acte consenti et non

comme une violence sexuelle imposée à l'enfant. Celui-ci pouvait donc être jugé responsable de ce crime, encourir des poursuites judiciaires et être puni, tout comme le parent incriminé. Dans la société patriarcale du XIX^e siècle, on faisait peu de cas des atteintes à l'intégrité morale des enfants violentés. Le déni et la loi du silence dominaient. La sensibilité qui est la nôtre aujourd'hui à l'égard des violences incestueuses s'explique notamment par la démocratisation de la vie familiale (l'époque de la toute-puissance paternelle est révolue) et par l'affirmation, tout au long du XX^e siècle, de l'enfant comme sujet de droit.

De quels outils dispose-t-on pour estimer l'ampleur du phénomène ?

S. C. : La France a pris beaucoup de retard en matière de mesure des violences sexuelles. Il a fallu attendre les années 2000 pour que des enquêtes soient menées auprès d'échantillons représenta-

tifs de la population et permettent d'améliorer nos connaissances statistiques sur le sujet. Il ressort de la dernière enquête en date, Virage (Violences et rapports de genre), que l'Institut national d'études démographiques a conduit en 2015 et dont les résultats sont en cours d'exploitation, qu'au cours de leur vie, 5 % des

femmes et un peu moins de 1 % des hommes de 20 à 69 ans ont été victimes de viol, de tentative de viol ou d'attouchements dans le cadre familial ou de l'entourage proche. Surtout, plus de 90 % de ces actes, s'agissant des femmes, et 100 %, concernant les hommes, se sont produits pour la première fois entre 0 et 17 ans.

Les garçons sont donc aussi victimes d'inceste ?

S. C. : Effectivement. Mais les violences sexuelles sans pénétration commises sur les garçons, comme des fétulations ou des masturbations imposées, n'ont pas le statut de crime de viol. De plus, l'inceste commis par des femmes est occulté par le stéréotype de la mère nourricière, protectrice, nécessairement douce..., et reste largement impensé. Or, bien que dans une proportion très inférieure à celle des hommes, les femmes peuvent commettre des violences incestueuses ou être complices d'un homme auteur de tels actes.

L'inceste est-il plus fréquent dans certains milieux sociaux ?

S. C. : Non. Tous les milieux sont touchés. Il faut en finir avec la thèse misérabiliste selon laquelle les violences incestueuses seraient l'apanage des familles défavorisées. Ce stéréotype qui fait écran à l'appréhension de la réalité ordinaire de l'inceste reste extrêmement vivace. Il continue de sévir, en particulier, chez des professionnels de tous horizons (police, justice, santé, éducation sociale...) et dans les médias, comme on a pu le voir pendant le procès d'Outreau en 2004.

Si les études menées par les institutions judiciaires ou de protection de l'enfance donnent à penser que les violences sexuelles sont plus nombreuses dans les familles populaires, c'est notamment parce que ces familles sont plus étroitement surveillées par les travailleurs sociaux, et que les familles à fort capital économique et culturel disposent de stratégies fortes de déni et de maintien d'une culture du silence.

Que disent les études nationales et internationales des effets de l'inceste sur le développement de l'enfant et de l'adolescent ?

S. C. : Elles montrent que ce type d'agressions sexuelles déclenche une cascade d'effets délétères sur le plan neurobiologique, comportemental, cognitif, affectif..., et augmente la vulnérabilité à un large éventail de problèmes de santé. Les victimes, par exemple, présentent un risque élevé de développer un trouble dépressif, des conduites

SOCIÉTÉS

Sociologie. Réalisée sous l'égide du CNRS, la première expertise collective sur les violences sexuelles à caractère incestueux a été remise fin avril à la ministre des Familles, de l'Enfance et des Droits des femmes. Quelle est l'ampleur de l'inceste et quels sont ses effets en France ? Quelles mesures peuvent-être

prises ? Les réponses de la sociologue Sylvie Cromer¹, coordinatrice de cette étude.



PROPOS RECUEILLIS PAR
PHILIPPE TESTARD-VAILLANT

1. Maîtresse de conférences en sociologie à l'université Lille 2 et directrice de l'Institut du genre, groupement d'intérêt scientifique fondé en 2012 à l'initiative de l'Institut des sciences humaines et sociales du CNRS.



Lire le rapport sur
www.cnrs.fr/inshs/recherche/violence-sexuelle.htm

l'heure, ne permet d'étayer l'hypothèse de « l'abusé abuseur ».

Quelles pistes de réflexion et d'action préconisez-vous ?

S. C. : Ce rapport est un premier état des lieux. Il faudra le compléter par d'autres synthèses thématiques et des auditions d'associations et d'expert(e)s. Mais, d'ores et déjà, le comité que j'ai piloté propose de renforcer les recherches sur l'inceste en mettant sur pied un réseau de chercheur(e)s ouvert à d'autres disciplines (droit, sciences politiques, sociologie des médias...). Il est nécessaire, par exemple,

de mener des enquêtes de terrain pour mieux appréhender les racines sociales de l'inceste (milieux touchés, liens des familles concernées avec les professionnels de l'enfance, perception, par ces familles, de la notion de « bons parents », de la violence à enfant...). Une réflexion doit aussi s'engager sur les frontières de la notion d'inceste. Le Code pénal, en effet, n'inclut dans la qualification d'inceste ni le cousin ni le grand-oncle parmi les auteurs potentiels de violences incestueuses, et il ne vise que les mineur(e)s. Cette exclusion des majeur(e)s est surprenante puisque l'inceste existe quel que soit l'âge de la victime.

Enfin, des campagnes d'information et de sensibilisation doivent cibler les jeunes et la population générale, viser tous les lieux de socialisation (école, université...) et s'appuyer sur un site Internet.

Que recommandez-vous en matière de formation et d'accompagnement ?

S. C. : Il nous semble important d'intégrer les apports des sciences sociales et des sciences de la santé sur l'inceste aux formations des professionnels de l'enfance, de l'éducation, des équipes soignantes, des intervenant(e)s sociaux, des personnels policiers et judiciaires... Quant à la prise en charge psychologique et socio-éducative des victimes et des familles, les méthodologies existantes doivent être évaluées et comparées avec celles utilisées dans d'autres pays (Belgique, Canada...). De même, il nous paraît indispensable de promouvoir la prise en charge des agresseurs, tant pour réduire les risques de récurrence que pour bloquer le processus de transmission intergénérationnelle. II

“Il faut en finir avec la thèse selon laquelle les violences incestueuses seraient l'apanage des familles défavorisées.”

addictives et des troubles alimentaires. Une étude canadienne révèle également que 73 % d'adultes prostitués présentent des antécédents d'abus sexuels pendant l'enfance. Quant aux performances scolaires, elles ne sont pas systématiquement atteintes. Mais on observe que les petites victimes d'inceste sont souvent impopulaires dans leurs classes et que leurs relations avec les autres élèves sont marquées par une attitude de retrait ou d'agressivité. Pour autant, il n'existe pas de trajectoire type de la victime d'inceste. Il n'y a aucune automaticité des comportements. Surtout, les traumatismes induits par ces violences peuvent être compensés par une prise en charge précoce et adaptée des victimes.

Les enfants victimes d'inceste présentent-ils un risque plus grand de devenir des parents incestueux ?

S. C. : Plusieurs théories suggèrent que les sujets victimisés lors de leur enfance ont tendance à perpétrer des abus sexuels sur des enfants à l'âge adulte. Or, rien, pour

Les instituts Carnot, carrefours de l'innovation

Partenariat. Véritable trait d'union entre la recherche publique et privée, le réseau des instituts Carnot, qui implique de nombreux laboratoires du CNRS, a trouvé sa place dans l'écosystème français d'innovation.

PAR CLAIRE DEBÔVES

Pour une PME, travailler avec des chercheurs ne va pas de soi. Pour quoi faire ? Dans quels délais ? À qui s'adresser ? Voilà qui questionne en creux notre écosystème d'innovation : méconnaissance du potentiel des laboratoires publics, profusion de dispositifs et d'intervenants... Pourtant, après quelques années de rodage, certains nouveaux acteurs ont su se rendre incontournables : c'est le cas des instituts Carnot, créés en 2006.

Un large spectre disciplinaire

Carnot est un label ministériel qui distingue et encourage la recherche partenariale publique-privée de manière atypique en France. En effet, il contribue à financer des structures de recherche publiques rassemblées autour d'un segment scientifique et technologique lié aux besoins R & D d'entreprises de toutes tailles. Les financements sont attribués sur la base d'un volume de recettes

contractuelles pré-existant – avec l'idée de progresser en se professionnalisant. « Les instituts Carnot sont des interfaces pratiques entre le monde académique et industriel, précise Michel Mortier, nouveau délégué général à la valorisation du CNRS. Ils sont parfaitement adaptés au CNRS, car valorisant les compétences pluridisciplinaires des laboratoires sans créer de nouvelles structures. »

Aujourd'hui, 38 instituts et Tremplins Carnot¹ balayent un large spectre disciplinaire en

chimie, matériaux, technologies de l'information, santé, etc. Avec une approche toujours très ciblée : lymphome (Calym), nouvelles technologies énergétiques (Énergies du futur), matériaux biosourcés (Polynat), etc. Ce ciblage thématique permet aux instituts Carnot de devenir une référence et un point d'entrée dans un domaine pour les entreprises, sans pour autant prétendre à l'exclusivité ni

à l'exhaustivité de l'offre partenariale à l'échelle nationale. C'est le cas de l'institut Carnot Mica (Material institute Carnot Alsace) dans le domaine des matériaux. « Proposer une offre partenariale lisible et opérationnelle à un marché est une grande première dans la recherche publique », relève Cathie Vix-Guterl, directrice de Mica et vice-présidente de l'Association des instituts Carnot.

De leur côté, les industriels se retrouvent dans le professionnalisme et la réactivité de ce modèle partenarial. « Notre collaboration avec Mica repose d'abord sur

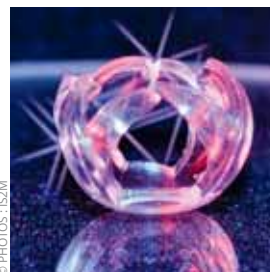
Le réseau en chiffres

38 Carnot, dont 29 instituts et 9 Tremplins

11 000 contrats annuels signés avec les entreprises

18 % des effectifs de la recherche publique

Source : rapport d'activité de l'Association Carnot 2016



1. Les Tremplins Carnot sont des structures soutenues financièrement pour développer leur recherche contractuelle afin d'accéder, dans les trois ans, à la labellisation d'institut Carnot.

une vision partagée de la gestion de projet et de la propriété intellectuelle, explique Grégoire Augé, directeur de projets R & D sur le traitement et la gestion des déchets nucléaire chez Onet Technologies. Les outils et l'expertise de la recherche publique nous permettent de progresser dans la maturation technologique et vers l'industrialisation de nouveaux procédés. »

Un effet de levier

Voilà qui explique la forte progression des recettes contractuelles des membres du réseau Carnot : de 187 millions d'euros en 2006 à plus de 550 en 2016. Au point que l'on peut parler d'effet de levier du dispositif, compte tenu de l'abondement initial de l'État (60 millions d'euros par an). « Outre la professionnalisation de la gestion et du management, ces moyens supplémentaires soutiennent des actions de ressourcement scientifique au niveau des structures de recherche », explique Katia Barral, responsable recherche partenariale et innovation à l'institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (Insis) du CNRS. Le ressourcement consiste à lancer, parmi les membres de l'institut Carnot, des appels à projets

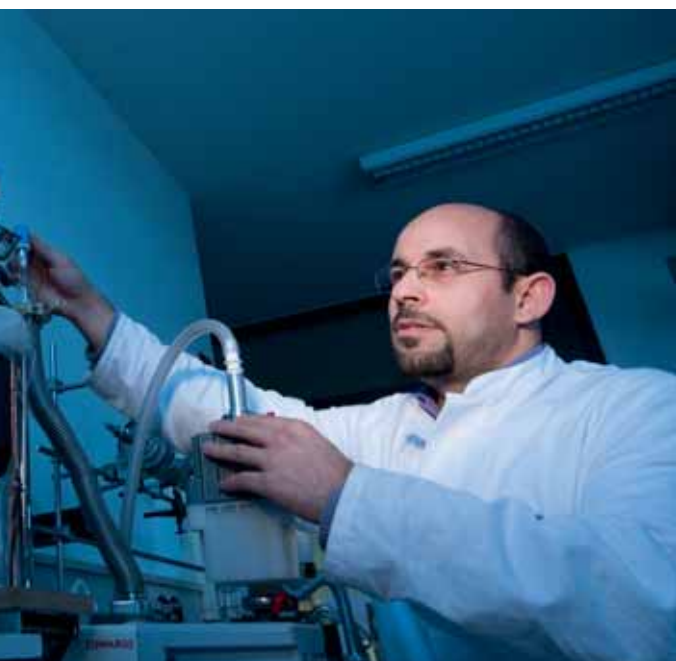


inspirés par les défis technologiques des entreprises. Les projets d'innovation retenus sont financés et décrochent de nouveaux contrats avec les entreprises intéressées.

« Ce système où la recherche et les besoins socio-économiques s'autoalimentent est très vertueux et porteur du point de vue du CNRS, sans pour autant devenir un pilotage de la recherche par l'aval ou l'application », estime Michel Mortier. 153 unités du CNRS participent à 20 instituts Carnot et à 7 Tremplins Carnot. Ces labels viennent compléter les dispositifs de recherche partenariale déjà existants au CNRS : accord-cadre, laboratoire commun, voire unité mixte avec l'industrie. « Notre modèle partenarial peut aller très loin puisque nous partageons une stratégie à long terme avec certains industriels. Actuellement, nous entendons nous ouvrir davantage aux PME et ETI, moins habituées à cette relation qui peut les effrayer », annonce Michel Mortier.

Ayant atteint son niveau de maturité, le label Carnot peut donc s'appuyer sur une base solide pour accroître sa notoriété, son articulation à l'écosystème d'innovation ainsi que son développement à l'international. ■

► Les Rendez-vous Carnot auront lieu les 18 et 19 octobre à Paris. (Ci-dessus, l'édition 2016.)



► L'institut Carnot Mica est spécialisé en matériaux. Ci-dessus, un réacteur plasma servant à l'élaboration d'un pansement en textile libérant des molécules bioactives. En bas à gauche, une structure 3D obtenue par une technique inspirée du kirigami. En bas à droite, structures de gonflement produites sur un gel d'alginate après le dépôt d'une goutte d'eau.

© H. RAGUET/CNRS PHOTO THÈQUE

Un Tremplin Carnot en technologies cognitives

« Tout système, produit ou service impliquant un être humain peut s'améliorer en faisant appel aux sciences de la cognition » : tel est le credo de Célestin Sedogbo, directeur du Tremplin Carnot Cognition, labellisé en 2016. Cette approche modifie le point de vue de certaines entreprises sur les sciences humaines et sociales. En effet, la cognition augmentée ou collaborative et l'intelligence artificielle, notamment, sont sources d'innovation dans les domaines de la santé, des transports, des télécommunications, etc. « Nous travaillons avec de grands groupes comme IBM sur les voitures intelligentes, mais aussi avec des PME sur la création d'un aide-soignant artificiel pour la réanimation neurologique, par exemple », précise-t-il. L'objectif ? Davantage d'utilité, de performance et de durabilité des technologies... au service de l'humain.



» www.instituts-carnot.eu



Le CNRS unit ses forces en Amériques

PAR SAMAN MUSACCHIO

Événement. Rendez-vous de la science française à l'étranger, la première réunion d'unités mixtes internationales (UMI) du CNRS des Amériques s'est tenue les 26 et 27 avril 2017 à Mexico. L'occasion pour ces dix-sept laboratoires de se découvrir et d'échanger sur les opportunités de développement qu'offrent ces vitrines de la recherche hexagonale.

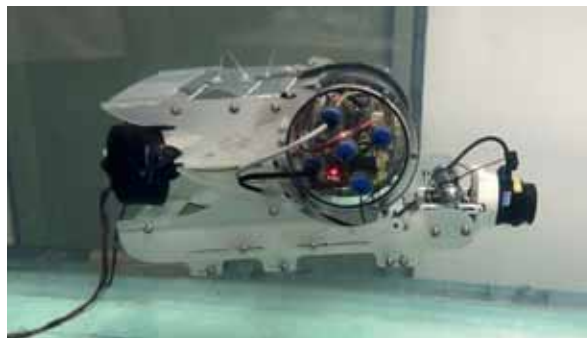
Après les rassemblements de Washington (2014), Singapour (2015) et Québec (2016), le CNRS a décidé de mettre les bouchées doubles cette année à Mexico en réunissant, pour la première fois, les UMI et UMIFRE¹ du continent américain, soit la moitié des UMI mondiales. Bien ancrés dans les écosystèmes de recherche des deux Amériques, ces laboratoires couvrent quasiment l'ensemble des disciplines du CNRS, à quelques exceptions près. Une opération minutieusement organisée par Xavier Morise, directeur du bureau du CNRS à Washington, et son homologue Olivier Fudym du bureau de Rio de Janeiro, coordinateurs régionaux des collaborations et partenariats scientifiques.

Près de 100 personnes étaient réunies : les directeurs, des chercheurs de ces laboratoires communs venus de six pays (Canada, États-Unis, Mexique, Chili, Argentine, Brésil), des conseillers scientifiques, des industriels, des représentants d'agences de financement internationales et une importante délégation de personnels encadrants du CNRS. Pendant deux jours, elles ont pu échanger sur le rôle, l'avenir et l'importance croissante de cet outil de collaboration scientifique unique au monde qu'est l'UMI.

Un partenariat d'excellence

« L'UMI est le niveau de collaboration scientifique le plus élevé et le plus intégré que nous puissions entretenir avec un établissement étranger », rappelle Patrick Nédellec, directeur de la Derci (Direction Europe de la recherche et coopération internationale) du CNRS. L'UMI représente un modèle singulier dans le paysage de la recherche mondiale. « Une UMI, ce n'est pas de la recherche délocalisée. Il s'agit au contraire de donner une impulsion forte à une recherche partenariale d'excellence impliquant les meilleurs chercheurs et institutions de par le monde », explique Xavier Morise. Il existe aujourd'hui 36 unités de ce type dans le monde, réparties principalement entre l'Asie et l'Amérique du Nord ; parmi elles, 28 ont moins de dix ans.

► Sous-marin miniature développé au Lafmia, une UMI basée au Mexique.



© PHOTOS : S. MUSACCHIO

Le choix du Mexique comme pays hôte de ce rendez-vous des UMI américaines ne doit rien au hasard, des liens historiques très forts unissant la France et le Mexique. C'est d'ailleurs le Conseil national des sciences et technologies mexicain (CONACyT) qui a accueilli la rencontre. « Heureux, selon son directeur général, Enrique Cabrero Mendoza, de recevoir le CNRS et ses UMI qui nous permettent de franchir les barrières artificielles dans un monde globalisé ». Un message qui a pris une résonance particulière dans un contexte géopolitique en mutation, entre Brexit et incertitudes sur les décisions budgétaires des États-Unis en matière de recherche.

Une nouvelle UMI mexicaine

Le CNRS a également saisi l'occasion de cette rencontre pour inaugurer une nouvelle UMI en mathématiques et le renouvellement de celle existant depuis 2008 en automatique. « Le laboratoire franco-mexicain d'informatique et d'automatique (UMI Lafmia), créé il y a plus de neuf ans, succédait à deux laboratoires internationaux associés, l'un en informatique, l'autre en automatique », précise Michel Bidoit, directeur de

1. Il existe 26 unités mixtes des Instituts français de recherche à l'étranger (UMIFRE) dans le monde. Si les UMI constituent un partenariat entre le CNRS et une université ou un organisme de recherche à l'étranger, les UMIFRE sont un partenariat entre le CNRS et le ministère français de l'Europe et des Affaires étrangères.



Lire l'intégralité de l'article
sur <http://cnrsinfo.cnrs.fr>

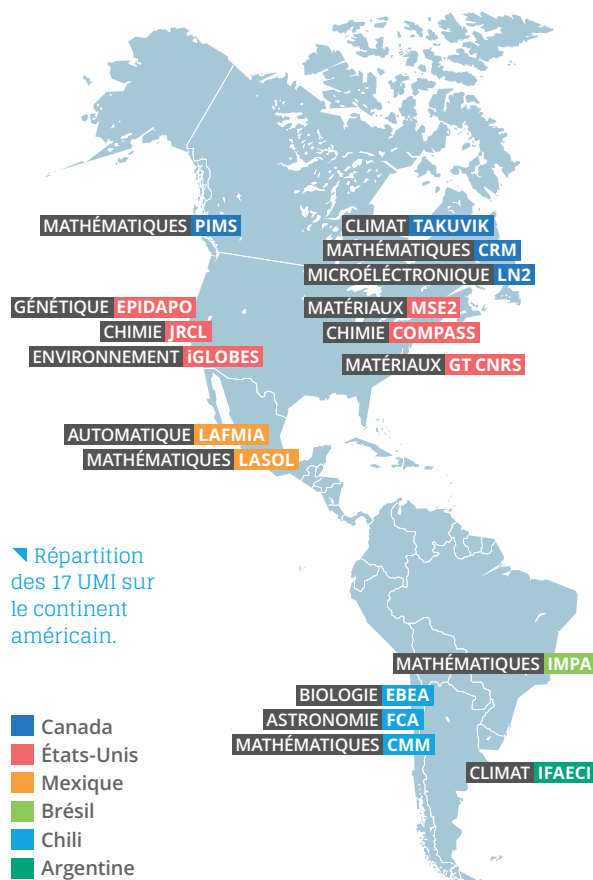
l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INS2I). Ce laboratoire centre une partie de ses recherches sur des systèmes de navigation autonome de drones, des sous-marins miniatures ou encore des exosquelettes.

Pour Christoph Sorger, alors directeur de l'Institut national des sciences mathématiques et leurs interactions (INSMI), la création d'une nouvelle UMI en mathématiques, le Laboratoire Solomon-Lefschetz (UMI LaSol), vient consolider un réseau de mathématiciens déjà bien développé sur le continent américain. En effet, la discipline compte déjà deux UMI au Canada (PIMS, CRM) et deux en Amérique du Sud (IMPA au Brésil, CMM au Chili).

Mutualiser les pratiques

Si ce rassemblement à l'échelle régionale a permis aux directeurs des UMI de se rencontrer physiquement, il leur a surtout fourni l'occasion de mettre en commun des pratiques administratives et financières. « D'une certaine façon, les directeurs d'UMI vivent tous la même chose, souligne Patrick Nédellec. Ils dirigent une unité de recherche qui doit satisfaire la réglementation française, tout en tenant compte de celle du pays où elle se trouve. » Et ces réglementations sont très différentes.

Avoir un pied dans chaque pays peut être une source de complexité, mais offre également de nombreux avantages. Une UMI peut ainsi bénéficier du double soutien d'agences nationales et de l'Europe, ce qui n'a pas échappé aux universités et organismes de recherche partenaires. « Les UMI sont des modèles que nous devrions reproduire au Canada », estime Maryse Lassonde, directrice du Fonds de recherche du Québec-Nature et technologies (FRQNT), qui soutient les trois UMI présentes au Québec à hauteur de 100 000 dollars canadiens (environ 70 000 euros) par



an. Mario Pinto, président du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), se félicite de la part croissante de l'international dans le paysage de la recherche canadienne, et rappelle que 50 % des copublications du pays sont aujourd'hui réalisées avec l'étranger. Cet organisme fédéral canadien soutient actuellement deux UMI au Canada : le PIMS, en mathématiques, et Takuvik, unité spécialisée dans l'étude des changements climatiques et anthropogéniques sur les écosystèmes marins et terrestres en Arctique. Selon Béatrice Saint-Cricq, responsable partenariat et valorisation de Takuvik, « l'UMI est un tel modèle que l'université de Laval (au Canada, NDLR) essaie de le reproduire avec d'autres pays comme la Suisse ou le Brésil. »

Nouer des liens avec l'industrie

Autre point fort du modèle UMI : la possibilité de construire une recherche entre le public et le privé en mobilisant les meilleures équipes

sur des sujets stratégiques à long terme – et ce avec des partenaires de recherche à l'étranger. Certaines UMI des Amériques ont ainsi noué des liens très forts avec l'industrie. Les partenariats entre UMI et grands groupes industriels sont très différents en matière d'accords sur les brevets, la propriété intellectuelle ou le mode de fonctionnement, mais ils présentent des points intéressants. Le CNRS, le groupe Solvay et l'université de Pennsylvanie ont par exemple établi en 2010 une UMI sur la matière molle (UMI Compass), afin de développer des solutions innovantes pour répondre à des problématiques diverses : formulation industrielle ou encore drainage de l'eau d'irrigation par les sols.

Au Massachusetts Institute of Technology (MIT), une autre collaboration entre le CNRS et le secteur industriel n'est pas passée inaperçue. L'UMI MSE2, initiée en 2012 entre la célèbre université américaine et le CNRS, et qui rassemble une vingtaine de chercheurs (dont cinq Français), est partenaire d'industriels qui s'intéressent à des sujets spécifiques, comme la réduction de l'empreinte environnementale de la production de ciment, par exemple. Accoutumée à travailler avec des groupes tels que Shell et Schlumberger, l'UMI collaborera bientôt avec Total. « Nous ne déposons pas de brevets, nous misons sur les publications qui valorisent notre recherche et incitent d'autres entreprises à collaborer avec nous. Nous travaillons en étroite coopération avec nos partenaires industriels et avons des échanges hebdomadaires avec leurs équipes », détaille Roland Pellenq, directeur de l'UMI. Une stratégie de collaboration que le CNRS entend présenter et faire valoir aux principaux partenaires industriels français. ■



Les grands reptiles marins montrent les dents

PAR FUI LEE LUK ET SAMAN MUSACCHIO

VIVANT ● TERRE ●

Paléontologie. Des chercheurs ont percé les secrets enfouis dans les isotopes du calcium de dents fossilisées. Grâce à une méthode inédite, ils proposent un nouveau scénario sur la disparition des grands reptiles marins lors de l'extinction massive, il y a 66 millions d'années.

Pendant des décennies, diverses théories ont circulé pour expliquer la disparition de trois quarts des espèces animales et végétales vers la fin du Crétacé. En juin, une étude franco-marocaine¹ est venue affiner notre compréhension de l'histoire de notre planète. Les fossiles trouvés dans les anciens fonds marins indiquent que les océans grouillaient jadis de prédateurs reptiles, comme le plésiosaure ou le mosasaure. Mais les fossiles ont d'autres choses à nous apprendre.

La nourriture de ces reptiles a aussi laissé des traces chimiques : dans leurs dents, leurs os et leurs tissus. Les chercheurs peuvent ainsi reconstituer les habitudes alimentaires des espèces éteintes en recherchant dans les fossiles des isotopes stables, qui ne se dégradent pas avec le temps.

L'élément chimique qui se prête particulièrement bien à cette analyse est le calcium, soit « environ 40 % de l'émail des rares dents fossiles dont nous disposons », indique Vincent Balter, géochimiste au Laboratoire de géologie de Lyon² (LGLTPE).

Des superprédateurs des mers

Des chercheurs du LGLTPE, du CR2P³ et de la branche Géologie de l'exportateur de phosphates marocain OCP⁴ ont uni leurs forces pour analyser les fossiles de seize vertébrés marins, extraits du bassin des Ganntour, au Maroc. Datant du Maastrichtien (-72 à -66 millions d'années), il s'agissait de fossiles de dents de poissons, de requins, de plésiosaures et de mosasaures.

Les dents des plésiosaures et des mosasaures recélaient des proportions d'isotopes stables comparables à celles des superprédateurs actuellement au sommet de la chaîne alimentaire marine, en particulier les grands requins blancs. « Ces reptiles anciens étaient donc des superprédateurs piscivores dans l'écosystème marin du Maastrichtien », observe Jeremy Martin, auteur principal de l'étude pour le LGLTPE. Or les quantités d'isotopes stables de calcium

dans leurs échantillons respectifs se sont aussi révélées identiques. Un indice indiscutable que les animaux trouvaient leur calcium dans la même nourriture. « Nous comprenons désormais qu'ils étaient en compétition les uns avec les autres », commentent Peggy Vincent et Nathalie Bardet, du CR2P.

Les scientifiques font de cette rivalité entre plésiosaures et mosasaures la clé de leur vulnérabilité : à la moindre raréfaction des espèces de poissons qu'ils

se disputaient, leur survie était engagée. Ce fut le cas à la fin du Crétacé, lorsque la majorité du plancton a disparu, durant l'épisode d'extinction massive. Les poissons se nourrissant de plancton se sont raréfiés, entraînant la disparition des reptiles.



© W. MIVRES/SP. COSMOS

▼ Au Crétacé, les océans grouillaient de prédateurs marins, tel ce mosasaure long de 17 mètres (vue d'artiste).

Une méthode inédite

« Si les mesures de compositions isotopiques sont monnaie courante en géologie, cela fait à peine dix ans que des laboratoires tentent de transposer ce savoir-faire en

biologie », note Emmanuelle Albalat, ingénieure d'études chargée du développement de nouveaux protocoles au LGLTPE. C'est d'ailleurs grâce à une méthode inédite, conçue avec ses collègues en 2014⁵, que cette étude sur les dents fossiles a pu être réalisée.

« Nous avons cherché à mesurer les isotopes du calcium, avec ce qu'on appelle un spectromètre de masse à source plasma et à multi-collection. Mais avant cela, il fallait réussir à obtenir un échantillon totalement pur, soit 100 % de l'élément, et rien d'autre », raconte-t-elle. Cette purification est faite par chromatographie par échanges d'ions, qui permet de séparer l'élément voulu – ici, le calcium – de tous les autres. « Cette méthode permet de réaliser des mesures d'une grande précision, qui pourront être comparées par d'autres équipes et faire ainsi avancer les mesures de composition isotopique des métaux en biologie », espère Emmanuelle Albalat. ■

1. « Calcium Isotopic Evidence for Vulnerable Marine Ecosystem Structure Prior to the K/Pg Extinction », J. E. Martin et al., *Current Biology*, 2017, vol. 27 (11) : 1641-1644. 2. Unité CNRS/ENS Lyon/Univ. Claude-Bernard. 3. Centre de recherche sur la paléobiodiversité et les paléoenvironnements (CNRS/UPMC Paris 6/MNHN). 4. Office chérifien des phosphates. 5. « A simplified protocol for measurement of Ca isotopes in biological samples », T. Tacail et al., *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2014, vol. 29 : 529-535.

Les archives Grothendieck, mine d'or pour les chercheurs

Mathématiques. Une partie des archives d'Alexandre Grothendieck, médaille Fields en 1966, a été mise en ligne par l'Imag. L'occasion d'explorer le travail et la vie d'un mathématicien majeur.

PAR MARTIN KOPPE

Si un scénariste essayait d'imaginer l'histoire la plus folle sur un génie des maths, il resterait bien en deçà du destin d'Alexandre Grothendieck. Né d'un père juif ukrainien et d'une mère allemande, des anarchistes engagés dans la guerre civile espagnole puis déportés dans les années 1940, Alexandre Grothendieck était encore apatride lorsqu'il reçut la médaille Fields en 1966. Récompense qu'il obtint pour sa refonte de la géométrie algébrique.

Loin de se limiter aux travaux académiques, Grothendieck milita pour les causes écologistes et pacifistes, quitte à refuser des prix et à démissionner d'institutions proches du ministère de la Défense. Il rédigea livres et revues sur ces sujets, ainsi que de la philosophie. À sa retraite en 1991, Grothendieck se retire du monde dans un petit village ariégeois. Il décède en 2014.

Dans les années 1990, il offrit une partie de ses archives à son ancien élève Jean Malgoire. Enseignant-chercheur à l'université de Montpellier, ce dernier a transmis le

fonds en 2010 à son établissement. 28 000 pages ont alors été numérisées et 18 000 pages ont été mises en ligne par l'Imag, l'Institut montpellierain Alexander-Grothendieck¹, le 10 mai 2017.

Si ce fonds concerne presque uniquement les mathématiques, 60 000 autres pages, touchant plutôt à des thèmes mystiques et philosophiques, ont quant à elles été léguées par testament à la BNF.

Jean-Michel Marin, directeur de l'Imag, s'enthousiasme du succès surprenant de ces archives. « Fin juin, notre site était déjà consulté par 40 000 utilisateurs uniques, qui ont téléchargé plusieurs téraoctets de données, dénombre-t-il. Or, seules quelques centaines de personnes dans le monde sont capables d'en analyser le contenu. »

Une difficulté qui ne rebute pas les profanes et les curieux, preuve s'il

en est de la fascination qu'exerce encore la figure de Grothendieck. Ces archives témoignent de la façon dont le mathématicien a procédé pour refondre la géométrie algébrique, et contiennent des travaux originaux qui touchent à d'autres domaines des mathématiques. Une mine d'or pour les chercheurs et leurs étudiants, mais un filon qui se mérite.

« Les travaux de Grothendieck sont difficiles à aborder dans des articles publiés, avoue Jean-Michel Marin. Ici la matière est brute, elle n'est pas rédigée pour être lue telle quelle. Travailler et déchiffrer manuscrits et tapuscrits réclame des compétences de thésards ou de postdocs. »

Bien que Grothendieck utilisât parfois le dos de feuilles volantes dont le contenu n'avait pas de rapport avec ses recherches – par exemple des documents administratifs –, les archives sont mises en ligne avec leurs faces recto et verso. Car ces documents non scientifiques peuvent aider les chercheurs à dater les travaux et les renseigner sur les lectures du mathématicien.

Dans le cadre d'un accord conclu avec sa famille, le fonds a été restitué à ses proches une fois numérisé et mis en ligne. L'accès libre et gratuit à ce trésor a donc pu être garanti grâce à l'Imag. Un colloque devrait d'ailleurs y être organisé d'ici quelques années, afin de mettre en commun les travaux tirés de ces archives et de mesurer leur impact sur les mathématiques. ■



Voir le site des archives :
» <https://grothendieck.umontpellier.fr>

Lire aussi notre article : « Disparition d'un génie des mathématiques » sur lejournel.cnrs.fr

1. CNRS/Université de Montpellier.

Des villes toujours plus grosses

PAR LAURE CAILLOCE

SOCIÉTÉS

Géographie. Les mégacités, ces villes de plus de dix millions d'habitants, sont aujourd'hui plus de trente dans le monde. Elles devraient être cinquante en 2050. Retour sur une tendance lourde et ses conséquences sur nos modes de vie.

Depuis cinquante ans, le mouvement d'urbanisation de la planète s'est fortement accéléré, et le nombre de citadins a officiellement dépassé 50 % de la population mondiale. Dans le même temps, on a assisté à l'émergence d'une forme nouvelle de villes : les mégacités, des mastodontes urbains de plus de 10 millions d'habitants... au minimum. Si Paris et Londres avoisinent les 12 millions d'habitants, l'agglomération de Shanghai flirterait aujourd'hui avec les 80 millions. Bien que l'ordre du classement divise les chercheurs, on trouve parmi les dix plus grandes villes du monde Shanghai, Guangzhou (Canton), Tokyo, Delhi et Mumbai (Bombay), mais aussi New-York avec ses 25 millions d'habitants.

Le casse-tête de la taille

« L'urbanisation est si intense qu'elle a brouillé les cartes, raconte Michel Lussault, géographe au laboratoire Environnement, ville, société¹. On ne sait plus où commencent et où finissent des villes comme Mexico, Tokyo ou Shanghai, qui aujourd'hui n'ont plus rien à voir avec la cité d'origine... » Sans compter que certains pays surestiment ou sous-estiment volontairement la taille de ces cités, pour des raisons géopolitiques ou l'obtention d'aides internationales. En théorie, c'est la continuité du bâti qui fait la ville – avec une distance généralement admise de 200 mètres

maximum entre deux bâtiments. Mais le découpage administratif et les statistiques officielles fournies par les pays obéissent à une tout autre logique... Administrativement parlant, Paris se cantonne ainsi à la zone à l'intérieur du périphérique et totalise 2 millions d'habitants seulement.

Pour contourner la difficulté, le géographe François Moriconi-Ebrard et ses collègues du laboratoire Espace² ont mis au point une méthode de calcul universelle : « On utilise les images satellite pour délimiter le périmètre de la ville, et on croise avec la cartographie du recensement, en utilisant les plus petites unités communiquées par chaque État », explique le chercheur, qui a employé cette méthode pour hisser Shanghai sur la première marche du podium. Toutes les mesures sont conservées dans la base de données mondiale Géopolis, dans laquelle se profilent déjà les mégacités de demain. Car la tendance au gigantisme urbain ne fait que commencer ! Au nombre d'une trentaine aujourd'hui, les mégacités devraient être cinquante d'ici à 2050.

C'est plutôt du côté de l'Asie et de l'Afrique qu'il faut guetter leur émergence. « La Chine est le pays le plus peuplé au monde, il faut s'attendre à ce qu'elle ait des mégacités en proportion de sa population », prédit Denise Pumain, géographe au laboratoire Géographie-cités³. D'autant que, leur obligation de détenir un



▼ Avec ses 80 millions d'habitants, Shanghai serait aujourd'hui la plus grande ville du monde.

« passeport urbain » ayant été assoupli, les Chinois peuvent désormais s'installer (presque) où bon leur semble... « L'Inde et l'Afrique devraient être les prochaines zones d'explosion urbaine », poursuit François Moriconi-Ebrard. Déjà au rang de mégacités, Lagos (Nigéria) et Le Caire (Égypte) continuent de grossir, tandis que Kinshasa (République démocratique du Congo) ou Onitsha (Nigeria) pourraient vite passer la barre des 10 millions... « C'est aussi le cas d'Addis-Abeba, en Éthiopie, qui explose littéralement sous l'effet des investissements chinois », ajoute-t-il.

Des lieux d'innovation

Quant à savoir si cette explosion urbaine est une bonne nouvelle... Synonymes pour le public de pollution ou d'insécurité, les mégacités sont vues d'un œil moins sévère par les géographes : « Aujourd'hui, les mégapoles ne sont plus des mangeuses d'hommes. Dans les pays les plus pauvres, les conditions de vie y

1. Unité CNRS/ENS Lyon/Univ. Jean-Moulin/Univ. Lumière/Univ. Jean-Monnet/ENTPE/Ensal/École des mines de Saint-Étienne/Insa Lyon. 2. Études des structures, des processus d'adaptation et des changements de l'espace (CNRS/Univ. Sophia-Antipolis/Aix-Marseille Université/Univ. Avignon-Pays de Vaucluse). 3. Unité CNRS/Univ. Panthéon-Sorbonne/Univ. Paris-Diderot.



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



de conquête de droits », renchérit Michel Lussault. Ainsi, l'urbanisation des femmes fait le plus souvent baisser le taux de fécondité et augmente leur taux de scolarisation ; dans ces espaces ouverts, elles échappent en effet plus facilement à l'ordre patriarcal. Et même si le taux de pauvreté en ville reste très important, la pauvreté absolue tend à diminuer grâce aux nombreuses opportunités que la ville fournit : petits boulots, vente à la sauvette, etc.

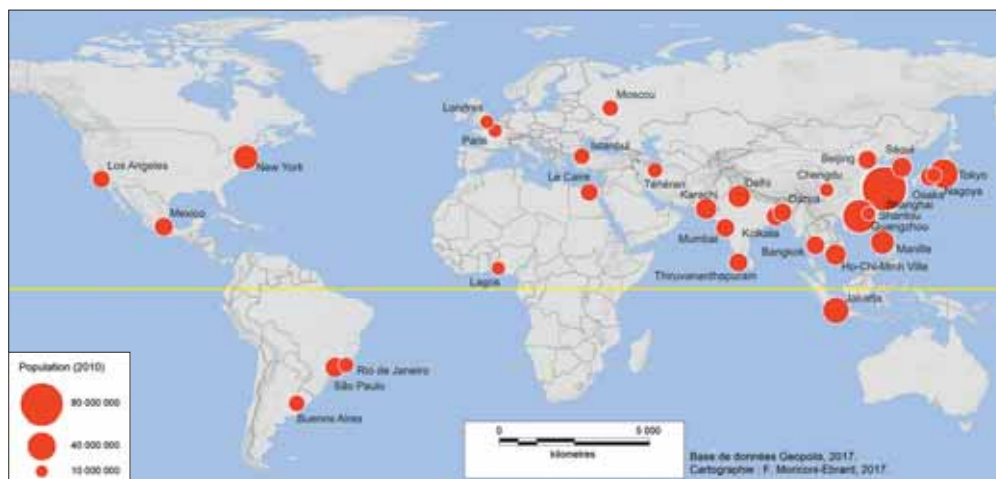
Des inégalités croissantes

Plus préoccupant est l'accroissement des inégalités sociales et des tensions qu'elles engendrent. « Plus les villes sont grandes, plus les inégalités de revenus sont importantes, souligne Denise Pumain. Le capitalisme international qui développe des bureaux attire parallèlement une quantité d'emplois peu qualifiés, pour l'entretien, le ménage, etc. » Un phénomène

Shanghai ou Mexico, les émissions sont telles que le ciel est constamment laiteux – sont devenus la préoccupation première des géantes urbaines. Autre défi majeur : celui du réchauffement climatique, particulièrement prégnant avec le phénomène des « îlots de chaleur ». « Le cœur minéral des villes est beaucoup plus chaud que leur périphérie, explique Michel Lussault. Dans une ville comme Paris, par exemple, il fait en moyenne 2 °C de plus qu'en banlieue, mais ce différentiel peut monter jusqu'à 5 °C en cas de canicule. »

Si les problèmes auxquels elles sont confrontées sont à la hauteur de leur taille, les mégapoles veulent aussi devenir de véritables espaces de solution. Une diplomatie des grandes villes de la planète est d'ailleurs en train d'émerger, qui court-circuite les traditionnelles discussions interétatiques. Sur la question climatique et l'écologie, le réseau C40 (Cities Climate Leadership Group) fédère les 90 plus grandes métropoles du monde. Plusieurs fois par an, les élus de ce réseau réfléchissent ensemble sur les transports, l'alimentation, la voirie, les migrations... Après la COP 21, les villes du C40 se sont même engagées à dépasser les objectifs fixés en matière d'émissions de CO₂. « Les mégapoles assurent qu'elles peuvent faire mieux que leurs États, car elles sont moins contraintes qu'eux au plan diplomatique », commente Michel Lussault.

Avec les mégacités, un nouvel ordre géopolitique est en train d'émerger. Ces villes-mondes tendent à constituer de vrais pôles de stabilité, qui échappent en partie aux tensions diplomatiques entre pays. « C'est indéniablement un facteur de paix. Mais le risque est grand qu'elles deviennent complètement hors-sol et se coupent de leur territoire de proximité », s'inquiète Michel Lussault. Et que Paris échange davantage avec Londres ou New York qu'avec Lille ou Tours... II



sont nettement meilleures que dans les campagnes, note Denise Pumain. Les installations sanitaires sont meilleures, on compte moins de mortalité infantile. De la même manière, la qualification des populations tend à augmenter avec la taille des villes. »

« Lieux de l'innovation par excellence – économique, technologique, culturelle, mais aussi sociale –, les mégacités sont de véritables espaces

▼ Carte des agglomérations urbaines de plus de 10 millions d'habitants (2010).

qui se traduit aussi spatialement, avec une séparation toujours plus marquée entre quartiers riches et pauvres. La multiplication des « gated communities », ces quartiers aisés fermés au reste de la ville, en est l'expression la plus forte – à l'image des tours d'Alphaville à São Paulo.

Par ailleurs, les transports et les pollutions engendrées par les embouteillages quotidiens – à Pékin,

Quelles réparations pour l'esclavage ?

SOCIÉTÉS



L'historienne Myriam Cottias revient sur le sujet des réparations liées à l'esclavage : celles que des associations réclament aujourd'hui pour les descendants d'esclaves, mais aussi les indemnités accordées aux propriétaires esclavagistes au XIX^e siècle, au moment de l'abolition...

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURE CAILLOCE

Depuis une dizaine d'années, la question des réparations, objet du projet « Repairs » que vous coordonnez, est devenue centrale.

Myriam Cottias¹ : En effet. Que ce soit en Amérique du Nord et du Sud, aux Antilles, en Afrique ou dans l'océan Indien, cette question est aujourd'hui au cœur des revendications des descendants des esclaves déportés depuis l'Afrique. En France, en 2005, des associations fédérées au sein du Mouvement international des réparations ont ainsi réclamé 200 milliards d'euros à l'État français au titre de la compensation de la période de l'esclavage. Une demande jugée alors irrecevable, les juges estimant qu'il était impossible d'établir le montant des dommages pour des faits aussi anciens.

La loi Taubira de 2001 reconnaît l'esclavage comme un crime contre l'humanité et demande que cette période de l'histoire nationale soit enseignée de l'école primaire au lycée. Va-t-elle assez loin ?

M. C. : Cette loi est une première dans le monde. Son objectif était de mettre fin à un siècle et demi d'oubli, durant lequel l'esclavage a été complètement passé sous silence par les institutions. Le problème, c'est qu'aujourd'hui encore, il reste des traces de cette période dans nos rapports sociaux et que le passé ne cesse de



L'esclavage, du souvenir à la mémoire, par Christine Chivallon, éditions Karthala, collection « Esclaves », août 2012, 624 p., 36 €.

▲ «L'Abolition de l'esclavage dans les colonies françaises en 1848», peinture de François-Auguste Biard (1798-1882).

ressurgir... Sans pousser forcément dans le sens des compensations financières, il faut aller plus loin dans le travail de mémoire collective et sortir du seul aspect moralisateur et accusateur. Les lieux dédiés à cette histoire et qui permettent d'y réfléchir (mémoriaux, salles de musée...) sont trop peu nombreux. Pourquoi ne pas imaginer un espace comme le Musée national afro-américain, inauguré par Barack Obama à Washington en 2016 ?

Si les esclaves ou leurs descendants n'ont jamais été indemnisés pour les crimes subis, les propriétaires esclavagistes ont, eux, touché des indemnités après l'abolition. C'est difficile à comprendre aujourd'hui !

M. C. : Après l'abolition, en 1848, des indemnités ont été versées aux propriétaires d'esclaves des Antilles, de Maurice et de la Réunion, du Sénégal et de Nosy Be à Madagascar, afin de compenser les pertes économiques que la fin de l'esclavage entraînait pour eux. Victor Schœlcher, le père de l'abolition, n'y était pas favorable et avait, lui, imaginé un système où les « esclavisés » seraient indemnisés... Mais il s'est rangé au parti de l'efficacité : les propriétaires esclavagistes avaient un vrai pouvoir de nuisance. Il a choisi de leur donner satisfaction, pour que l'abolition soit effective au plus vite.

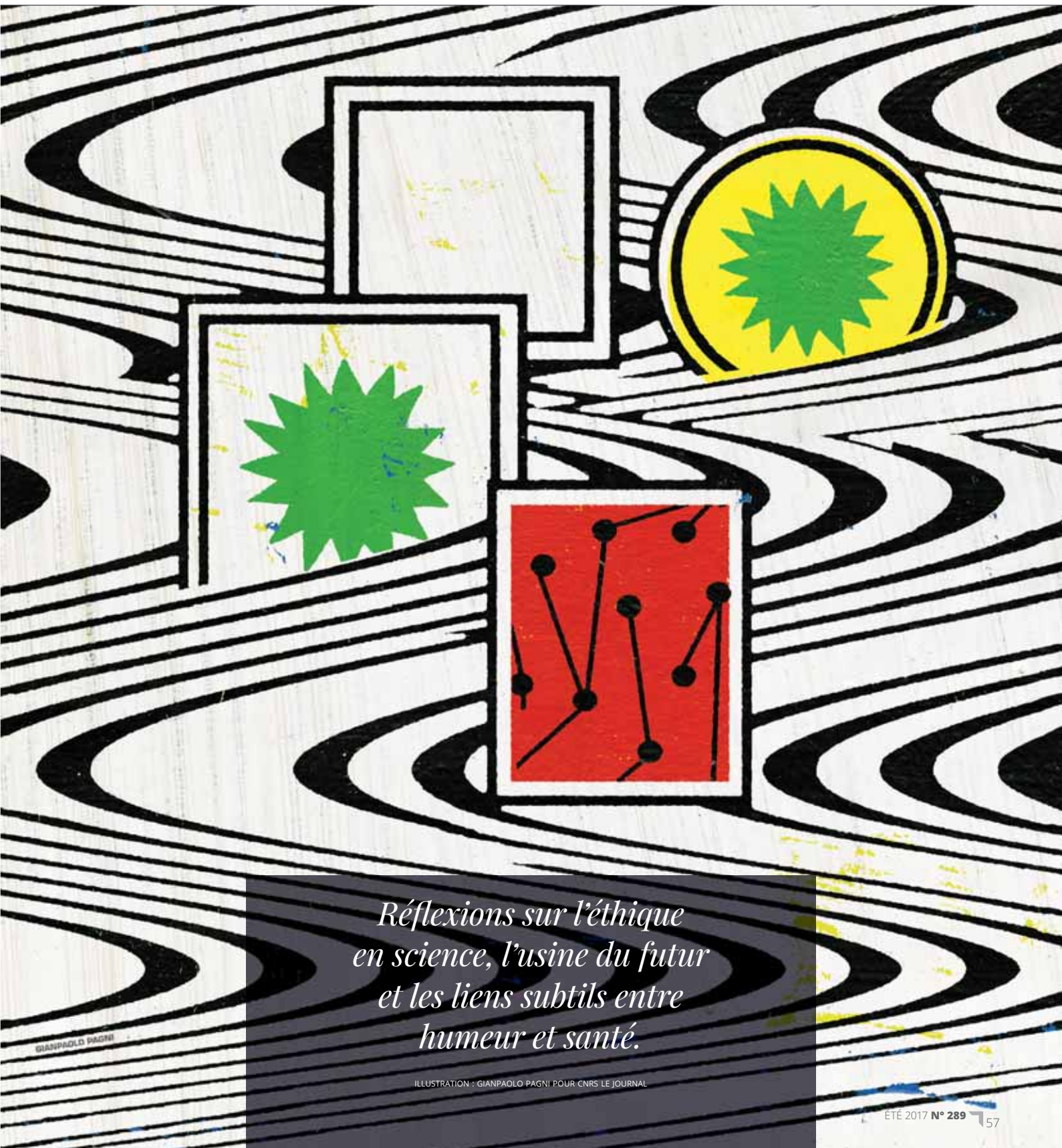
Au Centre international de recherches sur les esclavages, nous sommes d'ailleurs en train de constituer une base de données des indemnités accordées aux propriétaires dans tous les territoires concernés : accessible à tous, elle comportera le nom des personnes indemnisées, leur statut et le montant de l'indemnité reçue. On a tendance à voir l'esclavage sous le seul prisme de l'opposition raciale blanc-noir, mais nous constatons déjà que les choses ne sont pas aussi binaires qu'on l'imagine parfois : ainsi, on retrouve des « libres de couleur » parmi les personnes indemnisées – ces esclaves affranchis étaient à leur tour devenus propriétaires d'esclaves. L'esclavage était aussi un système économique et social. II



© F.A. BIARD/DR

1. Directrice du Centre international de recherches sur les esclavages et les post-esclavages (Ciresc) – devenu en janvier 2017 une unité de recherche et de service du CNRS (USR) – et chercheuse au LC2S (CNRS/Univ. des Antilles).

LES IDÉES



*Réflexions sur l'éthique
en science, l'usine du futur
et les liens subtils entre
humeur et santé.*

ILLUSTRATION : GIANPAOLO PAGNI POUR CNRS LE JOURNAL

Les nouveaux chantiers du Comité d'éthique

SOCIÉTÉS

Entretien. Réfléchir aux conséquences éthiques du développement des sciences : telle est la tâche assignée aux sages du Comité d'éthique du CNRS. Quelles

orientations son nouveau président souhaite-t-il donner à cette instance ? Les réponses du chercheur en intelligence artificielle Jean-Gabriel Ganascia.



© L. ALLORGE

PROPOS RECUEILLIS PAR PHILIPPE TESTARD-VAILLANT

Vous avez été nommé en 2016 à la tête du Comité d'éthique du CNRS (Comets). Quel est le rôle exact de ce comité ?

Jean-Gabriel Ganascia¹ : La mission du Comets, dont la création remonte à 1994, est de conduire des réflexions sur les conséquences sociales et morales du développement des sciences et de leurs applications pratiques, ainsi que sur les principes qui doivent régir le comportement des personnels du CNRS et le fonctionnement des laboratoires. Ce comité, dont les avis sont publics et qui tire sa force des seuls arguments qu'il expose, est purement consultatif. Il ne prend pas de décisions exécutoires, n'arbitre pas les controverses scientifiques, ne s'érige pas en tribunal pour les cas particuliers qui peuvent lui être soumis... Le Comets, par ailleurs, est indépendant : il peut s'autosaisir de tout sujet dont il souhaite étudier les implications éthiques.

Comment lutter contre les inconduites scientifiques ?

J.-G. G. : Le Comets s'est toujours beaucoup – et très efficacement – soucié des questions d'intégrité scientifique. Au cours de la précédente mandature, il a notamment contribué à l'élaboration de la Charte nationale de

déontologie des métiers de la recherche, et à celle du « guide » adopté en novembre 2016 par la Conférence des présidents d'université. Il me semble aujourd'hui nécessaire, entre autres, de mieux préciser les frontières de la notion de plagiat, tant celle-ci est multiforme. Dans les disciplines littéraires ou les sciences humaines, par exemple, la pratique du « copier-coller » est inadmissible. En revanche, dans les sciences dures, qui accordent beaucoup moins d'importance à l'écrit, le réemploi d'éléments textuels est tolérable, à condition naturellement de citer ses sources et de restreindre cette appropriation induite à la formulation d'idées générales.

La liberté de la recherche figure aussi parmi les grands sujets que vous comptez explorer...

J.-G. G. : En effet ! La liberté motive les chercheurs. Elle fait l'attrait de ce métier et c'est aussi une condition de sa fécondité. Imposer des cadres trop contraignants bride l'innovation, le « nouveau » étant, par nature, ce qui échappe à la prévision, à la planification. Toutefois, la part du financement sur projet de la recherche n'a cessé d'augmenter au cours des dernières années. Cette évolution soulève une question capitale : les chercheurs sont-ils toujours libres de choisir leurs sujets d'étude, de défricher des pistes inédites, d'aller au bout de leurs idées quitte à ne rien trouver ou trouver autre chose..., ou sont-ils exagérément tenus de répondre aux demandes formulées par les pouvoirs en place ? Se pencher sur l'autonomie à donner aux acteurs de la recherche amène également à questionner la légitimité de travaux potentiellement néfastes pour l'humanité, comme la géo-ingénierie qui se propose de manipuler le climat. Autrement dit, certaines recherches sont-elles trop dangereuses pour être poursuivies ? Enfin, la science participative et les débats citoyens sur la stratégie scientifique sont utiles et nécessaires dans une démocratie. Mais la démarche « bottom-up² » ne risque-t-elle pas d'entraver

1. Professeur d'informatique à l'université Pierre-et-Marie-Curie et membre senior de l'Institut universitaire de France. 2. Une démarche « bottom-up » (« de bas en haut ») ou ascendante consiste à partir de la base puis à faire remonter les données vers l'organisation centrale.



la liberté des chercheurs et de provoquer l'abandon de recherches incompréhensibles au grand public et pourtant prometteuses ? Il faut en débattre.

Autre sujet épineux : la situation des chercheurs qui travaillent dans des pays en guerre et/ou bafouant les droits humains...

J.-G. G. : Il est évidemment impossible à ces personnels d'ignorer la tragédie humaine qui frappe le pays où ils sont en poste. La tension éthique, dans ce cas, est très forte. Quelle est la bonne attitude à adopter ? Les chercheurs doivent-ils rester sur place, au risque de paraître cautionner un régime autoritaire qui emprisonne ses propres chercheurs ou les oblige à s'exiler ? Faut-il, au contraire, qu'ils interrompent leur mission, sachant que les archéologues européens envoyés en Syrie ou en Irak, par exemple, font un travail remarquable pour essayer de prévenir, de limiter et de réparer les dégâts causés au patrimoine culturel de la région ? Nous n'avons pas la réponse à ces questions. Elles retiennent toute l'attention du Comets, mais il ne nous appartient pas de définir la politique scientifique du CNRS.

De nombreux chercheurs publics sont favorables au principe d'ouverture des données au nom d'un idéal de partage et d'échange entre pairs. Qu'en pensez-vous ?

J.-G. G. : Le partage des données scientifiques répond au besoin d'échanger le plus rapidement possible des résultats et de favoriser ainsi de nouvelles découvertes. La plupart des grands organismes de recherche, dont le CNRS, ont signé la Déclaration de Berlin de 2003 sur le libre accès à la connaissance, dans toutes les sciences. Cela dit, cette mise en commun généralisée des connaissances peut avoir des effets délétères. Tout dépend, en réalité, des disciplines. Certaines matières ne sont pas au cœur d'enjeux industriels et/ou commerciaux majeurs, ne génèrent pas de contenus touchant la vie privée ou la sécurité nationale... Il n'y a aucune raison de limiter

la circulation rapide et ouverte des données dans ces domaines. En revanche, les informations relatives à la santé, comme en produisent beaucoup les sciences médicales et parfois les sciences humaines, sont sensibles parce que susceptibles d'aboutir à l'identification de personnes. C'est pourquoi il importe de dresser une typologie des différentes catégories de données de recherche afin d'en préciser le statut et de garantir un partage raisonné, équitable, de ces contenus.

En février, le Parlement européen a demandé à la Commission européenne de définir des normes juridiques et éthiques applicables aux robots. Les drones, les robots industriels, les robots médicaux et autres voitures sans chauffeur, appelés à remplacer de plus en plus les humains dans certaines tâches, doivent-ils devenir des sujets de droit ?

J.-G. G. : Pour régler les problèmes de responsabilité civile ou pénale posés par les robots en cas d'accident ou de dysfonctionnement, les eurodéputés suggèrent d'imposer aux détenteurs de ces machines la souscription d'une assurance spécifique et la création d'un fonds d'indemnisation des victimes. Surtout, à plus long terme, la résolution adoptée par le Parlement européen propose de faire des « robots autonomes les plus sophistiqués » des personnes électroniques « avec des droits et des obligations ». Est-il opportun de conférer une personnalité juridique aux robots ? Cela demande à être discuté, tout comme l'idée d'un impôt sur le travail des robots pour financer la protection sociale des travailleurs. Le Comets a du pain sur la planche... II

“Certaines recherches sont-elles trop dangereuses pour être poursuivies?”



Lire l'intégralité de l'entretien sur <http://cnrsinfo.cnrs.fr>



Pourquoi les humeurs jouent sur notre santé

Jean-Philippe Herbeuval, directeur de recherche CNRS au laboratoire LCBPT¹
Nikaia Smith, postdoctorante à l'université Paris-Descartes

Nous savons depuis peu que les neurones ne sont pas restreints au cerveau, mais sont aussi présents en très grand nombre (plus de 200 millions) dans l'intestin. Or, celui-ci se trouve être également notre réservoir de cellules immunitaires. Ces deux familles de cellules communiquent-elles entre elles ? Instinctivement, nous serions tentés de répondre par l'affirmative... Car nous l'observons tous de manière empirique au quotidien : nos humeurs affectent nos défenses immunitaires et nous tombons plus facilement malades lors de périodes de stress intense. Des découvertes récentes sont venues confirmer ce lien étroit entre système nerveux et système immunitaire. Mais pour bien comprendre ce qui se joue ici, penchons-nous d'abord sur leur mode de communication respectif.

Les neurones communiquent entre eux grâce à des molécules appelées neurotransmetteurs, dont l'une des plus connues est la sérotonine. La sérotonine est impliquée dans la régulation de fonctions telles que le cycle du sommeil, la douleur, l'anxiété, les comportements alimentaires et sexuels, ainsi que l'inflammation. Elle est sécrétée par les neurones, mais également par les cellules du système immunitaire : plus de 95 % de la sérotonine n'est d'ailleurs pas produite par le cerveau mais par... l'intestin.

De leur côté, les cellules immunitaires communiquent entre elles en sécrétant des molécules appelées cytokines. Parmi ces cytokines, un sous-groupe est en avant-garde dans la réponse contre les infections : les interférons. Ce sont des protéines antivirales découvertes il y a plus de soixante ans. Ces agents extrêmement puissants sont capables, lorsqu'ils sont produits en réponse à une infection virale ou bactérienne, d'induire l'activation de plus de 400 gènes !

Présents chez la plupart des vertébrés, les interférons sont les véritables gardiens de notre immunité. De nombreuses cellules infectées peuvent produire des interférons, mais toujours en faible dose, ce qui ne permet pas d'expliquer les quantités importantes détectées chez les patients infectés. Il y a vingt ans, la découverte des cellules « professionnelles » de la production d'interférons, les cellules dendritiques plasmacytoïdes (pDC), allait révolutionner notre compréhension de la réponse antivirale. Ces cellules pDC sont de véritables sentinelles, patrouillant dans le corps à la recherche de pathogènes à éliminer. Lorsqu'elles en détectent un, elles le détruisent et produisent de grandes quantités d'interférons. C'est un mécanisme a priori protecteur, mais qui peut devenir destructeur lorsque l'activation des cellules pDC persiste dans le temps, notamment dans le cas des maladies chroniques et auto-immunes.



Une fois par mois, retrouvez sur lejournal.cnrs.fr les Inédits du CNRS, des analyses scientifiques originales publiées en partenariat avec Libération.

Des perspectives thérapeutiques

Or, existe-t-il un lien entre les neurotransmetteurs de notre système nerveux et les interférons du système immunitaire ? Pour le savoir, nous étudions au laboratoire LCBPT la production des interférons par les cellules pDC. Plus particulièrement, nous nous sommes intéressés à l'effet des neurotransmetteurs lors de la réponse antivirale. Nous avons ainsi découvert que la sérotonine² est un puissant inhibiteur de la production d'interférons par les pDC humaines cultivées en

laboratoire, mais aussi *in vivo* chez des souris infectées par le virus de la grippe.

Nous avons voulu mieux comprendre cette action de la sérotonine sur les pDC, au niveau moléculaire. Nous avons ainsi découvert que ce neurotransmetteur se fixait à une protéine présente à la membrane des pDC : le récepteur de chimio-kines CXCR4. Ce récepteur, exprimé par de très nombreuses cellules du corps, est connu pour avoir diverses fonctions, notamment dans la migration des cellules immunitaires et cancéreuses, dans la croissance des neurones, et il est aussi utilisé par le VIH pour infecter les cellules. Nous sommes ainsi récemment parvenus à démontrer³ que la sérotonine se fixe sur les protéines CXCR4 présentes à la surface des pDC, ce qui entraîne l'arrêt de la production des interférons. Nous avons en quelque sorte découvert le bouton « on/off » de la production d'interférons : le récepteur CXCR4.

Cette découverte ouvre d'importantes perspectives thérapeutiques. En ciblant CXCR4, nous pourrions réduire la production d'interférons dans les maladies chroniques et auto-immunes, pour lesquelles la sécrétion constante d'interférons est responsable de la plupart des symptômes chez les patients.

En prouvant que les neurotransmetteurs sont capables de bloquer la production de molécules antivirales, ces résultats constituent une nouvelle étape dans la compréhension du dialogue entre système nerveux et système immunitaire. Cependant, de nombreuses questions restent à élucider : pourquoi le corps a-t-il prévu que des neurotransmetteurs puissent contrôler notre immunité antivirale ? La sécrétion de sérotonine en vue de bloquer les pDC a-t-elle des conséquences sur notre humeur, notre état de stress ? Le système immunitaire influence-t-il notre état psychique en faisant sécréter des neurotransmetteurs ? Toutes ces questions constitueront un enjeu majeur de recherche du XXI^e siècle. ||

 Lire l'intégralité du billet sur lejournal.cnrs.fr

1. Laboratoire de chimie et biochimie pharmacologiques et toxicologiques (CNRS/Univ. Paris-Descartes), équipe « Chimie et biologie, modélisation et immunologie pour la thérapie ». 2. C'est également le cas de l'histamine, un neurotransmetteur impliqué dans les allergies. 3. Cette étude, parue dans *Nature Communications* en février 2017, a été financée par l'ANRS, le Sidaction et la Fondation Paris-Descartes.

À lire

SOCIOLOGIE

Cet ouvrage collectif propose une immersion inédite dans l'univers du patronat français à travers 36 retranscriptions d'entretiens avec des dirigeants de tous horizons, du bâtiment au commerce. Témoignage après témoignage, du dirigeant de TPE à celui d'un groupe industriel, se dessine le portrait nuancé, loin des stéréotypes, d'une catégorie sociale finalement assez mal connue. « *Ce qui distingue les patrons les uns des autres est aussi significatif que ce qui les distingue des autres* », concluent les auteurs de cette enquête dense mais passionnante.

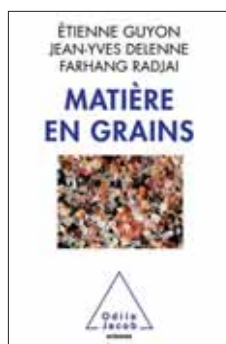
Patrons en France, Michel Offerlé (dir.), La Découverte, Hors collection sciences humaines, mai 2017, 664 p., 25 €



MATIÈRE

Les matériaux composés de petits grains, tel le sable, « *constituent avec l'eau la plus abondante espèce matérielle présente sur Terre* », expliquent les auteurs dans leur avant-propos. Malgré son omniprésence, la forme granulaire a longtemps été négligée au profit des « *formes canoniques* » de la matière (gaz, solide, liquide). Chose révolue depuis une vingtaine d'années puisque les recherches se multiplient pour mettre au jour ou exploiter les étonnantes propriétés de ces matériaux en grains. Écrit par trois pointures du domaine, cet ouvrage constitue une synthèse intéressante sur ce sujet émergent, dont les applications s'étendent de la médecine à l'agronomie en passant par les matériaux de construction.

Matière en grains, Étienne Guyon, Jean-Yves Delenne, Farhang Radjai, Odile Jacob sciences, 334 p., avril 2017, 24,90 €



COMMUNICATION

Et si le désamour de l'Europe était avant tout un problème de communication ? La nouvelle livraison de la revue *Hermès* nous invite à explorer cette thèse, entre diagnostic et solutions, grâce aux contributions d'une quarantaine de scientifiques. Pour eux, plusieurs types d'« incommunications » – « *à l'intérieur de l'Europe des 28 ; entre Ouest et Est ; avec la façade sud de la Méditerranée ; et à l'intérieur même des États membres ou bien avec leur voisinage immédiat* » – se conjuguent pour faire obstacle au projet européen, « *la plus grande utopie politique, économique, culturelle de l'histoire du monde* » selon les mots de Dominique Wolton, directeur de la publication.

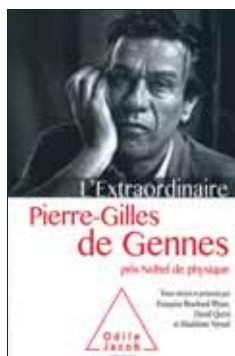
Les incommunications européennes, Joanna Nowicki, Luciana Radut-Gaghi et Gilles Rouet (coord.) *Hermès* n° 77, CNRS Éditions, mai 2017, 312 p., 25 €



PHYSIQUE

Dix ans après la disparition de Pierre-Gilles de Gennes, trois physiciens tentent de « *faire revivre le goût du partage, l'énergie et l'inlassable curiosité* » de ce scientifique de génie, en nous présentant une sélection de ses textes : leçons au Collège de France, entretiens avec des journalistes, lettres à ses confrères scientifiques telle celle, aussi courte que fascinante, adressée à Yves Coppens au sujet des bifaces préhistoriques. Entre sciences et trajectoire personnelle, entre dessins et textes inédits du prix Nobel 1991, ce livre permet de comprendre à quel point Pierre-Gilles de Gennes, « *autant que physicien, a pu être penseur de la physique* ».

L'extraordinaire Pierre-Gilles de Gennes, prix Nobel de physique, textes choisis et présentés par Françoise Brochard-Wyart, David Quéré et Madeleine Veyssié, Odile Jacob sciences, mai 2017, 224 p., 23,90 €

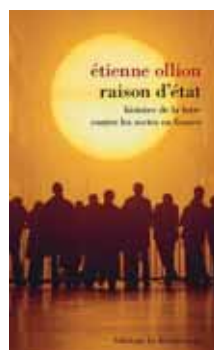


SOCIOLOGIE POLITIQUE

À partir du milieu des années 1990, la France met en place une « *politique résolue* » contre les sectes. Objet d'une relative unanimité dans nos frontières, celle-ci reste une exception internationale et va même susciter la controverse à l'étranger, provoquant parfois des tensions diplomatiques, notamment avec les États-Unis. Comment expliquer cette singularité française ? La tradition laïque du pays a souvent été avancée, mais l'auteur propose ici une autre analyse : si la réaction de l'État est aussi forte, c'est que ces groupes remettent en cause « *des normes qui ont,*

de longue date, reçu la caution des pouvoirs publics », que ce soit dans le domaine médical, de l'éducation ou encore de l'alimentation. L'enquête, menée entre 2007 et 2012, se nourrit de 80 entretiens et d'un travail de terrain dans des associations antisectes, mais aussi auprès d'une association qui, basée à Bruxelles, s'oppose à la politique française au nom de la défense des libertés religieuses.

Raison d'État. Histoire de la lutte contre les sectes en France, Étienne Ollion, Éditions La Découverte, juin 2017, 272 p., 19 €



À lire



NATURE

Quelles expériences avons-nous aujourd'hui de la nature ? Et comment ces expériences – ou leur absence ! – influencent-elles nos manières d'agir, de penser, de

gouverner ? La crise environnementale devrait nous faire réaliser les limites de certaines de nos pratiques collectives et nous pousser à articuler autrement nos relations avec la nature. Dans cet ouvrage dirigé par Cynthia Fleury et Anne-Caroline Prévot, des chercheurs venus de toutes les disciplines – des sciences politiques à la philosophie en passant par l'anthropologie, la psychologie, les neurosciences ou les sciences de l'éducation –, nous invitent à inventer de nouvelles visions du monde, relations sociales et gouvernances en vue de construire un monde plus durable.

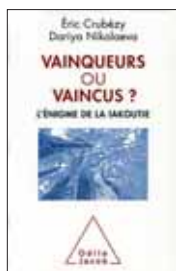
Le Souci de la nature. Apprendre, inventer, gouverner, Cynthia Fleury et Anne-Caroline Prévot (dir.), CNRS Éditions, avril 2017, 378 p., 25 €.

PEUPLES

Ce ne sont pas forcément les peuples les plus adaptés à l'environnement qui tiennent le plus longtemps, ni les sociétés les plus puissantes qui s'imposent au final. L'histoire du peuple iakoute, de Sibérie occidentale – l'une des régions les plus hostiles de la planète –, en est une bonne illustration : il a résisté à la rudesse du climat, à l'arrivée du puissant voisin russe, à la mondialisation et aux épidémies... Pour comprendre pourquoi ce peuple continue de subsister envers et contre tout, les auteurs Éric Crubézy et Dariya Nikolaeva mobilisent aussi bien l'archéologie ou l'histoire que la

génétique des populations.

Vainqueurs ou vaincus ? L'énigme de la Iakoutie, Éric Crubézy et Dariya Nikolaeva, Odile Jacob, mai 2017, 256 p., 23,90 €



RELIGION

Ignorée par la science politique il y a encore cinquante ans, la religion redevient un sujet d'étude à part entière. La résurgence du religieux un peu partout dans le monde depuis les années 1980, et plus spécifiquement sa politisation, ont conduit à une refondation de la proposition scientifique : contrairement à

ce qu'avaient énoncé Durkheim ou Weber, l'avancée de la modernité ne se traduit pas toujours par un recul de la religion. Certains scientifiques, à l'instar de Peter Berger, n'hésitent



d'ailleurs plus aujourd'hui à défendre l'idée selon laquelle le monde serait entré dans l'ère de la « désécularisation ». Plus de trente spécialistes livrent ici un éclairage instructif sur cette question majeure de notre temps.

L'Enjeu mondial. Religion et politique, Alain Dieckhoff et Philippe Portier (dir.), Les presses de SciencesPo, septembre 2017, 368 p., 29 €

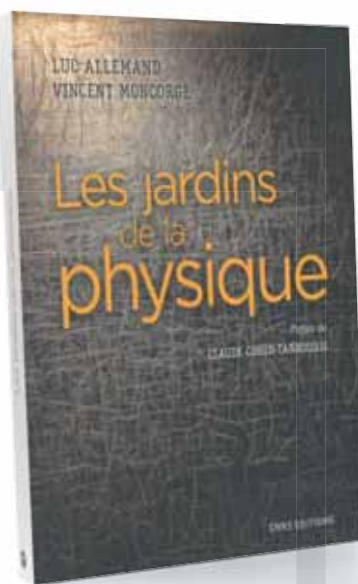
Quand la physique se met au vert

Quel point commun y a-t-il entre l'Institut d'études scientifiques de Cargèse, en Corse, et l'École de physique des Houches, dans les Alpes ? Ces lieux pittoresques, « perdus » en pleine nature, accueillent depuis les années 1950 des savants réputés du monde entier, qui viennent y partager les dernières avancées scientifiques avec de multiples élèves. Propices à la liberté de pensée, à la réflexion et aux échanges, ils permettent surtout d'explorer de nouvelles pistes pour la physique de demain. Ce livre agrémenté de nombreuses photographies offre aux profanes l'occasion de découvrir la façon dont cette communauté travaille, à l'écart du monde mais au plus près de sa compréhension.

Les Jardins de la physique, Luc Allemand et Vincent Moncorgé, CNRS Éditions, juillet 2017, 160 p., 20 €.



Lire aussi le point de vue de Bart van Tiggelen sur lejournale.cnrs.fr



COSMOS

Jean-Philippe Uzan, physicien théoricien spécialiste de la théorie du big bang, nous entraîne dans une véritable balade cosmique entre science et musique.

De l'Antiquité à la Renaissance, mathématiques, astronomie et musique n'ont formé qu'une seule discipline, et ont été étudiées aussi bien par Pythagore, Oresme, Kepler que par Newton. Aujourd'hui encore, on écoute autant que l'on observe l'Univers à travers l'étude des pulsars, des vibrations des étoiles ou des ondes gravitationnelles... Un livre poétique et instructif qui nous invite à réfléchir sur le découpage disciplinaire de la connaissance et sur son enseignement.

L'Harmonie secrète de l'Univers, Jean-Philippe Uzan, La ville brûle, septembre 2017, 192 p., 20 €.





© D. GOUPIY

Quels procédés pour l'usine de demain ?

Jack Legrand, chercheur au laboratoire Gépea¹



Lire l'intégralité du billet sur lejournal.cnrs.fr

Quel est le point commun entre la production de bière, d'eau potable, d'essence, de pain, de shampoing et de vaccin ? Le génie des procédés !

Cette science de l'ingénieur, qui étudie les processus et procédés de transformation de la matière pour obtenir des produits en optimisant les ressources en matières premières et en énergie. La définition la plus exhaustive a été donnée par Jacques Villiermaux, ancien professeur de génie des procédés à Nancy, pour qui il s'agit de « l'ensemble des connaissances nécessaires pour concevoir, analyser, développer, construire et faire fonctionner d'une manière optimale des procédés dans lesquels la matière change de forme, d'état d'agrégation ou de dispersion, d'état physique ou de propriétés physico-chimiques, de nature chimique. » Aujourd'hui, cette discipline doit relever de nombreux défis pour tendre vers une industrie plus propre, une société zéro déchet et une économie durable.

Un champ de plus en plus étendu

Le génie chimique a été intimement associé au développement de l'industrie pétrolière et pétrochimique après la Première Guerre mondiale. Ses méthodes et ses concepts se sont appliqués à pratiquement tous les secteurs industriels où interviennent des procédés de transformation : agroalimentaire, environnement, matériaux, métallurgie, pharmacie, textile, traitement des eaux, bioraffinerie, biotechnologie... L'élargissement des domaines d'application a conduit, en France, à substituer au vocable « génie chimique » celui de « génie des procédés », et à la création de la Société française de génie des procédés en 1988, sous l'impulsion de Jacques Villiermaux.

L'objectif principal des recherches menées dans les laboratoires de génie des

procédés est de développer les aspects méthodologiques et les interfaces avec la biochimie, la chimie, la biologie, la physique et les mathématiques appliquées pour traiter les problématiques industrielles. Au quotidien, les scientifiques tentent de répondre à de nombreuses questions : comment, avec tel ou tel processus, se transfère la matière, la chaleur, les quantités de mouvements ? Quelle est la thermodynamique des réactions qui s'y déroulent ? Comment interagissent les différents processus utilisés, à la fois dans le temps et dans l'espace ? Des questions d'autant plus complexes que le génie des procédés se penche sur un domaine aux dimensions de plus en plus étendues, allant des nano et micro-échelles aux échelles du réacteur, de l'usine et jusqu'aux écoparcs industriels.

Des échelles différentes... mais aussi des physiques différentes, car le génie des procédés s'intéresse à des objets réels, donc généralement complexes. Cela a conduit à développer des modèles raisonnés en fonction de l'objectif à atteindre. Avec, en ligne de mire, la conception, le contrôle et l'optimisation des équipements dans lesquels les matières premières sont transformées en produits, tels que des carburants automobiles ou aéronautiques, ou encore des produits laitiers.

Vers une bioéconomie

Le génie des procédés est au cœur du concept d'« usine du futur », qui préconise des usines plus propres et plus sûres en minimisant l'utilisation des ressources (énergie, ressources fossiles et minérales). Il s'agit en effet de développer des procédés robustes, flexibles et modulables qui permettent à la fois une adaptation aux nouvelles matières premières et une personnalisation des produits, comme des

produits alimentaires adaptés aux différentes catégories de la population.

Désormais, la productivité et la qualité des produits ne sont plus les seules composantes de la valeur à prendre en compte. Il faut par exemple évaluer en continu les impacts environnementaux du procédé et du produit.

La valorisation des déchets est un enjeu de l'économie circulaire qui intègre les fondements mêmes du génie des procédés : approche globale du système, bilan matière, bilan énergie, optimisation, gestion des flux. Le développement de cette économie doit permettre de réduire le prélèvement des ressources, la production de déchets et la consommation d'énergie. Dès la conception d'un produit, il faut considérer ces déchets comme de nouvelles matières premières, afin de réintégrer une filière de production.

Pour l'alimentation, il s'agit de satisfaire les besoins croissants qu'entraîne l'augmentation de la population mondiale en trouvant de nouvelles sources de protéines (protéines végétales, insectes, microalgues...). Pour les secteurs non alimentaires de la chimie, de l'énergie et des matériaux, il s'agit de faire face à la raréfaction des ressources non renouvelables et de réduire les impacts environnementaux et l'empreinte carbone en substituant biomasse et matériaux recyclés aux matières premières d'origine fossile. Les chercheurs travaillent par exemple sur les procédés de production de biocarburants de troisième génération ou de biobitume réalisés à partir de microalgues².

Cette transition vers une bioéconomie aura des conséquences importantes sur les procédés de fabrication et l'organisation des filières industrielles de production. La gestion de la fin de vie et le recyclage des produits devront être repensés de manière globale afin de développer de nouvelles chaînes de valeur économiquement viables et durables. II

1. Laboratoire de génie des procédés, environnement, agroalimentaire (CNRS/Univ. Nantes/Oniris/Institut Mines-Télécom Atlantique). 2. Un tel biobitume a été fabriqué par des chercheurs des laboratoires Chimie et interdisciplinarité : synthèse, analyse, modélisation (CNRS/Université de Nantes), Gépea, Matériaux pour infrastructures de transports (Ifsttar), Conditions extrêmes et matériaux : haute température et irradiation (CNRS), en collaboration avec l'entreprise AlgoSource Technologies.



Joëlle Robert-Lamblin, directrice de recherche honoraire au CNRS

“Je me souviens...”

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURIANNE GEFFROY

...du séjour passé dans l'intimité de cette famille nomade tchouktche du Grand Nord sibérien. Il y avait Gregori, le brigadier responsable du troupeau de rennes, sa femme Dacha et leurs trois enfants Julia, Sacha et Givelik. C'était en 1993. Ils n'avaient jamais vu d'étrangers car leur yaranga¹, qui se déplace au rythme du troupeau, se trouvait dans une région isolée de la Tchoukotka jusque-là interdite d'accès par les Russes. Après une certaine méfiance, la confiance s'est installée et cette famille nous a montré avec fierté son mode d'existence. Nous avons dormi avec eux, partagé leur quotidien, découvert leurs coutumes et leur alimentation organisées autour du renne, qui est pour eux un animal

sacré. Ils nous ont même dévoilé certaines de leurs cérémonies. Nous avons été « parachutés » là avec un journaliste suisse, qui faisait la traduction du russe, et une femme médecin française, pour mener une expertise anthropologique et médicale sur les minorités isolées du Grand Nord sibérien². C'était une expérience exceptionnelle, une chance unique de pouvoir observer, de l'intérieur, la vie d'un peuple encore mal connu.”

PHOTO : FONDS PRIVÉ JOËLLE ROBERT-LAMBLIN



Lire notre entretien avec Joëlle Robert-Lamblin : « Les peuples de l'Arctique tiennent à leur héritage » sur lejournel.cnrs.fr

1. Habitat nomade traditionnel. 2. Expédition Transsibérien-Longines.





de Denis Guthleben,
historien au CNRS

Jean Rouch l'Africain

Il y a les centenaires à côté desquels on ne peut pas passer, et ceux qu'il ne faut pas manquer. Depuis trois ans, nous commémorons la Grande Guerre, ses terribles batailles, ses innombrables victimes. Le 31 mai 1917, alors que l'offensive du Chemin des Dames vient d'échouer sur un bilan catastrophique, un événement fait le bonheur d'un foyer français : la famille Rouch accueille un nouveau-né, le petit Jean. Une vie commence tandis que des millions d'autres s'éteignent. Une vie qui se lit comme un roman. Ou, pour mieux coller au personnage, qui se regarde comme un film...

Enfant du Pourquoi pas ?

Le père de Jean, Jules Rouch, est officier de marine, océanographe et météorologiste. Membre de l'expédition du *Pourquoi pas ?*, il a suivi le célèbre commandant Charcot à la découverte de l'Antarctique, avant la guerre. Sa mère, Luce, est la sœur du naturaliste de l'expédition, Louis Gain. Après leur retour en France, Louis présente Luce à Jules, et l'on imagine ce qui arrive : longtemps après encore, Jean Rouch se présentera comme « *le fils du Pourquoi pas ?* »...

La suite semble plus conventionnelle. Jean naît alors que son père est affecté au service météorologique aux Armées, et, en grandissant, montre de bonnes aptitudes pour les sciences exactes. Elles le conduiront à décrocher un baccalauréat de mathématiques élémentaires, à exceller dans les classes préparatoires et à intégrer, en 1937, l'École des ponts et chaussées. Une voie est tracée : Jean sera ingénieur. Sauf que le jeune homme, bercé par les récits d'exploration, curieux de tout, cinéma, littérature, peinture, mais aussi ethnologie – il s'éclipse de l'école pour aller écouter les cours de Marcel Griaule au musée de l'Homme –, en dévie peu à peu.

Mobilisé en 1939, Jean Rouch rejoint une unité du génie qui, en mai 1940, reçoit pour mission de ralentir le rouleau compresseur de la Wehrmacht. Et le voilà contraint de participer à la destruction de ponts qu'il apprenait à construire quelques mois plus tôt ! La défaite et l'armistice le renvoient à ses études. En novembre 1941, son diplôme en poche, il devient « ingénieur des

travaux publics des colonies en Afrique occidentale ». À son arrivée sur le « continent noir », à Niamey (Niger), une nouvelle séquence de sa vie débute.

Des ponts entre les hommes

Si Jean Rouch avait déjà fait des incursions du côté des sciences humaines, la découverte de l'Afrique achève de le précipiter sur cette pente... fatale ! Un événement sert de catalyseur : en juillet 1942, plusieurs de ses manœuvres périssent foudroyés, et une cérémonie est organisée à Niamey, sous la conduite d'une prêtresse des génies du fleuve, pour purifier leurs corps. L'ingénieur contemple un monde qu'il n'avait fait qu'entrapercevoir sur les bancs du musée de l'Homme. La rencontre est si bouleversante qu'il ne parvient pas, tout d'abord, à la consigner. Il faudra un nouvel événement similaire pour l'inciter à rédiger sa première étude ethnographique.

Encouragé par Marcel Griaule et sa consœur Germaine Dieterlen, Jean Rouch poursuit ses travaux. Il publie plusieurs articles, jusqu'aux combats de la Libération auxquels il prend part, puis commence à bâtir, comme attaché de recherche au CNRS, l'œuvre audiovisuelle qui lui vaudra sa renommée. Peut-être attendiez-vous de cette chronique d'en apprendre davantage sur cette œuvre, composée d'au moins 140 films, d'*Au Pays des mages noirs* (1947) jusqu'au *Rêve plus fort que la mort* (2002), sans compter ceux qui demeurent inachevés ?

La réponse est dans la question : il ne s'agissait ici que de lever un tout petit coin du voile sur les débuts d'une aventure qui, si vous acceptez de la vivre, vous emmènera loin, très loin, et dont à coup sûr vous ne reviendrez pas indemnes. Les événements ne manquent pas, cette année, pour vous accompagner : rétrospectives, expositions, hommages se succèdent à Paris et en régions. Et notre établissement lui-même y participe de près, grâce à plusieurs initiatives de CNRS Images, qui gère le patrimoine audiovisuel que constitue aujourd'hui l'œuvre de Jean Rouch. Chemin faisant, vous constaterez que l'ingénieur a bien fini par en construire, des ponts entre les hommes... II

Une cérémonie,
à Niamey,
d'une prêtresse
des génies
du fleuve sert
de catalyseur.



Découvrir le dossier multimédia
« Jean Rouch, l'ethnologue-cinéaste » sur
<https://sagascience.com/jeanrouch>

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS #2

Entrez dans les coulisses
de la recherche

En vente en librairie
et Relay

200 pages / 12,50 €

Parution
du #3
le 2 novembre
2017



www.carnetsdescience-larevue.fr



CNRS EDITIONS

FORUM DU CNRS

CITÉ INTERNATIONALE
UNIVERSITAIRE
PARIS

17 BOULEVARD JOURDAN - PARIS 14^e

Que
reste-t-il à
découvrir
?

**25-26
NOV. 2017**
10H / 18H

**ENTRÉE
LIBRE**
SUR INSCRIPTION
leforum.cnrs.fr



#ForumCNRS



THE CONVERSATION FR



MAIRIE DE PARIS