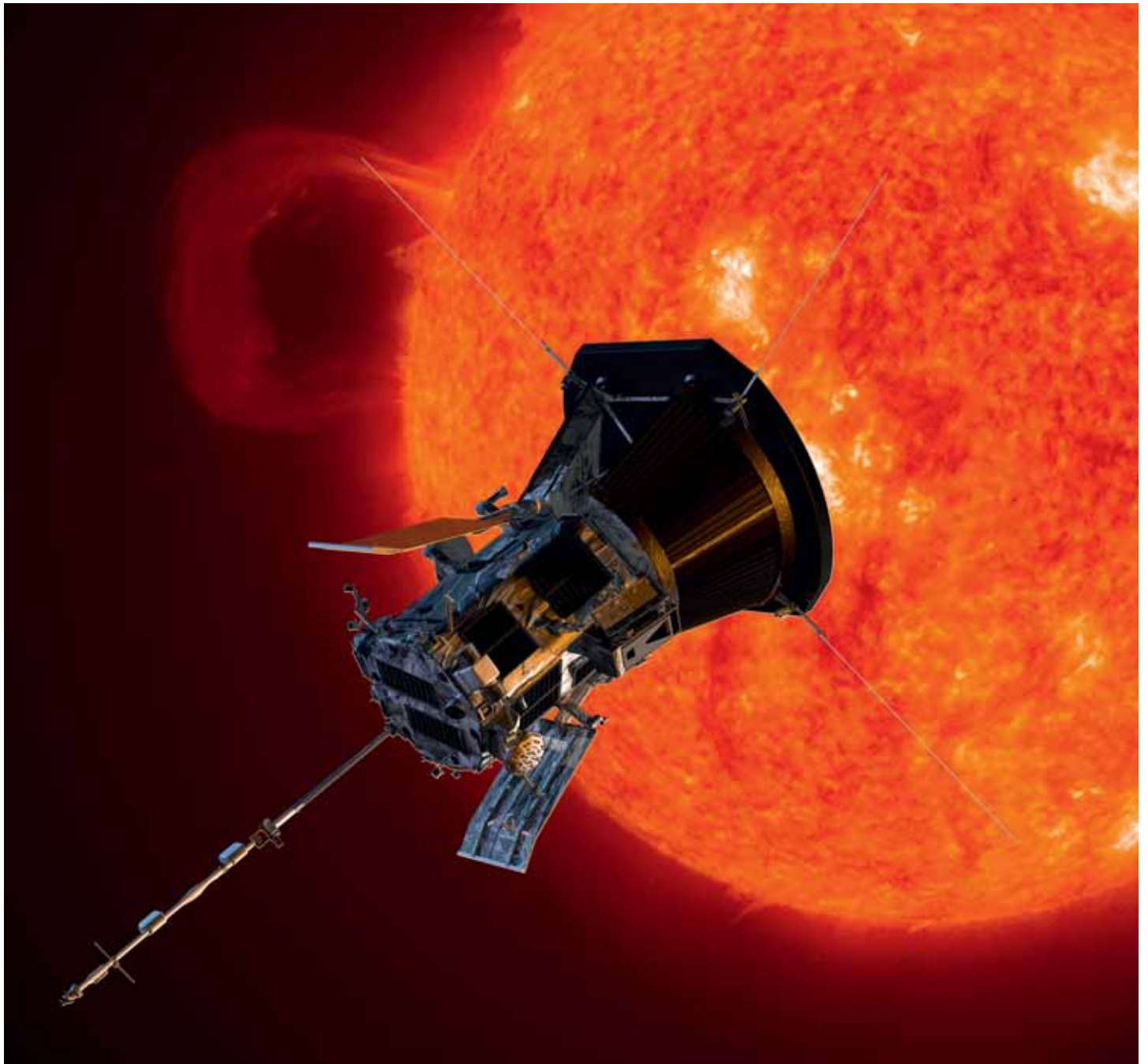


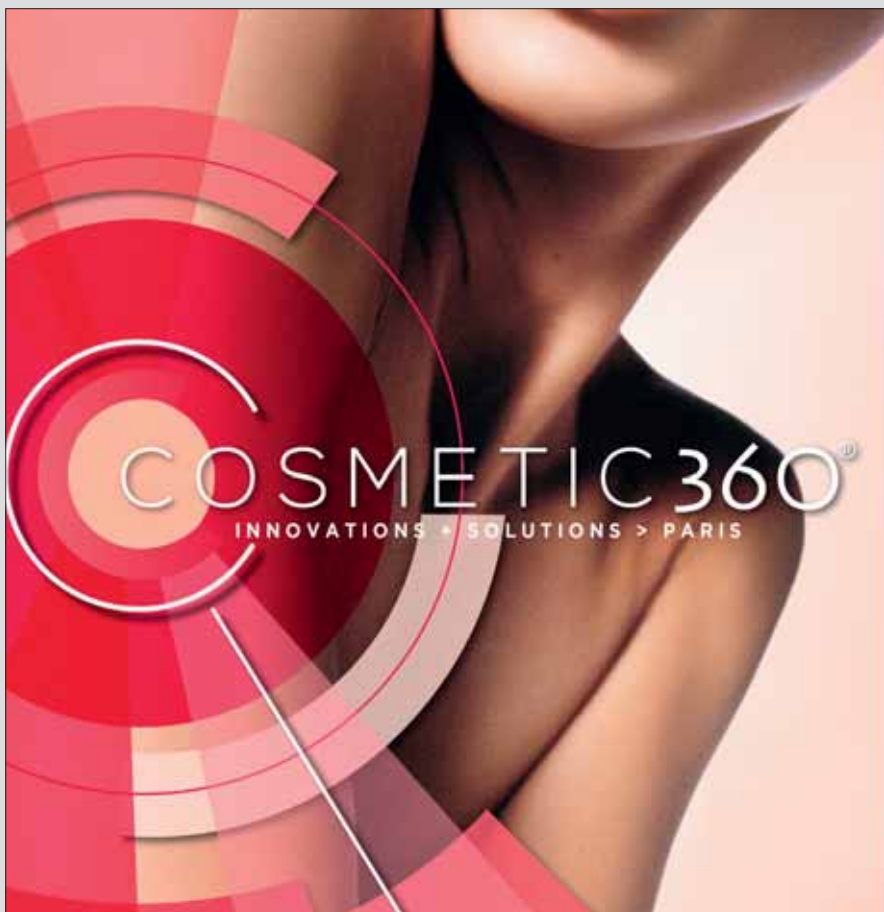


**LES UNITÉS
DE MESURE**
font leur
révolution

L'incroyable
inventaire
du patrimoine
afghan

Une mission
pour percer
**les secrets
du SOLEIL**

Des makers
aux fablabs,
la fabrique du
changement



LE SALON INTERNATIONAL
HAUT DE GAMME DE LA FILIÈRE
PARFUMERIE-COSMÉTIQUE

**17.18
OCT
2018**

PARIS
CARROUSEL
DU LOUVRE

Organisé par le pôle de
compétitivité Cosmetic Valley,
en partenariat avec le CNRS
www.cosmetic-360.com



YouTube

**La galaxie des chaînes
du CNRS s'étoffe...**



Après *Zeste de Science*, retrouvez reportages,
Lives, documentaires, débats, Talents et archives
sur la chaîne **CNRS, dépasser les frontières**

bit.ly/CNRSsurYT

Abonnez-vous!

Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

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

Antoine Petit

Directrice de la rédaction :

Brigitte Perucca

Directeur adjoint de la rédaction :

Fabrice Impériali

Rédacteur en chef :

Matthieu Ravaut

Rédactrice en chef adjointe :

Charline Zeitoun

Rédacteurs :

Anne-Sophie Boutaud, Laure Cailloce,

Yaroslav Pigenet, Laurence Stenvot

Assistante de la rédaction et fabrication :

Laurence Winter

Ont participé à ce numéro :

Stéphanie Belaud, Kheira Bettayeb,

Mathieu Grousson, Denis Guthleben,

Martin Koppe, Fui Lee Luk, Xavier Müller,

Saman Musacchio, Louise Mussat,

Émilie Silvoz, Philippe Testard-Vaillant

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.cnrs.fr>La reproduction intégrale ou partielle
des textes et des illustrations
doit faire obligatoirement l'objet d'une
demande auprès de la rédaction.En couverture : vue d'artiste
de la sonde Parker Solar Probe
se dirigeant vers le Soleil.

PHOTO : NASA/JOHNS HOPKINS APL/STEVE GRIBBEN

En cette rentrée 2018, force est de constater que, malgré des lois, des discours, des efforts et certaines avancées réelles, l'amélioration en matière de parité et d'égalité professionnelle entre les femmes et les hommes reste lente, y compris au CNRS. Loin d'être dépassé, le sujet est plus que jamais d'actualité, à une époque où l'on constate une stagnation dans le recrutement des jeunes chercheuses, voire une diminution du vivier dans certaines disciplines, où les modes de travail évoluent et de nouveaux domaines de recherche se développent très rapidement, comme l'intelligence artificielle.

En créant, dès 2001, la Mission pour la place des femmes, le CNRS a été le premier établissement d'enseignement supérieur et de recherche à mesurer pleinement les enjeux et à se doter d'une telle structure. Depuis, le pourcentage de chercheuses est passé de 30 % à 34 %, la parité est atteinte pour les médailles

d'argent et de bronze, la sensibilisation aux biais de genre a progressé. Toutefois, cela reste insuffisant. Les femmes continuent à être minoritaires dans les postes à responsabilité et trop peu visibles dans les conférences scientifiques. Par ailleurs, trop nombreux sont celles et ceux qui croient encore que certaines activités, disciplines et carrières – aussi bien chez les chercheurs que chez les ingénieurs et techniciens – seraient plus « masculines » que d'autres, jugées plus « féminines ».

Pour attirer davantage de jeunes femmes vers les carrières scientifiques et remédier à l'incapacité du CNRS à garantir à ses chercheuses une carrière équivalente à celle de ses chercheurs, le président-directeur général Antoine Petit a mis en place un comité parité-

égalité, chargé de proposer de nouvelles actions concrètes (*lire pages 52-53*). Attirer, recruter, garder, faire évoluer et promouvoir plus de femmes ne pourra toutefois se faire sans l'implication d'une multitude d'acteurs au sein du CNRS, et notamment des hommes, dont le rôle est essentiel pour faire réellement évoluer la situation.

Les enjeux ne doivent pas être sous-estimés. Les Nations unies ont fait de l'égalité entre les sexes un des objectifs du développement durable pour 2030. Des études montrent que le PNB d'un pays s'accroît avec le nombre de femmes qui y travaillent. Des entreprises ont constaté une corrélation directe entre le taux de féminisation de l'encadrement et l'amélioration de leurs performances sur le plan de la compétitivité, de la croissance et de l'image. Nul doute qu'une plus grande mixité dans les carrières scientifiques ne pourra que contribuer à mieux prendre en compte les attentes de la société et à accroître l'excellence scientifique, le potentiel d'innovation et l'attractivité du CNRS.

Élisabeth Kohler,
directrice de la Mission pour la place
des femmes au CNRS



© CNRS/DÉLÉGATION PMA



© H. RAGLIET

GRAND FORMAT

13

Mesures : le grand renversement	14
Hégra livre ses splendeurs	24
En mission dans le système solaire	30

10

Alessio Figalli,
médaillé Fields 2018

© ETH ZÜRICH/GIAN MARCO CASTELBERG

EN PERSONNE

5

Jean-Loup Puget, archéologue du cosmos	6
Damae Medical, la jeune pousse qui monte	8



Des fleurs connectées
pour étudier les abeilles

49

© M. LHOUREAU

EN ACTION

37

Plongée dans la meute de requins	38
La céramique sert à tout !	40
Le CNRS met en place le télétravail	42
Allergies : vers de nouvelles pistes thérapeutiques	44
C'est chaud une ville la nuit	46
Les enfants du marketing	48
Les promesses de l'hadronthérapie	50
Objectif parité	52
L'incroyable inventaire du patrimoine afghan	54
Recherche appartement du futur	56

58

Des makers aux fablabs,
la fabrique du changement

© ARTISANS ASYLUM

LES IDÉES

57

Armes létales autonomes : de quoi parle-t-on ?	60
La radiochimie à la croisée du vivant	63

CARNET DE BORD

Erik Gonthier nous raconte un souvenir de recherche	64
---	----

LA CHRONIQUE DE DENIS GUTHLEBEN

CNRS et Université : les noces de tourmaline	66
--	----

EN PERSONNE



*Un astronome qui brille,
un mathématicien couronné
à Rio et des scientifiques
qui innovent.*

ILLUSTRATION : SIMON LANDREIN POUR CNRS LE JOURNAL

Jean-Loup Puget, archéologue du cosmos

PAR LOUISE MUSSAT

Astrophysique. Directeur de recherche émérite au CNRS, Jean-Loup Puget recevra le 26 septembre à Hong Kong le prix Shaw en astronomie. Une récompense de taille pour ce scientifique à l'origine du satellite Planck, qui a fait progresser notre connaissance sur le rayonnement fossile de l'Univers.

Ce que je pense de Jean-Loup Puget ? C'est simple, il emballe tout le monde ! assure François-Xavier Désert, l'ancien doctorant de l'astrophysicien. Il a su réunir les énergies de nombreux chercheurs pour les faire avancer ensemble sur un grand projet : Planck. »

Jean-Loup Puget, directeur de recherche émérite au CNRS, à l'Institut d'astrophysique spatiale¹ et au département de physique de l'École normale supérieure (ENS), est en effet l'un des pères du célèbre satellite de l'Agence spatiale européenne (ESA). C'est pour cette paternité qu'il est cette année lauréat du prix Shaw – surnommé le « prix Nobel asiatique » – dans la catégorie cosmologie. Deux autres contributions majeures à la recherche astrophysique lui ont valu cette prestigieuse récompense. Il a, d'une part, mis en évidence le fond diffus infrarouge cosmique et, d'autre part, proposé les molécules hydrocarbures aromatiques comme composantes du milieu interstellaire. Membre de l'Académie des sciences, Jean-Loup Puget a également reçu en mai 2018 le prix Gruber de cosmologie aux côtés de Nazzareno Mandolesi et du consortium Planck.

Du Larousse à l'astronomie

« Mon père, un ancien infirmier, était né de parents domestiques. C'était un autodidacte qui se passionnait pour tout, qui achetait énormément de livres divers. Ce sont d'ailleurs mes lectures de l'encyclopédie Larousse qui m'ont poussé vers l'astronomie ! » Au lycée technique de Chalon-sur-Saône, il est vite repéré, vite envoyé dans une prépa scientifique à Lyon, vite admis à l'École des mines de Paris. Mais à une carrière d'ingénieur toute tracée, il choisit le chemin plus incertain – mais plus stimulant – de la recherche.

Quand il entre en première année à l'ENS de Cachan, en 1966, il est habité par la passion de la physique des

particules. « J'adorais la mécanique quantique, mais je n'étais pas assez doué en maths pour mener des recherches dans cette discipline. » Il obtient tout de même un DEA de haut vol en physique théorique à l'université d'Orsay. « Lors de mon stage de DEA, je travaillais sur un modèle qui tentait d'expliquer le déséquilibre observé entre la matière et l'antimatière. Bref, à 23 ans, je faisais déjà de la cosmologie ! »

Il n'est pas le seul à porter haut les couleurs de la famille. Son jeune frère Pascal mène de son côté un doctorat de chimie qui le conduira notamment à être chef de projet (côté ingénieur) sur différentes manipulations astronomiques. « Nos parents étaient ravis : on les amenait à la science, on leur "offrait" les études auxquelles ils n'avaient pas eu accès. Inconsciemment, nous devons voir ça comme une sorte de revanche sur la vie. »

Après le DEA, Jean-Loup embraye sur une thèse de troisième cycle qu'il boucle en une année. Son objectif : déterminer, à l'aide des données de l'accélérateur de particules du Cern, l'annihilation entre la matière et l'antimatière². Fort de ces travaux, il s'envole en 1970 pour le Goddard Space Center de la Nasa, avec pour mission de fouiller dans les données du satellite SAS-2 à la recherche des fameuses annihilations. C'est là qu'il va découvrir son actuel sujet de prédilection : les empreintes laissées dans le cosmos par les objets antédiluviens, les « fonds diffus », dans le jargon. Le plus célèbre d'entre tous, le fond diffus cosmologique, sorte d'écho du Big Bang sous forme d'ondes radio, fut découvert en 1965 par Arno Penzias et Robert Wilson.

Vers l'infrarouge lointain

Mais lors de son passage au Goddard Space Center, Jean-Loup Puget se penche sur d'autres lumières fossiles riches d'enseignements pour les archéologues du

1. Unité CNRS/Univ. Paris-Sud/Cnes. 2. « Dans un modèle d'Univers symétrique », sous la tutelle de Roland Omnès et d'Évry Schatzman.

Son parcours en 6 dates

- 1973** Entre au CNRS
- 1988** Reçoit la médaille d'argent du CNRS
- 1995** Devient responsable de l'instrument haute fréquence du satellite Planck
- 1998-2005** Dirige l'Institut d'astrophysique spatiale
- 2002** Entre à l'Académie des sciences
- 2018** Reçoit le prix Gruber de cosmologie et le prix Shaw en astronomie



© F. PLASCINIS PHOTO THÈQUE

cosmos. Notamment le fond diffus infrarouge, celui produit par la lumière de toutes les générations de galaxies – une fois absorbée par la poussière. Alors que l'existence de ce bruit de fond n'est encore que théorique, le chercheur et son équipe – dont François-Xavier Désert et François Boulanger – le détectent dans les données du satellite Cobe. « *Nous tenions là un outil précieux pour retracer l'histoire des étoiles, des galaxies, à travers l'émission des poussières contenues dans l'Univers.* »

Nous sommes en 1996 et la carrière de Jean-Loup Puget s'envole. Entre autres faits d'armes, il dirige l'Institut d'astrophysique spatiale à Orsay de 1998 à 2005 et devient l'un des coordinateurs scientifiques (« mission scientists ») de l'ISO, l'Observatoire spatial dans l'infrarouge de l'ESA. Quelques années auparavant, ce dernier avait capté un rayonnement singulier en provenance du milieu interstellaire, mais qui ne correspondait pas à la poussière dont on le croyait principalement emplie. Jean-Loup Puget et son collègue Alain Léger avaient compris que cette étrange signature était celle des molécules hydrocarbures aromatiques (PAH), et que ces grosses molécules étaient l'une des composantes majeures du milieu interstellaire.

À l'origine de la mission Planck

L'ébauche du satellite Planck s'est affinée progressivement. « *En 1993, mon équipe et moi avons proposé au Cnes un petit satellite dédié à l'analyse du fond diffus cosmologique : Samba. Dans le même temps, Nazzareno*

Mandolesi, à l'université de Bologne, planchait sur un projet similaire, mais sensible aux plus basses fréquences : Cobras. Quand l'ESA a fait un appel d'offres pour une mission moyenne (M3) à l'horizon 2000, les deux propositions ont été combinées. » Cobras-Samba est sélectionnée en 1996. Elle sera ultérieurement rebaptisée... Planck. Depuis 1995, Jean-Loup Puget est le responsable scientifique de HFI, l'instrument haute fréquence embarqué sur le satellite.

A-t-il déjà une ébauche d'un Planck 2.0 dans la tête ? « *Je laisse cela aux plus jeunes ! Ceci dit, je tâche de mettre mon expérience au service de potentiels projets post-Planck, par exemple Pristine. Et puis... je suis officiellement à la retraite !* »

Quand il n'a pas la tête dans les étoiles, Jean-Loup Puget est souvent sur les flots. « *Je suis un voileux, j'ai fait beaucoup de navigation dans le Grand Nord, vers les îles Féroé, l'Islande...* » Voilà qui explique son allure sportive, son teint hâlé qui contrastent avec sa barbe et sa chevelure argentées. « *J'ai d'ailleurs rencontré ma femme par le biais du groupe international de croisière des Glénans. Nous avons beaucoup navigué avec nos enfants, même quand ils étaient tout petits.* » Les petits mousses devenus grands ont d'ailleurs repris le flambeau scientifique : ils sont tous deux ingénieurs dans l'automobile. ■

Damae Medical, la jeune pousse qui monte

PAR MATHIEU GROUSSON

Innovation. Le 10 octobre 2018 se tiendra « CNRSxStart-up », première rencontre dédiée aux entreprises innovantes et aux chercheurs-entrepreneurs du CNRS. Parmi eux, l'équipe de Damae Medical travaille sur une technologie de diagnostic rapide et non invasif des cancers de la peau.

Actuellement, le diagnostic du cancer de la peau nécessite d'analyser au microscope un échantillon de tissu prélevé sur le patient : c'est la biopsie. Damae Medical, une start-up issue de travaux réalisés au Laboratoire Charles-Fabry¹, veut révolutionner cet examen : sa sonde optique à haute résolution, en attente du fameux marquage CE, permet en effet d'ausculter *in vivo* la peau en profondeur, avec une précision proche de celle d'une histologie classique.

Au départ, pour Arnaud Dubois, enseignant-chercheur à l'Institut d'optique Graduate School et cofondateur de la start-up, il y a une question : comment imager dans la masse et à l'échelle de quelques microns – celle de la cellule – des tissus biologiques ? De fait, ceux-ci constituent pour la lumière un milieu diffusant, semblable à du verre dépoli : les rayons ne s'y propagent pas en ligne droite, perdant vite toute « mémoire » de leur lieu d'origine, d'où a priori des images totalement floues.

Une nouvelle approche

Un premier élément de réponse est venu d'une technique utilisée en imagerie rétinienne, la tomographie par cohérence optique (OCT). Fondée sur l'interférence de deux faisceaux de lumière – dont l'un est réfléchi par le tissu à analyser –, elle permet de reconstruire une image couche par couche à partir des seuls photons n'ayant subi aucune déviation. Mais, explique Arnaud Dubois, « l'œil est quasiment transparent. De plus, en ophtalmologie, une



▼ Anaïs Barut, présidente de Damae Medical.

résolution à l'échelle des couches de la rétine, et non des cellules, est suffisante ». Autrement dit, l'OCT ne permet pas d'observer des détails au micron près dans un tissu quelconque. Sans compter que le physicien a en tête des applications en « temps réel ».

Son idée : coupler l'OCT avec une autre technique d'imagerie, la

microscopie confocale par réflexion. Elle consiste à imager un tissu point par point en éliminant la lumière parasite via une fente placée entre la cible et l'objectif. « En combinant les deux techniques, explique-t-il, on réalise un double filtrage, par interférences d'une part, spatial d'autre part ». À la clé, des images nettes à l'échelle du micron, jusqu'à un millimètre de profondeur. De plus, le chercheur résout la problématique « temps réel » par un éclairage via une ligne de lumière plutôt qu'un spot ponctuel.

L'aventure commence

Cela dit, fin 2013, quand le spécialiste contacte le CNRS pour déposer un

Découvrez sur le nouveau blog de CNRS *Le journal* des exemples de valorisation des recherches menées au CNRS.

Le blog « De la découverte à l'innovation », lejournal.cnrs.fr/bloginnovation

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

brevet, son invention n'est encore qu'une idée, tout au plus une expérience sur un coin de table. Mais Arnaud Dubois croit en son potentiel et se lance dans l'aventure start-up. Il se tourne vers la « Filière innovation entrepreneurs » de l'Institut d'optique Graduate School, où Anaïs Barut et David Siret, deux apprentis innovateurs, voient dans le projet de leur aîné une remarquable opportunité. *« C'était extrêmement ambitieux et stimulant, se souvient Anaïs Barut, désormais présidente de Damae. Nous nous sommes très vite bien entendus, identifiant ce que pourrait être le rôle de chacun. »* Damae Medical voit le jour en septembre 2014, signe un contrat de licence avec le CNRS dans la foulée et recrute les ingénieurs Olivier Levecq et Hicham Azimani. *« On a alors une preuve de concept, pas encore le temps réel, mais on sait où aller »,* poursuit la lauréate 2015 du prix de la MIT Technology Review.

En particulier, les jeunes entrepreneurs réalisent tout le potentiel de leur technologie pour l'identification des cancers de la peau. *« Il ne s'agit pas de se substituer à la biopsie, précise Anaïs Barut, mais d'apporter un outil permettant de limiter en amont cette technique invasive aux cas nécessitant un examen*

approfondi et, en aval, de suivre plus facilement l'effet d'un traitement. »

Précommercialisation en vue

Signe du sérieux de l'entreprise, l'équipe fondatrice reçoit dès 2014 une aide de Bpifrance, dans le cadre de son Concours mondial de l'innovation – phase 1, avant d'être lauréate deux années de suite de l'ILLAB. Entre autres prix, Damae est à nouveau lauréate en 2017 du Concours mondial de l'Innovation – phase 2. Et pour cause : en 2015, elle dispose d'un prototype présentant l'ergonomie d'un microscope, permettant d'apporter en 2016 une preuve de concept clinique. En 2017, Damae reçoit l'agrément pour des tests directement sur des patients. *« 200 patients ont été testés au CHU de Saint-Étienne, avec des résultats prêts pour publication cette année »,* rapporte Anaïs Barut.

En parallèle, les ingénieurs de Damae et leurs partenaires industriels ont poursuivi leurs efforts pour proposer une version miniaturisée de leur technologie sous forme de sonde manuelle. En cours de certification européenne, elle devrait être pré-industrialisée en 2019 en vue d'une série de tests dans une dizaine d'établissements hospitaliers européens, avant une mise sur le marché. ■

Le CNRS réunit ses start-up

Le 10 octobre 2018, le CNRS organise la première rencontre avec ses start-up. Sous la forme d'ateliers et d'échanges, CNRSxStart-up s'adresse aux chercheurs-entrepreneurs, aux doctorants et aux jeunes chercheurs qui ambitionnent de se lancer dans la création d'entreprise, mais aussi aux partenaires du CNRS et aux acteurs de l'écosystème de l'innovation et du transfert. L'événement se clôturera par la cérémonie de remise de la Médaille de l'innovation 2018, qui récompense chaque année des scientifiques dont les recherches ont conduit à une innovation marquante.



» www.cnrs.fr/evenement/cnrsxstart

Barbara Cassin à l'Académie française



© D. GOUPE/SIGNATURES

Le 3 mai 2018, Barbara Cassin, directrice de recherche émérite au CNRS, a été élue au premier tour à l'Académie française. Elle est la cinquième femme, sur les 36 membres, à y siéger. Les recherches de cette philologue et philosophe, centrées sur les mots, portent en particulier sur la sophistique et les présocratiques, sur le rapport entre langage et politique, ou encore sur la traduction.



Lire son portrait sur
lejournel.cnrs.fr

Stéphane Blanc, directeur de la Miti

Le 9 juillet 2018, Stéphane Blanc, chargé de mission auprès de la direction générale déléguée à la science pour les initiatives transverses et interdisciplinaires et directeur de recherche à l'Institut pluridisciplinaire Hubert-Curien de Strasbourg, a été nommé directeur de la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (Miti).

Sciences en lumière : le palmarès 2018

Le 6 juin, le festival de films Sciences en Lumière, organisé par le CNRS et l'université de Lorraine, a dévoilé son palmarès 2018. Le prix de la meilleure réalisation a récompensé *Sur les îles du ciel*, réalisé par Olivier Alexandre d'après une recherche de Sébastien Lavergne au laboratoire d'écologie alpine. Dans le cadre du concours « Filmer sa recherche », Nathalie Delprat a remporté le prix CNRS Images et Anthony Rescigno le prix Sciences en Lumière.



Découvrez le palmarès complet sur
» www.sciencesenlumiere.fr

Alessio Figalli, médaille Fields 2018



NUMÉRIQUE

Mathématiques. Alessio Figalli a remporté la médaille Fields aux côtés de trois autres lauréats. Son ancien codirecteur de thèse, Cédric Villani¹, nous parle de ce jeune mathématicien hors du commun.

PAR CHARLINE ZEITOUN

L'italien Alessio Figalli, 34 ans, fort de plus d'une centaine de publications scientifiques, vient de remporter la plus prestigieuse récompense en mathématiques : la médaille Fields. Cette distinction est remise tous les quatre ans à des chercheurs de moins de 40 ans lors du Congrès international des mathématiciens (ICM), dont la dernière édition s'est déroulée du 1^{er} au 9 août à Rio de Janeiro, au Brésil. Caucher Birkar, Peter Scholze, et Akshay Venkatesh ont également été distingués cette année.

Aujourd'hui détaché à l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH Zurich), en Suisse, Alessio Figalli fit aussi un passage remarqué en France. Recruté comme chargé de recherche au CNRS fin 2007, avant même la soutenance de sa thèse, cet expert en **analyse** mathématique avait mené son doctorat en un temps record, à cheval entre la France et l'Italie, à l'École normale supérieure de Pise et à l'École normale supérieure de Lyon, sous la codirection de Luigi Ambrosio et de Cédric Villani. Ce dernier, présent à Rio pour féliciter le lauréat, a accepté de nous parler de son ancien étudiant...

ANALYSE

Comme la géométrie ou l'algèbre, l'analyse est l'une des branches principales en mathématiques.

Lorsque vous codiriez sa thèse, aviez-vous déjà l'intuition d'avoir affaire à de la « graine de médaille Fields » ?

Cédric Villani : Alessio Figalli est un mathématicien hors norme, je l'ai vu immédiatement. Sa thèse n'a pas duré dix-huit mois² : à peine la moitié du temps réglementaire. Ce n'est pas un hasard si, fait rarissime, le CNRS l'a recruté avant même sa soutenance, fin 2007. Dans la lettre de recommandation que j'avais rédigée en 2012, alors qu'il postulait à l'université de Princeton, je le considérais déjà comme l'un des plus impressionnants jeunes analystes avec lesquels j'avais interagi, doué d'une incroyable vitesse et d'une énorme puissance. Alessio Figalli était capable de trouver en un rien de temps une piste qui

permettait de débloquer un problème. C'est un créatif, et sa capacité à digérer ses nombreuses lectures scientifiques lui fait mériter la qualification d'« éponge mathématique » que je lui avais donnée ! Lorsque j'ai moi-même reçu la médaille Fields en 2010, certains de mes collègues, impressionnés par sa puissance et sa rapidité, voyaient alors déjà en lui un favori pour l'ICM 2018.

Le calcul des variations, dont il est un expert, peut concerner la mécanique des fluides comme la finance, l'intelligence artificielle, la biologie...

C. V. : En effet. Le calcul des variations consiste à identifier un optimum parmi une famille de solutions possibles à un problème. Cela touche donc absolument tous les domaines, dès lors que l'on cherche une notion d'optimisation : la coque d'un navire (pour le meilleur hydrodynamisme naval), le prix d'actions en Bourse (pour obtenir la meilleure correspondance entre les offres et les demandes), le transport de marchandises ou d'usagers (en un minimum de temps, de kilomètres...), etc. Alessio Figalli s'est particulièrement illustré sur le problème du « transport optimal », dans lequel on cherche

© ETH ZÜRICH / GIAN MARCO CASTELBERG



le meilleur appariement entre une configuration initiale et une configuration finale. Gaspard Monge avait posé le problème de la caractérisation géométrique de ce transport optimal ; mais les décennies, et surtout la période récente depuis 1985, ont mis au jour quantité de thématiques liées au transport optimal : régularité, inégalités fonctionnelles et géométriques, lien avec les équations de la physique mathématique, etc. Alessio Figalli a résolu certains problèmes majeurs dans le sujet. Plus récemment, il s'est mis à travailler sur la théorie des matrices aléatoires, un sujet issu de la mécanique quantique. En réalité, il a une facilité si considérable à élargir ses horizons qu'il finit par s'attaquer à peu près à tous les sujets dans lesquels l'analyse intervient de façon forte !

Il a mené sa thèse à cheval entre la France et l'Italie, est entré en 2007 au CNRS avant de devenir professeur à l'École polytechnique (France) puis à

► Alessio Figalli, dans le jardin de l'École polytechnique fédérale de Zurich.

l'université du Texas à Austin (États-Unis), et en 2016 il rejoint l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse. Ce type de profil international est-il aujourd'hui gage de succès en mathématiques ?

C. V. : En effet, ces profils internationaux sont de plus en plus courants en mathématiques et tous les spécialistes ont observé leur consécration à Séoul, lors de l'ICM 2014 : les quatre lauréats de la médaille Fields avaient une formation multiculturelle, à commencer par le Franco-Brésilien Artur Ávila. En ce qui concerne Alessio Figalli, il a été formé au gré de plusieurs influences parmi lesquelles l'école française figure en bonne place, même si cette notion devient justement de plus en plus difficile à cerner aujourd'hui compte tenu de l'inflation des échanges internationaux. Dans ce contexte, la France demeure un point d'attraction mondial en mathématiques. Le fait que le CNRS ait pu offrir à Alessio Figalli un poste alors qu'il n'avait que 23 ans, a sans doute eu un rôle capital dans sa carrière, et les postes de chargé de recherche au sein de l'organisme font à mon sens partie de l'arsenal compétitif de la France au niveau mondial. A contrario, on peut noter qu'Alessio Figalli a choisi de faire sa carrière senior en dehors de la France, dans un établissement – l'ETH – qui peut lui apporter des moyens bien plus importants ; c'est un exemple parmi beaucoup, tant il est vrai que nous avons des problèmes pour garder et attirer nos meilleurs talents.

Certains sujets d'étude d'Alessio Figalli ont déjà été abondamment traités par vous-même et par votre propre directeur de thèse, Pierre-Louis Lions, également lauréat de la médaille Fields en 1994. Peut-on parler d'« héritage » ?

C. V. : Oui, on peut dire que c'est la troisième médaille Fields de la « lignée ». Il y a un autre exemple de « lignée » de ce type, considérée comme « appartenant » à l'école française même si elle est en réalité multinationale : c'est celle de Schwartz-Grothendieck-Deligne³. J'y vois un symbole très fort d'une continuité de l'excellence dans ces thématiques. Alessio Figalli a d'ailleurs, avec Luigi Ambrosio, travaillé sur certaines théories de Pierre-Louis Lions et Ron Diperna. Comme je vous le disais, l'école française n'est pas seule dans la formation d'Alessio Figalli, mais elle a joué un rôle majeur. En particulier, l'écosystème lyonnais, avec Albert Fathi, Alice Guionnet et moi-même, lui a permis de se frotter à des influences variées et pluridisciplinaires, à l'interface entre maths pure et appliquée, sans barrières entre analyse, géométrie et probabilités. ▀

1. Mathématicien, directeur de l'Institut Henri-Poincaré jusqu'en 2017, Cédric Villani est aujourd'hui vice-président de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. 2. Il s'agit de onze mois selon son CV, mais il aurait commencé ses recherches durant l'année précédente. 3. Laurent Schwartz, Alexandre Grothendieck et Pierre Deligne.

Nicolas Arnaud, nouveau directeur de l'Insu

Depuis le 1^{er} mai, Nicolas Arnaud est le nouveau directeur de l'Institut national des sciences de l'Univers (Insu) du CNRS. Directeur de recherche CNRS, ce géologue a étudié les processus de déformation des continents et de formation des reliefs en lien avec la tectonique des plaques. Au fil de son parcours, il a notamment fondé et dirigé l'Observatoire de recherche méditerranéen de l'environnement de Montpellier, et a été vice-président de l'université de Montpellier 2 entre 2008 et 2012. Depuis, il était directeur adjoint scientifique de l'Insu, en charge du domaine des surfaces et interfaces continentales. À ce poste, il a particulièrement accompagné la construction des infrastructures de recherche et d'observation de la zone critique de la Terre, en France et en Europe.



© C. FRESILLON/CNRS PHOTOTHÈQUE

RÉMY MOSSERI, RÉFÉRENT POUR L'INTÉGRITÉ SCIENTIFIQUE

Depuis le 1^{er} août, Rémy Mosseri, directeur de recherches au Laboratoire de physique théorique de la matière condensée, a été nommé référent pour l'intégrité scientifique du CNRS.

Philippe Le Bouteiller remporte la finale nationale de MT180

Le 13 juin dernier, le théâtre national de Toulouse a accueilli la finale nationale 2018 de Ma thèse en 180 secondes (MT180), concours organisé par le CNRS et la Conférence des présidents d'université. Philippe Le Bouteiller a remporté le 1^{er} prix du jury et le prix du public grâce à la présentation de ses travaux menés à

Grenoble sur les ondes sismiques. Colin Gatouillat s'est vu remettre le 2^e prix du jury pour sa thèse, menée à Marseille, sur le processus de « désportation ». La candidate rennaise Camille Vautier a reçu le 3^e prix du jury pour ses travaux sur la pollution de l'eau aux nitrates. La finale internationale aura lieu le 27 septembre à Lausanne.



© D. PELLIANT/IBG-CNRS

Astrid Lambrecht à la tête de l'INP

Le 1^{er} juin 2018, Astrid Lambrecht a été nommée directrice de l'Institut de physique du

CNRS. Directrice de recherche au sein de l'organisme qu'elle a intégré en 1996, elle a travaillé sur l'étude des fluctuations du vide et notamment sur les forces de Casimir au Laboratoire Kastler-Brossel. Lauréate du prix Aimé-Cotton de la Société française de physique en 2005, de la médaille d'argent du CNRS en 2013 et du prix Gentner-Kastler de la Société française de physique et de la Société allemande de physique en 2016, elle a été coéditrice du journal *EPL* de 2007 à 2014. Elle était depuis 2016 directrice adjointe scientifique de l'Institut de physique du CNRS.



© C. FRESILLON/CNRS PHOTOTHÈQUE

I-Lab 2018 : plus de 46 % de lauréats CNRS

La 20^e édition du concours national i-Lab d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes a dévoilé ses lauréats le 5 juillet 2018. Le CNRS se démarque à nouveau avec 30 projets lauréats directement liés à l'institution (soit presque 47 %), dont 11 des 14 grands prix. Parmi ces projets CNRS, 6 ont bénéficié du programme de prématuration de l'organisme.



Plus d'infos sur notre blog :
lejournal.cnrs.fr/bloginnovation

EN BREF

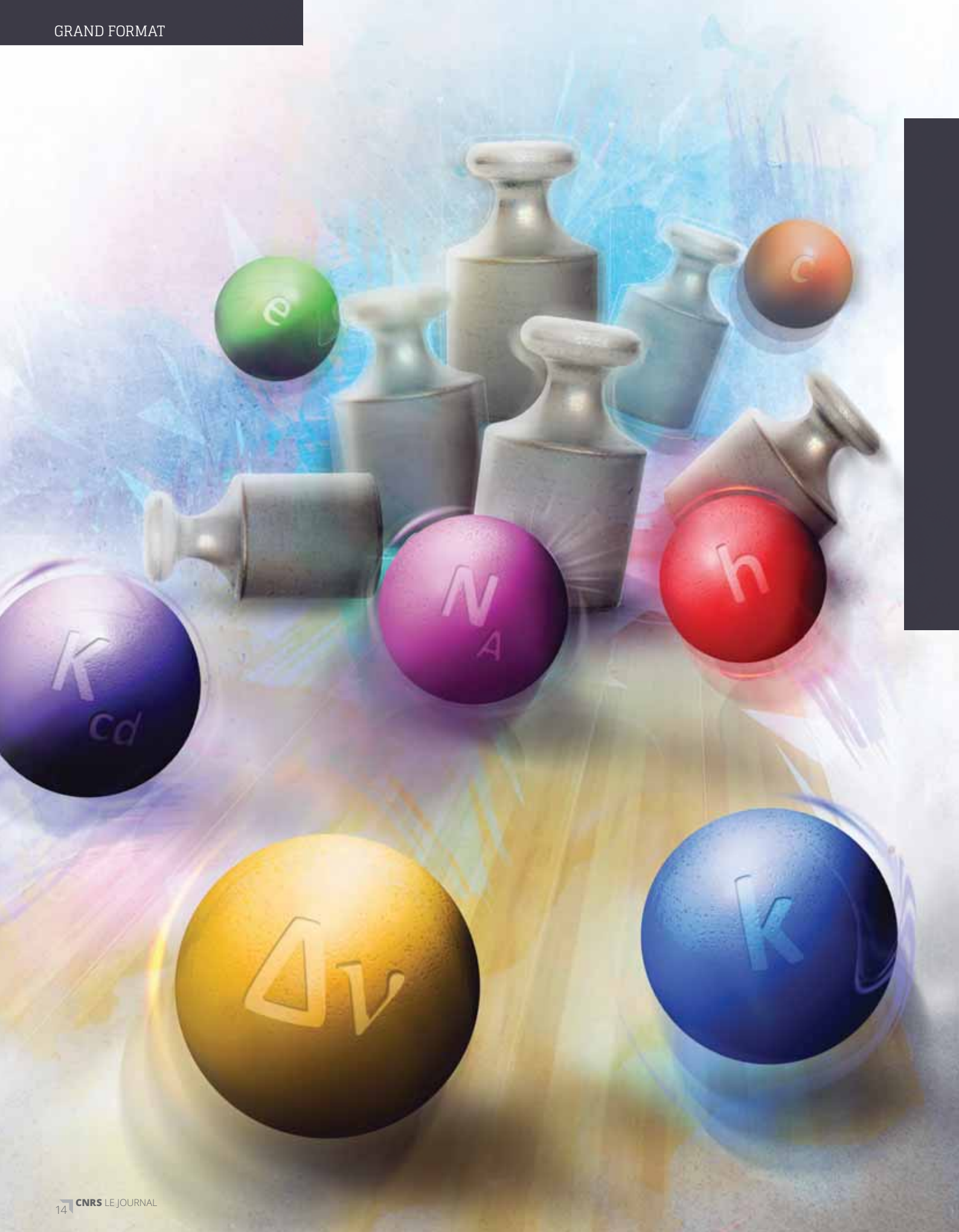
Vincent Studer, directeur de recherche au CNRS et cofondateur de la société Alvéole, est le lauréat 2017 du prix Jean-Jerphagnon. Celui-ci lui a été remis le 4 juin 2018 lors de la journée « Perspectives de la photonique française » à Bercy. — Directeur de l'Institut de science et d'ingénierie supramoléculaires (Istis), **Paolo Samorì** a reçu le prix Surfaces et interfaces de la Royal Society of Chemistry. — En juin, **Simon Brendle**, professeur à l'université Columbia et **Nader Masmoudi**, professeur franco-tunisien au Courant Institute of Mathematical Sciences de New York, se sont vus remettre à Toulouse le prix Fermat, créé à l'Institut de mathématiques de Toulouse (IMT).

GRAND FORMAT



*On recalcule le mètre et le kilo,
on contemple les trésors de Hégira
et on voyage vers Mars
et le Soleil.*

ILLUSTRATION : SIMON LANDREIN POUR CNRS LE JOURNAL



Mesures: le grand renversement

MATIÈRE

SOCIÉTÉS

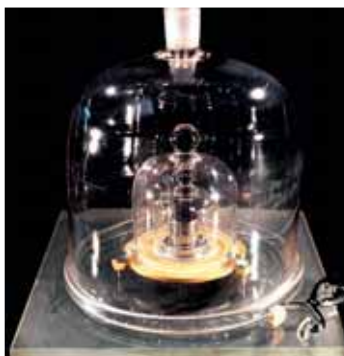


Du 13 au 16 novembre 2018 à Versailles, les unités de base du Système international seront toutes redéfinies en référence à sept constantes physiques dont la valeur exacte sera alors définitivement fixée. Retour sur les raisons et les enjeux d'une réforme attendue depuis 30 ans et qui devrait entrer en vigueur en mai 2019.

UN DOSSIER RÉALISÉ PAR MATHIEU GROUSSON ET YAROSLAV PIGENET

L'univers de la métrologie s'apprête à vivre une véritable révolution. Dans quelques mois, le « grand K » ou prototype international du kilogramme (PIK), ce cylindre de platine iridié conservé au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres – qui depuis 1889 définit l'unité de masse – prendra sa retraite. Le vieil étalon cédera alors sa place à une nouvelle définition du kilogramme, formulée à partir de la constante de Planck de la physique quantique. C'est en tout cas ce que devrait acter la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) lors de sa 26^e réunion qui se tiendra du 13 au 16 novembre 2018 à Versailles.

Ce n'est pas tout : simultanément, la vénérable institution en profitera pour redéfinir trois autres des sept unités¹ que compte le Système international, le fameux SI, également à partir de constantes fondamentales. Et pour l'ensemble, une définition explicitement fondée sur ces dernières sera adoptée. De quoi conférer aux unités de base un caractère réellement pérenne et universel : la fin d'un long processus de mise en cohérence sans précédent dans l'histoire de la métrologie.



Le « grand K », étalon matériel du kilogramme, conservé sous trois cloches de verre à Sèvres (Hauts-de-Seine), sera bientôt remplacé par une constante de la physique, immatérielle.

Des unités devenues imprécises

À l'évidence, il était temps d'y mettre bon ordre. « Toutes les définitions des unités étaient plus ou moins devenues pathologiques », lâche simplement Marc Himbert, du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam). Qu'on en juge : alors que science et industrie sont entrées dans l'ère du nano-monde, la totalité des réfé-

rences de masse sur la planète sont aujourd'hui étalonnées à partir d'un artefact dont la masse a lentement varié d'environ 50 microgrammes par rapport à celle de ses copies. Sans compter que, comme le fait remarquer François Nez, du Laboratoire Kastler-Brossel (LKB)², « imaginez que l'on fasse tomber l'étalon de masse, c'en serait alors fini du kilogramme ! » Et de proche en proche, des unités qui en dépendent, tels le newton, le joule ou le watt.

Quant au kelvin, l'unité de température, il est actuellement défini comme une fraction de la température thermodynamique du point triple de l'eau – où l'eau coexiste à l'équilibre sous les trois phases : solide, liquide et vapeur. Or, cette définition dépend de la qualité de l'eau (impuretés, composition isotopique...) utilisée pour la mettre en œuvre. Du reste, liée à une température particulière, elle est peu adaptée à la ...

1. Le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et la candela. 2. Unité CNRS/ENS/UPMC/Collège de France.

Chronologie du Système international d'unités (SI)

1795

Adoption définitive par la Convention du **système métrique décimal**, à visée universelle. Son usage devient obligatoire sur tout le territoire français.



1799

Les premiers étalons du **mètre** et du **kilogramme**, réalisés en platine, sont déposés aux Archives nationales de France.



1875

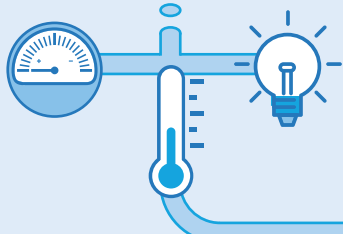
20 mai : la **Convention du mètre** est signée par 17 pays. Ce traité, toujours en vigueur, crée le **Bureau international des poids et mesures (BIPM)**, une organisation intergouvernementale permanente permettant aux États membres d'avoir une action commune sur toutes les questions se rapportant aux unités de mesure.



1889

La première **Conférence générale des poids et mesures (CGPM)** définit la seconde astronomique et adopte de nouveaux étalons pour le mètre et le kilogramme. On parle de **système MKS (mètre, kilogramme, seconde)**.

M

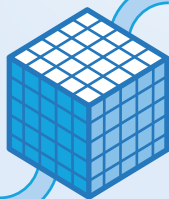


1954

La 10^e CGPM approuve l'introduction de l'**ampère**, du **kelvin** et de la **candela** comme unités de base, respectivement pour le courant électrique, la température et l'intensité lumineuse.

1960

La 11^e CGPM institue le **Système international d'unités (SI)**, qui définit alors **six unités de base**, les unités qui en sont dérivées, ainsi que les règles d'utilisation des **préfixes (centi-, kilo-, mega-, etc.)** et les conventions d'écriture qui leur sont associées.



1967

La 13^e CGPM abolit l'ancienne définition astronomique de la **seconde**, fixée à 1/86400 d'un jour moyen, par une **définition quantique** plus précise fondée sur la transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome de **césium 133**.



1971

La 14^e CGPM approuve l'introduction de la **mole** comme unité de base pour la quantité de matière.

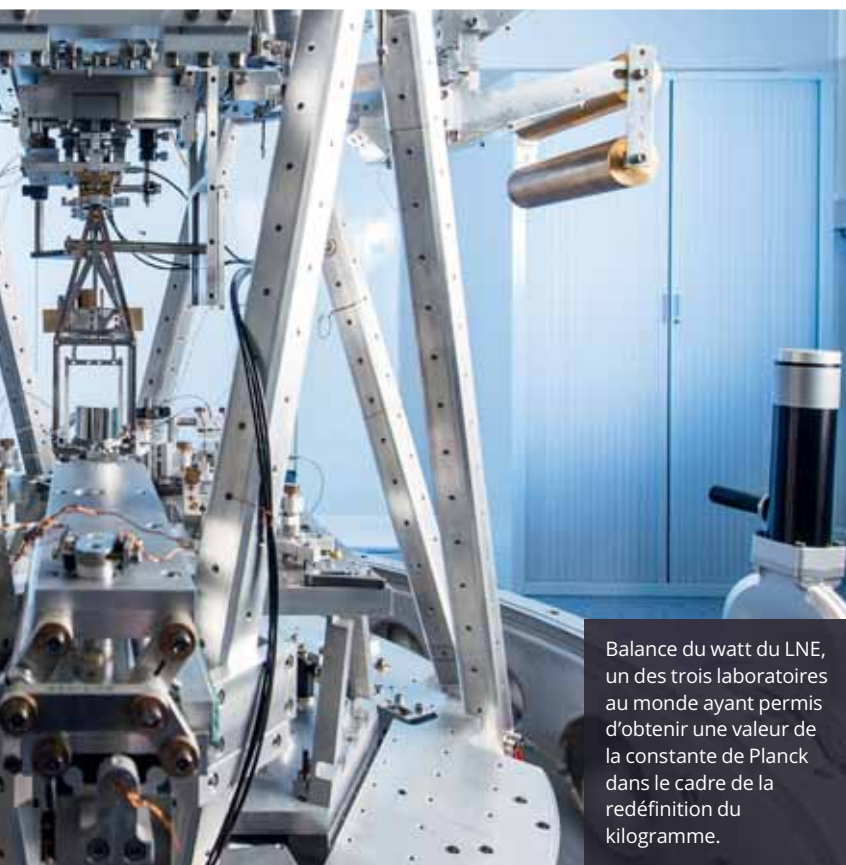


© P. STROPPANE

... mesure des températures inférieures à 20 kelvins (-253,15 °C) ou supérieures à 1 300 kelvins (1 026,85 °C).

Et que dire de l'ampère, l'unité de courant électrique, définie à partir de la force mécanique entre deux fils infiniment longs, séparés d'un mètre, dans lesquels circule un courant ? ! Cela fait plusieurs décennies que les professionnels de l'électricité l'ont en pratique troquée contre une définition impliquant des processus quantiques.

Comme le résume Marc Himbert, « nous faisons face à un quadruple problème de cohérence, de pérennité, d'universalité et de précision ». Soit les quatre critères qui dictent les travaux de la CGPM depuis son instauration, en 1875, lors de la signature de la « Convention du



Balance du watt du LNE, un des trois laboratoires au monde ayant permis d'obtenir une valeur de la constante de Planck dans le cadre de la redéfinition du kilogramme.

Il s'agit d'assurer qu'un kilogramme de sucre est bien le même à Paris, à New York et à Londres.

confiance dans les mesures, seule à même d'élaborer sur une base fiable savoirs scientifiques, décisions politiques et échanges commerciaux.

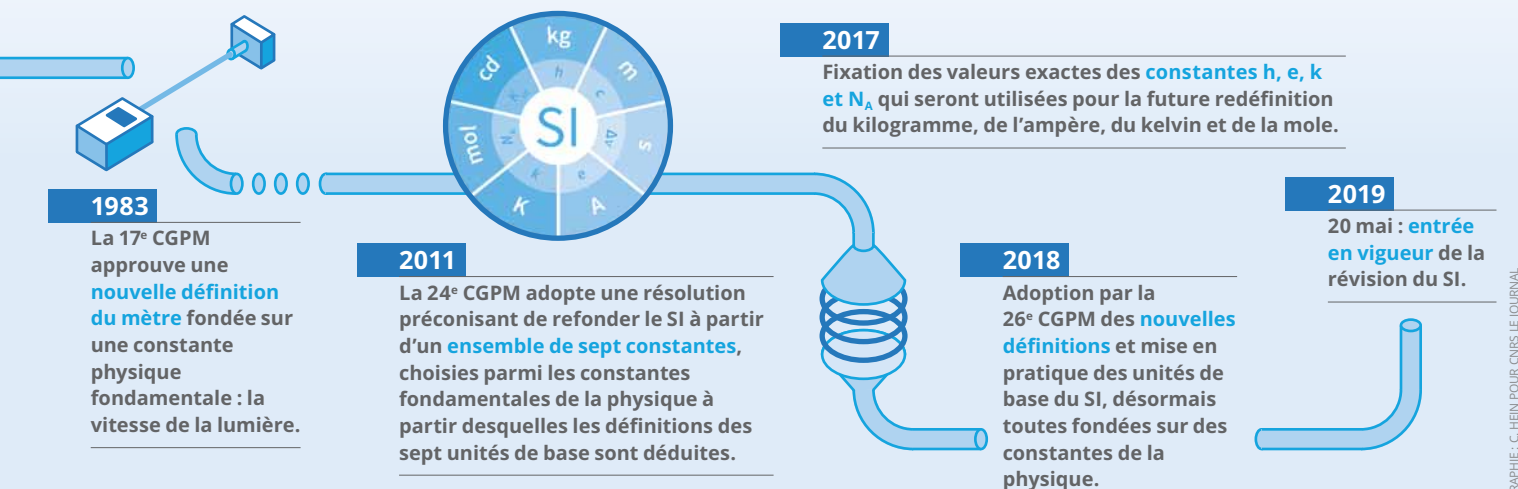
En plus de ces considérations pratiques, la normalisation des unités de mesure est également portée par l'idéal d'universalité du siècle précédent, incarné en particulier par la Révolution française. En 1791, l'Assemblée constituante décide de définir « une unité qui ne renferme ni d'arbitraire ni de particulier à la situation d'aucun peuple sur le globe ». Proclamation à l'origine de l'épopée scientifique des deux astronomes Delambre et Méchain qui, pendant sept ans, mesureront une fraction du méridien de Paris, entre Dunkerque et Barcelone, d'où ils déduiront la longueur d'un mètre, jetant les bases du système métrique, ancêtre du SI. Une formidable aventure où, jusqu'aujourd'hui, s'articulent science fondamentale, technologie et politique.

C'est ainsi qu'en 2011, la CGPM prenait acte de l'intention du Comité international des poids et mesures (CIPM)⁵ de proposer une révision du SI, et adoptait en 2014 une résolution sur sa révision à venir. Le principe de cette dernière ? Refonder le SI sur ce que la physique offre aujourd'hui de plus universel et de plus intangible : les constantes fondamentales, en particulier celles de la mécanique quantique – physique de l'infiniment petit –, où la régularité des phénomènes, de même que leur précision, offrent des références à nulle autre pareilles. ...

mètre³», rien moins que le plus ancien traité international aujourd'hui en vigueur.

Un idéal d'universalité

Comme l'explique Matthias Dörries, aux Archives Henri Poincaré⁴, à l'université de Strasbourg, « dans le courant du XIX^e siècle, à la faveur de la révolution industrielle et de l'émergence d'un vaste marché international, les grandes nations ont pris conscience de la nécessité de mettre en place un système de normes communes ». D'un mot, il s'agit alors d'assurer qu'un kilogramme de sucre est bien le même à Paris, à New York ou à Londres. Tout comme aujourd'hui, l'objectif était d'établir une



3. Consultable sur le site : www.bipm.org 4. Unité CNRS/Univ. de Strasbourg/Univ. de Lorraine. 5. Sous l'autorité de la CGPM, le CIPM dirige et supervise les activités du BIPM.

Le kilogramme nouveau est arrivé

ANCIENNE DÉFINITION

adoptée à la première réunion
de la CGPM en 1889

“ Le kilogramme est l'unité de masse ;
il est égal à la masse du prototype
international du kilogramme. ”



Pèse par définition
1 kilogramme



h est mesurée à
partir du prototype
international du
kilogramme (PIK)
au moyen d'une
balance de Kibble.

h

NOUVELLE DÉFINITION

devant être adoptée à la 26^e réunion
de la CGPM en octobre 2018

“ Le kilogramme (kg) est l'unité de masse
du SI. Il est défini en prenant la valeur
numérique fixée de la constante de Planck (h)
égale à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'elle est
exprimée en J.s, unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$,
le mètre et la seconde étant définis en
fonction de c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$. ”

h

Vaut exactement
 $6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J.s}$



Un étalon du
kilogramme est
réalisé à partir de h
au moyen
d'une balance
de Kibble.



... « Le moteur du changement en cours est assurément l'émergence de la mécanique quantique dans l'univers de la métrologie », confirme Christian Bordé, président du Comité science et métrologie de l'Académie des sciences.

Le sacre de la mécanique quantique

Concrètement, la mécanique quantique fait son entrée dans le SI en 1967, avec la redéfinition de la seconde en référence à la fréquence de transition de deux niveaux de l'atome de césium. Puis, en 1983, le mètre devient la longueur parcourue par la lumière en une fraction de seconde, unité qui se déduit donc de la réalisation de la seconde et d'une valeur fixée pour la vitesse de la lumière. La réforme en cours s'inscrit dans cette perspective.

Ainsi, le kilogramme sera bientôt redéfini à partir de la constante de Planck, h (voir infographie ci-dessus). Celle-ci est en effet le produit d'une énergie par un temps, et l'énergie est reliée à la masse via l'équation $E = mc^2$. Pour sa part, le kelvin sera redéfini à partir de la constante de Boltzmann (k), liée à la mesure de l'agitation thermique des constituants fondamentaux d'un corps. Quant à l'ampère, qui n'est autre qu'une charge par unité de temps, il sera relié à la charge élémentaire (e). Enfin, la mole, l'unité de quantité de matière, sera définie directement en fixant la constante – ou nombre – d'Avogadro (N_A).

CGPM CONFÉRENCE GÉNÉRALE DES POIDS ET MESURES

Elle rassemble tous les 4 à 6 ans des délégués représentant chacun des 59 pays membres. Cet organisme est chargé de débattre sur – et d'éventuellement soutenir – les modifications du SI proposées par le CIPM.

Pour en arriver là, les experts internationaux ont soupesé de nombreux critères. Quelle est la façon la plus cohérente de définir les unités au vu des connaissances en physique fondamentale ? Est-il possible de réaliser physiquement les définitions envisagées ? Comment, ensuite, utiliser ces réalisations pour disséminer les unités auprès des utilisateurs ? Par exemple, dans le cas de l'ampère, une partie de la discussion a porté sur le fait de savoir s'il fallait définir celui-ci à partir de la permittivité diélectrique du vide ou bien de la charge élémentaire. « La première possibilité était plutôt défendue par les opticiens et les physiciens des milieux dilués, la seconde par ceux de la matière condensée, détaille Marc Himbert. In fine, c'est cette dernière qui l'a emporté dans la mesure où elle est plus conforme à la façon dont les électriciens mesurent effectivement un courant électrique. » Illustration du fait qu'en matière de métrologie, les questions pratiques ont un poids au moins équivalent à celui des considérations fondamentales.

Tout changer... pour que rien ne change

Si tel est bien le cas, faut-il s'attendre à des bouleversements instantanés ? « Très clairement, non », indique Marc Himbert. Et pour une raison simple : tout a été fait pour assurer une continuité maximale entre l'ancien et

“Le GPS aurait été quasi impossible à développer sans la redéfinition du mètre, en 1983.”

le nouveau système. En effet, les valeurs des constantes fondamentales participant à la définition du nouveau SI ont pu être fixées une bonne fois pour toutes après avoir été mesurées très précisément – donc avec une très faible incertitude – selon les anciennes définitions. L'incertitude de la mesure porte donc désormais sur les anciens étalons de référence.

Dans ce cas, quel est l'intérêt de changer de références ? Tout simplement parce qu'une fois le kelvin fondé sur une constante fondamentale, sa définition n'impliquera plus aucune température particulière, évitant très concrètement la propagation d'erreurs dans l'étalonnage des thermomètres au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point triple de l'eau. Idem avec le kilogramme, qui désormais ne fera plus aucune référence à un étalon matériel. Etc.

Ainsi, « les premiers bénéficiaires du nouveau kelvin devraient être les industries concernées par les hautes températures », analyse Marc Himbert. Ce qui n'est pas rien. En effet, « 60 % des capteurs présents dans l'industrie sont des capteurs de température », précise le métrologue. Mais aussi les laboratoires de recherche fondamentale, concernés par les très basses températures, de même que par les propriétés de la matière aux échelles les plus fines. Avec des conséquences impossibles à anticiper. Par exemple, « le GPS aurait été quasi impossible à développer sans la redéfinition du mètre, en 1983. Mais celle-ci ne le préfigure aucunement », souligne Marc Himbert.

Une réforme pour renouveler la confiance

Au-delà, « le nouveau SI renouvellera notre confiance dans les unités fondamentales et leur caractère universel », ajoute Christian Bordé. Sans pour autant éviter ici ou là quelques résistances. « Il a fallu une génération pour que s'impose le système métrique via l'école, rappelle Matthias Dörries. Et pour certaines applications, on compte encore en douzaines ! » Et pas seulement sur les marchés.

Ainsi, le 23 septembre 1999, la sonde Mars Climat Orbiter s'est écrasée sur Mars. En cause, un logiciel de vol exprimant la poussée des micropropulseurs en unités de mesure anglo-saxonnes, quand celui de l'équipe de navigation qui recevait ces données pour calculer les corrections de trajectoire les exprimait dans les unités du système métrique... Or, fait remarquer Marc Himbert, « si elle est édifiante, cette anecdote ne met pas en cause le SI, mais l'usage qu'on en fait ».

Quoi qu'il en soit, le nouveau SI, fondé sur la physique la plus fondamentale, sera-t-il l'ultime système d'unités ? Rien n'est moins sûr. Pour de nombreux scientifiques, la candela, unité d'intensité lumineuse, n'a rien à y faire. « La candela n'a aucun caractère fondamental, admet Marc Himbert. Pour autant, elle est très importante pour l'industrie de l'éclairage, avec de réels enjeux ...

Les métamorphoses du mètre

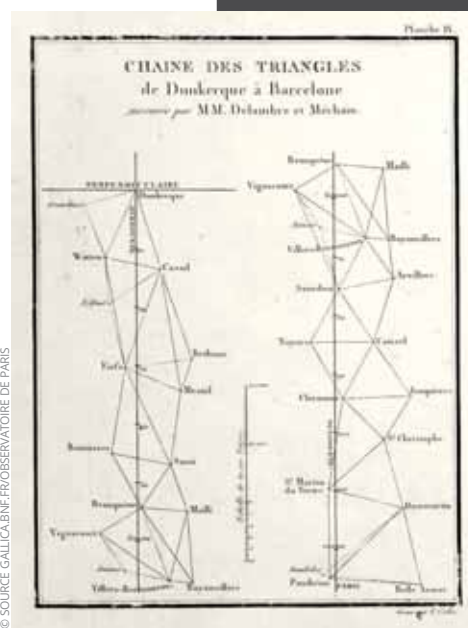
Tout comme le kilogramme, l'ampère, le kelvin ou la mole, le mètre et la seconde changeront de définition à l'occasion de la 26^e réunion de la CGPM. Toutefois, cette redéfinition du mètre sera plus superficielle que celle du kilogramme : elle ne consistera qu'à expliciter la constante physique sur laquelle est construite l'unité de longueur, en l'occurrence c , la vitesse de la lumière dans le vide. Ainsi, le mètre était jusqu'ici

défini comme « la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458$ de seconde ». À partir de 2019, entrera en vigueur une définition rigoureusement équivalente, mais dite à constante explicite, où le mètre sera « défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide, c , égale à $299\,792\,458$ lorsqu'elle est exprimée en m/s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ».

Défini dès 1791 comme le dix millionième de la longueur du méridien passant par Paris, le mètre fut mesuré avec précision par les astronomes Delambre et Méchain. C'est à partir de cette définition qu'a été réalisé le premier étalon matériel du mètre.

Le mètre a aussi été la première unité à être redéfinie à partir d'une constante physique atomique. En effet, avant de se baser sur la vitesse de la lumière (fixée en 1983), le CGPM avait abandonné dès 1960 toute référence à l'étalon-mètre construit en 1889 et défini le mètre par

rapport à la « longueur d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome de krypton 86 ».



© SOURCE GALlica, BNF, OBSERVATOIRE DE PARIS

Sous la Révolution française, les astronomes Delambre et Méchain mesurèrent, grâce à la triangulation, une portion du méridien de Paris, d'où ils tirèrent la valeur du mètre.

6. J.s = joule seconde ; c = vitesse de la lumière ; $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ = fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium.

“Le nouveau SI renouvellera notre confiance dans les unités fondamentales et leur caractère universel.”

... économiques, de sécurité et de santé. » Idem pour la mole, définie à partir du nombre d'atomes contenus dans un gramme de carbone 12 et qui, selon certains, n'aurait pas plus de signification que la douzaine pour les œufs, tout en étant pourtant très utilisée pour toute la chimie et ses applications.

Mais ce n'est pas tout. D'aucuns font remarquer que la seconde reste tributaire des propriétés d'un atome particulier, le césium. « Sur le papier, il faudrait introduire G , la constante fondamentale de la gravitation, dans le SI, afin de définir la seconde. C'est ce qu'il y a de plus naturel pour un physicien », plaide Christian Bordé, avant

d'ajouter : « Sauf qu'il n'existe aujourd'hui aucune façon de mesurer G avec la précision requise. » À l'inverse, la définition en vigueur permet une incertitude relative de 10^{-16} , ce qu'aucune autre unité ne peut revendiquer, avec pour conséquence de placer la seconde au sommet de tout l'édifice du SI. « Si vous avez une belle définition, mais impossible à réaliser, ça n'a aucun sens, argumente Noël Dimarcq, du laboratoire Systèmes de référence temps-espace⁷. La force de la définition de la seconde, c'est aujourd'hui sa précision. » Sans compter que l'unité de temps est actuellement la seule que l'on puisse transférer d'un point à un autre du globe par satellite ou fibre optique.

« Au mieux, le SI reflète la connaissance que l'on a de la physique sur les plans fondamental et expérimental à un moment donné », résume François Nez. « De ce point de vue, le nouveau système est le meilleur dont on puisse aujourd'hui se doter », conclut Christian Bordé. Ce qui justifie aisément d'en finir avec le « grand K ». **M. G.**

Sept constantes pour tout mesurer

Le futur SI sera le système d'unités selon lequel les valeurs des sept constantes physiques suivantes seront fixées exactement. Les unités hertz (Hz), joule (J), coulomb (C), lumen (lm) et watt (W) sont reliées aux unités seconde (s), mètre (m), kilogramme (kg) ampère (A), kelvin (K), mole (mol) et candela (cd) représentées ici :



* Constantes dont les valeurs n'étaient pas fixées avant 2017.

7. Unité CNRS/Observatoire de Paris/UPMC/LNE.

En rattachant explicitement toutes les unités de base à des constantes fondamentales, la future réforme du SI parachèvera l'objectif d'universalité et de stabilité des mesures des inventeurs du système métrique. Mais sur quoi au juste repose ce lien entre mesures, unités et constantes ?

De l'importance des constantes

En physique, comme dans la vie quotidienne, mesurer revient à déterminer le rapport entre deux quantités de même nature dont l'une – supposée constante – fait office d'étalon ou d'unité. Le corps humain a longtemps fourni des étalons pratiques et toujours disponibles pour, par exemple, mesurer en pieds, en pouces ou en coudées, la distance entre deux objets. L'ennui avec ce genre d'étalon est que si tout le monde a un pied, tout le monde n'a pas la même pointure. Pour rendre fiables et comparables les mesures, mais aussi faciliter les échanges, il faut assurer un minimum de constance... On a donc fini par adopter des étalons de longueur basés sur un pied invariant, connu et reconnu par le plus grand nombre – en l'occurrence, en France, celui du roi. Le défaut majeur de ce système était que selon le pays, la région ou même l'époque, l'étalon pied n'était pas le même : le pied romain était plus court que le pied anglais, lui-même moins grand que le pied de roi français. Le problème était d'ailleurs le même avec les unités de poids et de volume, qui elles aussi reposaient sur des étalons anthropomorphiques tels que la livre ou la poignée. Avec l'essor des sciences et des échanges internationaux, le besoin d'unités plus précises et plus universelles s'est fait de plus en plus sentir tout au long du siècle des Lumières.

Du système royal à la mécanique quantique

Les révolutionnaires français, qui comptaient parmi eux de nombreux scientifiques et qui venaient de couper la tête de Louis XVI, ont donc dans la foulée aboli le pied du roi. Près de 800 unités alors en usage sur le territoire ont été remplacées par un tout nouveau système d'unités



décimales : mètre, kilogramme et seconde. Celles-ci ne se référaient plus à des étalons anthropomorphiques, mais pour la première fois à des valeurs astronomiques mesurées précisément et que l'on considérait alors comme constantes, naturelles et universelles telles la durée d'un jour terrestre ou la longueur d'un méridien. Depuis, le système métrique a connu de multiples évolutions et redéfinitions, mais il s'est toujours, même indirectement, fondé sur des constantes physiques. « *Un système d'unités est une construction humaine et les définitions du SI se ...*

“Les constantes permettent l'émergence de nouveaux concepts.”

... sont donc à l'origine appuyées sur la physique classique. Les changements successifs de définition ont découlé de la volonté d'utiliser des mesures plus stables et plus fondamentales, accompagnant ainsi les progrès de la physique », explique Jean-Philippe Uzan, physicien à l'Institut d'astrophysique de Paris¹. Pas étonnant dès lors que la future révision du SI fasse la part belle aux constantes issues de la mécanique quantique et de la relativité.

Des unités nées des constantes

La redéfinition des sept unités de base reposera donc sur une formulation à constante explicite, c'est-à-dire une définition dans laquelle l'unité est définie indirectement en donnant une valeur exacte à une constante fondamentale reconnue. « Nous définissons comme constante fondamentale d'une théorie physique tout paramètre dont cette théorie ne peut prédire la valeur », précise Jean-Philippe Uzan. Cette valeur ne peut donc être obtenue qu'empiriquement, par une mesure. Les progrès de l'instrumentation ont d'ores et déjà permis des mesures suffisamment précises pour que l'on décide d'établir conventionnellement des valeurs exactes pour certaines d'entre elles. Ainsi, après la valeur de c , la vitesse de la lumière, fixée depuis 1983, c'est au tour de h , la constante de Planck, de e , la charge électrique de l'électron, de k , la constante de Boltzmann et de N_A , la constante d'Avogadro, d'être désormais gravées dans les tables du SI.

La CGPM a ainsi fourni une feuille de route très détaillée sur la manière dont les différentes constantes fondamentales impliquées dans le nouveau SI devraient être remesurées², avant de fixer leurs valeurs numériques de manière définitive. Par exemple, pour la constante de

Planck, la Conférence a exigé deux méthodes indépendantes, chacune mise en œuvre dans plusieurs laboratoires de métrologie à travers le monde. La première est fondée sur une balance de Kibble (dite aussi balance du watt), qui permet d'équilibrer des masses avec des forces électromagnétiques. La seconde consiste à compter les atomes d'une sphère de silicium de 10 centimètres de diamètre pour définir la constante d'Avogadro, puis en déduire une valeur de la constante de Planck en utilisant d'autres constantes fondamentales connues.

Réaliser les unités

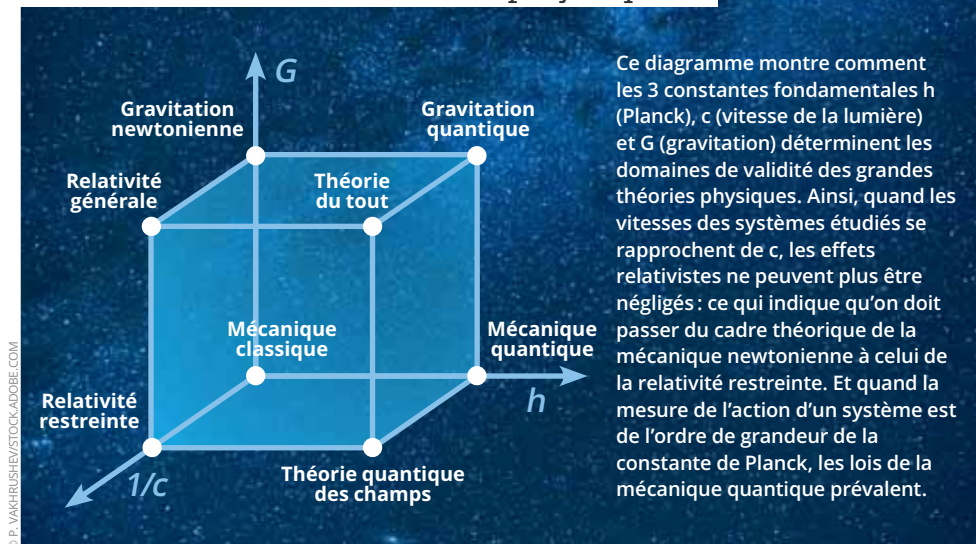
Là encore, les discussions ont été tendues. « Les deux méthodes ne donnent pas exactement le même résultat. Du coup, certains auraient préféré retarder un peu l'échéance pour adopter le nouveau système », relève Christian Bordé. Pour autant, « les différentes mesures sont toutes dans les marges d'erreur fixées par le Comité consultatif des masses et des grandeurs associées », précise François Nez. Une façon de dire qu'il faut bien finir par trancher.

Pour la petite histoire, c'est une équipe française du Laboratoire commun de métrologie LNE-Cnam qui a fourni la valeur de la constante de Boltzmann (k) avec l'incertitude relative la plus faible, soit $0,57 \times 10^{-6}$, inférieure d'un facteur trois à l'état de l'art antérieur. Si bien que la valeur obtenue par les physiciens français contribuera pour 55 % de la valeur de k , qui sera *in fine* gravée dans le marbre. Par ailleurs, la France contribue à la valeur de h grâce à la balance de Kibble du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) de Trappes, et la mesure d'autres constantes fondamentales au Laboratoire Kastler-Brossel.

Précisément, ces ajustements fins sont l'œuvre du Comité des données pour la science et la technologie (Codata)³, chargé de tenir à jour la liste et la valeur des constantes fondamentales de la physique depuis 1966. « Notre travail consiste à réaliser la synthèse des différentes mesures jugées valides pour déterminer les constantes fondamentales. Leurs valeurs les plus probables sont obtenues par un ajustement de type « moindres carrés » à partir de toutes les mesures et des relations de la physique qui relient ces constantes. On garantit ainsi la cohérence de l'ensemble », explique François Nez,

Constantes et théories physiques

Ce diagramme montre comment les 3 constantes fondamentales h (Planck), c (vitesse de la lumière) et G (gravitation) déterminent les domaines de validité des grandes théories physiques. Ainsi, quand les vitesses des systèmes étudiés se rapprochent de c , les effets relativistes ne peuvent plus être négligés : ce qui indique qu'on doit passer du cadre théorique de la mécanique newtonienne à celui de la relativité restreinte. Et quand la mesure de l'action d'un système est de l'ordre de grandeur de la constante de Planck, les lois de la mécanique quantique prévalent.





Les Arts et Métiers donnent la mesure

En écho à la 26^e réunion de la Conférence générale des poids et mesures qui, du 13 au 16 novembre 2018 à Versailles, officialisera les nouvelles définitions du kilogramme, de l'ampère, du kelvin et de la mole, l'exposition « **Sur mesure, les 7 unités du monde** », conçue par le Conservatoire national des

arts et métiers (Cnam) avec le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), et dont le CNRS est partenaire, sera présentée au musée des Arts et Métiers à Paris du 16 octobre 2018 au 5 mai 2019. S'adressant à un large public, l'exposition se décline en cinq chapitres permettant d'explorer l'omniprésence de la mesure dans notre quotidien, son histoire, sa symbolique, la complexité de l'acte de mesurer à travers la profusion des instruments présentés, et enfin ses applications dans de nombreux secteurs d'activités. Des vidéos invitent le visiteur à « rencontrer » chercheurs et spécialistes pour comprendre pourquoi et comment sont définies les sept unités fondamentales qui nous permettent de quantifier le monde.

» www.arts-et-metiers.net

Par ailleurs, le CNRS a voulu engager une réflexion interdisciplinaire sur le rôle et les enjeux de la mesure pour les sciences, à travers le colloque « **Tous mesureurs, tous mesurés. La science au cœur de la société** », organisé au siège de l'organisme les 18 et 19 octobre. Un espace « démo » présentera parallèlement aux visiteurs innovations, expériences et dispositifs autour de la mesure.

» <https://bit.ly/2Lkknw>

membre du Codata. Cohérence que le CIPM a jugée suffisante fin 2017 lors de sa 106^e session, prenant acte que les conditions fixées pour procéder à la révision du SI étaient remplies, ce qui a ouvert la voie à l'adoption du nouveau système par la CGPM prévue en novembre.

Des valeurs non calculables

« *La valeur numérique de n'importe quelle constante dépend complètement du système d'unités choisi* », rappelle toutefois Jean-Philippe Uzan. Par exemple, les physiciens des hautes énergies ont parfois recours aux unités de Planck, pour lesquelles les valeurs des constantes h , c et G sont par convention toutes fixées à 1, ce qui simplifie considérablement l'écriture des équations décrivant les lois physiques... mais donne des unités peu pratiques dès qu'on quitte le domaine de l'infiniment petit.

Le physicien et épistémologue Jean-Marc Lévy-Leblond⁴ note que « *ces constantes universelles ne jouent pas seulement un rôle d'étalon dans la définition et la mesure des quantités physiques. Elles sont en outre utilisées comme normes de validité pour les théories physiques. Cet aspect se résume souvent dans des assertions telles que : "la relativité galiléenne est obtenue à partir de la relativité einsteinienne quand la constante c tend vers l'infini", ou encore : "la mécanique quantique se ramène à la mécanique classique lorsque la constante de Planck tend vers zéro".* »

Les constantes « exactes » fixées par le SI ne sont en fait qu'un sous-ensemble de la trentaine que l'on retrouve dans les équations décrivant les lois physiques qui régissent notre Univers : cela va de la constante de gravitation aux masses des particules élémentaires en passant par les constantes de couplage des différentes forces de la nature. Ne pouvant pas être calculées, ces constantes fondamentales soulignent aussi les limites de nos théories physiques. « *La plupart des physiciens sont convaincus qu'une future théorie des particules fondamentales expliquera (ou du moins devrait expliquer) la diversité de leurs masses à partir de quelques constantes d'un niveau plus profond, que ce soit les masses de constituants plus élémentaires, ou une certaine longueur caractéristique, relève ainsi Jean-Marc Lévy-Leblond. Quand on aura construit cette théorie, ces masses sortiront complètement du tableau des constantes fondamentales, et leur statut deviendra celui de quantités dérivées.* »

Synthétiser des concepts

Le nombre et le statut des constantes auxquelles ont recours les physiciens reflètent l'évolution des théories physiques en rendant explicite l'unité de certains

phénomènes physiques. « *En établissant des ponts entre des quantités autrefois jugées incommensurables, les constantes permettent l'émergence de nouveaux concepts*, remarque Jean-Philippe Uzan. Par exemple, *la synthèse entre espace et temps, la constante de Planck h permet de relier les concepts d'énergie et de fréquence et la constante gravitationnelle G crée un lien entre matière et espace-temps.* » (Voir infographie page 22.) Une unification conceptuelle qui change le statut des constantes en question et peut même aboutir à l'abandon de certaines grandeurs et unités. « *La découverte par joule du fait que chaleur et énergie étaient deux formes d'énergie a fait que la constante de Joule, qui exprime la proportionnalité entre travail et chaleur, a perdu tout sens physique et qu'elle est devenue un simple facteur de conversion entre unités mesurant la chaleur (calories) et le travail (joule). De nos jours la calorie est devenue obsolète.* » **II Y. P.**

1. Unité CNRS/Sorbonne Université 2. Bureau international des poids et mesures, The International System of Units (SI), 9^e édition. PDF consultable sur le site : www.bipm.org 3. « The CODATA 2017 Values of h , e , k , and N_A for Revision of the SI », D. B. Newell et al., *Metrologia*, 2018, vol. 55. 4. « Sur la nature conceptuelle des constantes physiques », J.-M. Lévy-Leblond, *Cahiers philosophiques*, 2013, vol. 135 (4) : 92-112.



Hégra livre ses splendeurs

SOCIÉTÉS 

Archéologie. Pour ouvrir au tourisme international la région d'Al-Ula et les vestiges de la cité de Hégra, l'Arabie saoudite a misé sur le savoir-faire de la France en signant un accord en avril. Visite de ce joyau du Proche-Orient antique grâce aux seize ans de recherche de la Mission archéologique franco-saoudienne, et gros plan sur les Nabatéens qui occupèrent cette oasis entre le 1^{er} siècle avant notre ère et le début du II^e siècle de notre ère.

TEXTE PHILIPPE TESTARD-VAILLANT AVEC LA RÉDACTION

PHOTOS HUBERT RAGUET CARTE PÉTRA. MÉTROPOLE DE L'ARABIE ANTIQUE, F. VILLENEUVE, L. NEHMÉ/ÉDITIONS DU SEUIL, 1999



1

1. La cité antique de Héra (Madâ'in Sâlih), inscrite en 2008 au patrimoine mondial de l'Unesco. Derrière les tombeaux monumentaux se dresse le Jabal Ithlib, montagne sacrée des Nabatéens. Ces riches marchands contrôlaient en grande partie le commerce caravanier de l'encens, de la myrrhe et des aromates, depuis l'actuel Yémen jusqu'aux ports de la Méditerranée.

2. Dans son extension maximale, le royaume nabatéen, dont Pétra était la capitale, couvrait le sud de la Syrie, la Jordanie, le nord de la péninsule Arabique, une partie du Néguev et, peut-être, le Sinaï.



2



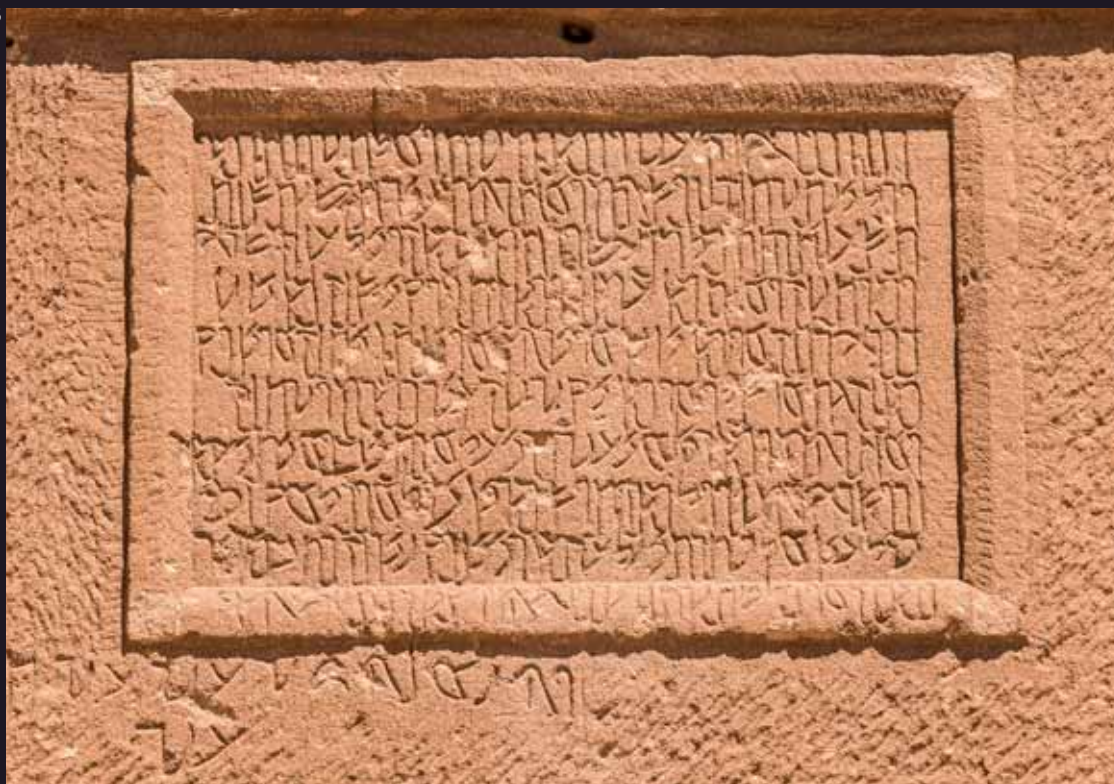
3. Pour tailler dans le grès des falaises la centaine de tombes monumentales du site, les artisans devaient d'abord façonner un méplat dans la partie haute de la montagne. Ils descendaient ensuite progressivement sans l'aide d'échafaudages, faute de bois.

4. Spécialiste de la civilisation nabatéenne, l'archéologue Laïla Nehmé, ici dans la chambre funéraire d'un tombeau, codirige la Mission archéologique franco-saoudienne depuis 2002.



5. De nombreuses tombes portent une inscription de ce type au-dessus de l'entrée. Elles fournissent de précieuses informations sur les défunts, leur statut social, leur famille, etc. Le rituel funéraire, reconstitué grâce à une tombe inviolée, laisse aussi penser que les Nabatéens croyaient en un au-delà, à une vie après la mort.

5





☰ Ce portfolio est tiré de l'entretien avec Laïla Nehmé, « Hégra livre ses splendeurs », à lire sur lejournald.cnrs.fr

6. Dégagement minutieux d'un vase complet dans l'ancien centre urbain de Hégra. La zone résidentielle, entourée d'un rempart en brique crue, s'étendait sur 52 hectares. Elle contenait des îlots d'habitation, des bâtiments plus grands et peut-être des marchés, des places et des jardins.

7. Au nord-est du site, un étroit passage du Jabal Ithlib mène au secteur réservé aux confréries religieuses. À l'entrée se trouve le Dîwân, salle de banquet taillée dans la roche, avec ses 3 banquettes. On y partageait des repas et on y honorait les dieux, les rois ou de simples défunts.



7

**À LIRE :**

Les tombeaux nabatéens de Héggra, Laila Nehmé (dir.), Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, coll. « Épigraphie & Archéologie », 2 volumes, décembre 2015, 100 €



En mission dans le système solaire

UNIVERS



Astronomie. Lancées en 2018, deux missions internationales à forte participation française promettent de livrer des informations inédites sur deux astres emblématiques de notre système solaire : Mars et le Soleil.

PAR XAVIER MÜLLER ET MARTIN KOPPE

Un ticket pour le Soleil

Le moment est historique. Nous allons enfin savoir à quoi ressemble, de près, l'étoile de notre système planétaire. Le 12 août, la Nasa a en effet lancé depuis la Floride le satellite Parker Solar Probe. L'objectif de cette mission audacieuse ? Plonger dans la couronne solaire, cette sorte d'« atmosphère » qui s'étend jusqu'à plusieurs millions de kilomètres de la surface et qui forme le fameux halo blanc visible sur les clichés d'éclipse.

Un bouclier contre la chaleur

La sonde avancera à pas prudents vers l'étoile. Après l'avoir frôlée une première fois à l'automne, elle effectuera autour d'elle une série de révolutions de forme elliptique, la plus proche l'amenant à 6 millions de kilomètres de la surface. Là, elle sera aux premières loges pour résoudre deux grands mystères de l'astrophysique. Les quatre instruments qu'elle emporte, auxquels ont contribué plusieurs laboratoires français liés au CNRS¹, fourniront en effet des informations inédites, d'une part sur le plasma solaire, cette mélasse de particules et de champs électromagnétiques qui compose la couronne, d'autre part sur l'origine du vent solaire. Cette mission va ainsi écrire une nouvelle page de la conquête spatiale, digne du survol des planètes géantes par les sondes Voyager dans les années 1970 ou de la mission de la sonde Rosetta sur la comète Tchouri, il y a deux ans.

Aller « toucher » le Soleil ? Enfin, aurait-on envie de dire. L'envoi d'un satellite éclaireur vers le cœur du

système solaire apparut comme une nécessité dès l'aube de l'âge spatial. Mais sa concrétisation bute depuis des décennies sur un obstacle : le regard brûlant du Soleil. Même à une distance de plusieurs fois le rayon solaire, le rayonnement émis par l'astre est encore 600 fois supérieur à celui reçu par un vacancier sur une plage ! Et suffit à faire fondre n'importe quel matériau ordinaire.



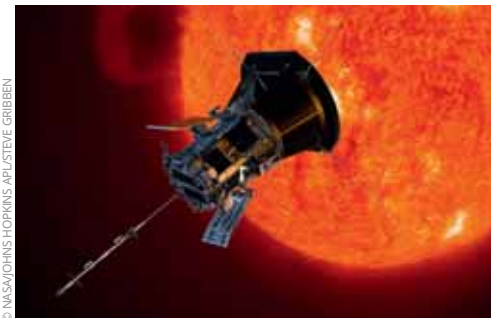
© NASA/JOHNS HOPKINS AP/LEO WHITMAN

Pour éviter de se griller les ailes, la sonde brandira devant elle un bouclier thermique ultrarésistant. « La mission a été rendue possible grâce au développement de matériaux composites proches de ceux qui équipent le nez des navettes spatiales, à base de composite carbone et de céramiques », explique un des coordinateurs de la mission, Milan Maksimovic, du Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (Lesia)² de Meudon.

RAYON SOLAIRE

Il s'agit du rayon du Soleil, une unité de longueur souvent utilisée pour exprimer la taille des étoiles.

De la taille d'une petite voiture, Solar Probe possède une silhouette de danseuse avec son bras télescopique et sa partie évasée ressemblant à une jupe. Le bouclier, épais de 11 cm, est placé sous cette dernière et protégera le satellite à chacun de ses 25 passages près du Soleil, qui l'amèneront en 2024 à son point le plus proche. Pendant toute cette durée, la sonde tirera son énergie de panneaux solaires qui se rangeront derrière le bouclier les ...



© NASA/JOHNS HOPKINS AP/LEO WHITMAN

Vue d'artiste de la sonde Parker Solar Probe se dirigeant vers le Soleil. Elle s'approchera à 6 millions de km de sa surface, une proximité inédite.

Le système de protection thermique de la sonde est abaissé dans une chambre à vide de la Nasa pour des tests, en février 2017.

1. Les cinq laboratoires impliqués dans la mission Parker Solar Probe, avec le soutien financier du Cnes, sont l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie, le Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique, le Laboratoire de physique et chimie de l'environnement et de l'espace, le Laboratoire de physique des plasmas et le laboratoire Procédés, matériaux et énergie solaire du CNRS. 2. Unité CNRS/Observatoire de Paris/Université Paris-Diderot/Sorbonne Université/Université Versailles-Saint-Quentin/Cnes.



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

Une partie des tests thermiques de la mission Parker Solar Probe a été effectuée dans le four solaire géant d'Odeillo (Pyrénées-Orientales).

Flambée solaire et éjection de masse coronale observées le 14 juillet 2017. On distingue les particules en spirale le long des lignes du champ magnétique.



... semaines de plus forte intensité lumineuse.

Milan Maksimovic se réjouit de voir enfin ce projet au long cours se réaliser : « Jusqu'à présent, nos connaissances sur le Soleil venaient exclusivement d'études menées à distance, notamment grâce au satellite SoHO³. Avec Parker Solar Probe, nous allons pouvoir disposer de mesures in situ, c'est une première. » Des données qui devraient permettre d'élucider une bizarrerie qui ne cesse de déconcerter les physiciens depuis sa découverte, dans les années 1940.

L'énigme de la couronne

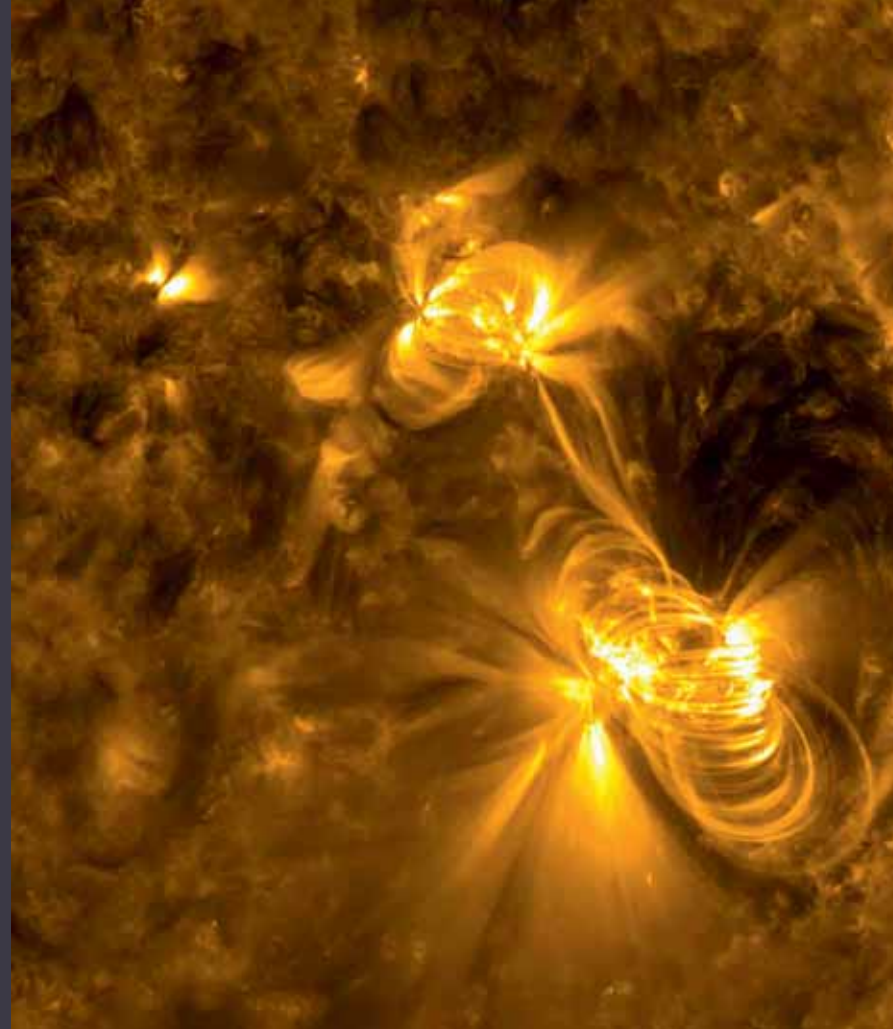
« La sonde va nous aider à répondre à l'un des grands secrets du Soleil : l'origine du chauffage de la couronne, commente Thierry Dudok de Wit, du Laboratoire de physique et chimie de l'environnement et de l'espace (LPC2E)⁴, à Orléans. La surface du Soleil atteint 6 000 °C et

pourant, quand on s'éloigne de la surface, elle monte à plusieurs millions de degrés. Comme si vous vous éloigniez d'un feu de cheminée et que l'air se réchauffait ! »

Le LPC2E a fabriqué l'un des capteurs de champ magnétique qui testeront les théories actuelles de la surchauffe de la couronne. Selon une hypothèse, les températures extrêmes résulteraient de l'influence d'ondes électromagnétiques, à la manière d'une plaque à induction chauffant une casserole. Mais elles pourraient être aussi bien causées par une multitude de petites éruptions solaires invisibles de la Terre. La matière expulsée chaufferait alors l'atmosphère à la suite de phénomènes complexes de reconfigurations rapides des lignes de champ magnétique, un peu comme si celles-ci fouettaient le milieu et l'excitaient. La signature de l'un ou l'autre mécanisme incriminé devrait être visible sur les signaux mesurés. Le détecteur du LPC2E est placé au bout du bras télescopique, loin des perturbations électromagnétiques dues au satellite lui-même.

Comme le bouclier, les instruments de la sonde ont également dû faire la preuve de leur résistance à la chaleur. S'ils n'encaisseront pas tous directement la lumière du Soleil, ils seront quoi qu'il arrive soumis à des variations extrêmes de température au cours des orbites. Une partie des tests thermiques a été menée au four solaire géant – de la taille de l'Arc de triomphe – installé dans les Pyrénées, à Odeillo, et placé sous la responsabilité du laboratoire Procédés, matériaux et énergie solaire (Promes) du CNRS⁵.

« Grâce au four solaire et à nos équipements de tests, nous sommes les seuls au monde à pouvoir éprouver l'équipement de Solar Probe jusque dans ses derniers retranchements et dans des conditions proches de celles rencontrées près du Soleil, note non sans fierté Marianne Balat-Pichelin, directrice adjointe du laboratoire. La focalisation de la lumière solaire à l'intérieur d'une chambre à vide permet de chauffer à plus de 2 000 °C un objet de grande taille, exactement comme s'il se trouvait dans l'espace ! » Ces





© NASA SOLAR DYNAMICS OBSERVATORY

tests ont notamment conduit à un choix drastique sur le type de tungstène utilisé dans la fabrication du capteur de particules qui équipe la sonde. Un capteur qui fournira des indices supplémentaires pour expliquer le chauffage, mais aussi les effets néfastes du Soleil...

Le mystère du vent solaire

Nous sommes le 13 mars 1989, au Québec. Un orage magnétique provoque l'arrêt des centrales électriques. L'origine du phénomène : une bourrasque du vent solaire venue percuter la Terre. Le vent solaire est un plasma craché par l'étoile au niveau de la couronne et qui voyage dans l'espace à une vitesse de 200 à 800 kilomètres par seconde. L'origine du vent solaire et de ses irrégularités est l'autre grand mystère sur lequel va enquêter Solar Probe.

Car les physiciens ignorent pourquoi le Soleil exhale ce flux de particules comme s'il était subitement pris de violentes quintes de toux. Si,

depuis l'événement de 1989, les fournisseurs d'électricité ont appris à se prémunir contre les accidents de ce type, les orages magnétiques continuent de faire planer un risque sur nos sociétés : ils altèrent les données GPS, pourraient fausser l'orbite des satellites... Un orage survenant en moyenne chaque année, une perturbation magnétique particulièrement violente pourrait aller jusqu'à entraîner une coupure d'Internet ou une collision entre avions de ligne en raison d'une erreur sur leurs signaux GPS.

Si les données récoltées par la sonde devraient contribuer à mieux évaluer ces menaces, « *étudier le vent solaire présente également un intérêt en planétologie*, rappelle Milan Maksimovic. *Les planètes, les comètes et les astéroïdes sont tous soumis à son influence. C'est lui qui, par exemple, en érodant la surface de la Lune, a réduit en poussières son sol au départ solide. C'est lui encore qui, en pelant l'atmosphère de Mars, a fait s'évaporer les océans de la planète et fait disparaître la vie qu'elle abritait peut-être.* »

“Avec Parker Solar Probe, nous allons pouvoir disposer de mesures in situ, c'est une première.”

Comment la couronne engendret-elle le vent solaire ? Des pistes théoriques suggèrent que la clé du phénomène résiderait en partie dans les lignes de champ magnétique qui forment une chevelure rougeoyante à la surface du Soleil. Lorsque ces lignes, véritables autoroutes à particules, repiquent vers la surface, elles

dessinent les fameuses boucles coronales, ces néons géants en demi-cercle qui étincellent sur les photographies. Les boucles coronales pourraient souffler les alizés solaires, autrement dit les vents qui soufflent en permanence vers notre planète.

« *Nous savons que les boucles ont la même composition que le vent solaire le plus lent*, explique Alexis Rouillard, un spécialiste de la dynamique de la couronne qui travaille à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie (Irap)⁶, à Toulouse. *Peut-être existe-t-il un mécanisme qui permet aux boucles de s'ouvrir et de relâcher de la matière vers l'espace ?* » Le chercheur a contribué à la conception de la caméra grand angle embarquée sur le satellite et dont les images, en faisant le lien entre l'allure à grande échelle des lignes de champ magnétique et la composition locale du plasma, devraient aider à y voir plus clair sur les processus en jeu.

Des bangs supersoniques

Quant aux bourrasques, à l'origine des orages magnétiques, elles seraient la version solaire des bangs supersoniques des avions. L'hypothèse dominante veut que la couronne soit en effet régulièrement traversée par des ondes de choc se propageant à haute vitesse sur laquelle « surferaient » les particules du vent. Le mécanisme accélérerait les particules par paquets. « *Si nous découvrons que les faisceaux de particules du plasma fluctuent à l'unisson avec ces ondes de choc, dont l'existence n'est plus débattue, ce sera un bon indice que ces ondes jouent un rôle clé dans le processus d'accélération des particules aux hautes énergies* », assure Alexis Rouillard.

Parker Solar Probe complètera ces analyses en fournissant des images complètement nouvelles ...

3. Lancé en 1995 par le Cnes et la Nasa et toujours en activité, Soho – pour Solar and Heliospheric Observatory – a révolutionné nos connaissances sur le Soleil. Il décrit une orbite en halo autour d'un point situé à 1,5 million de kilomètres en avant de la Terre dans la direction de l'astre. 4. Unité CNRS/Cnes/Université d'Orléans. 5. Unité propre du CNRS, conventionnée avec l'université de Perpignan via Domitia. 6. Unité CNRS/Université Toulouse Paul-Sabatier.

À l'écoute des tremblements de Mars

... et tridimensionnelles des nuages d'électrons qui accompagnent les brises de vent solaire. « Ces particules extrêmement réactives aux fluctuations du champ électromagnétique interplanétaire jouent un rôle essentiel dans la création du vent solaire, même si nous ignorons lequel précisément », ajoute Matthieu Berthomier, dont l'équipe a conçu le circuit intégré de détection des électrons, au Laboratoire de physique des plasmas⁷, à Paris. Pesant seulement un gramme et extrêmement économe en énergie, le circuit a coûté, en développement, près d'un million d'euros. « Nous sommes les seuls à fabriquer ce type de circuit qui sera aussi utilisé dans la mission européenne Solar Orbiter qui partira, elle, vers le Soleil en 2020. » Solar Orbiter partage certains objectifs avec sa consœur américaine, mais en se positionnant plus loin du Soleil, à 70 rayons solaires, elle se concentrera davantage sur la façon dont les perturbations solaires affectent la Terre.

Preuve que Parker est une mission hors norme, des modifications de dernière minute ont été effectuées sur la sonde avant son lancement, une pratique rare dans l'industrie spatiale. « C'est aussi ce qui est excitant avec cette mission : on sort de notre zone de confort, comme lors de la mission Rosetta, s'enthousiasme Thierry Dudok de Wit. On prend des risques, mais je suis persuadé qu'aller à la rencontre de l'inconnu paiera. » Pendant des millénaires, le Soleil a été vénéré par les civilisations. La mission Parker Solar Probe va nous permettre de nous en approcher comme jamais. **X. M.**

La structure des profondeurs de Mars demeure largement méconnue, par manque de données sismologiques. La mission InSight¹, du Jet Propulsion Laboratory de la Nasa, s'est donc fixé pour objectif d'éclaircir cette zone d'ombre en installant une toute première station géophysique sur son sol. Partie le 5 mai 2018 de la base californienne de Vandenberg, la sonde se posera sur la planète rouge le 26 novembre prochain.

Bien que l'initiative soit étasunienne, plusieurs équipes françaises participent à InSight (lire l'encadré).

L'instrument principal de la mission, SEIS², a ainsi été développé sous la maîtrise d'œuvre du Centre national d'études spatiales (Cnes) et sous la responsabilité scientifique de l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP)³, avec la participation de la société Sodern et de plusieurs partenaires internationaux⁴.

Une première mondiale

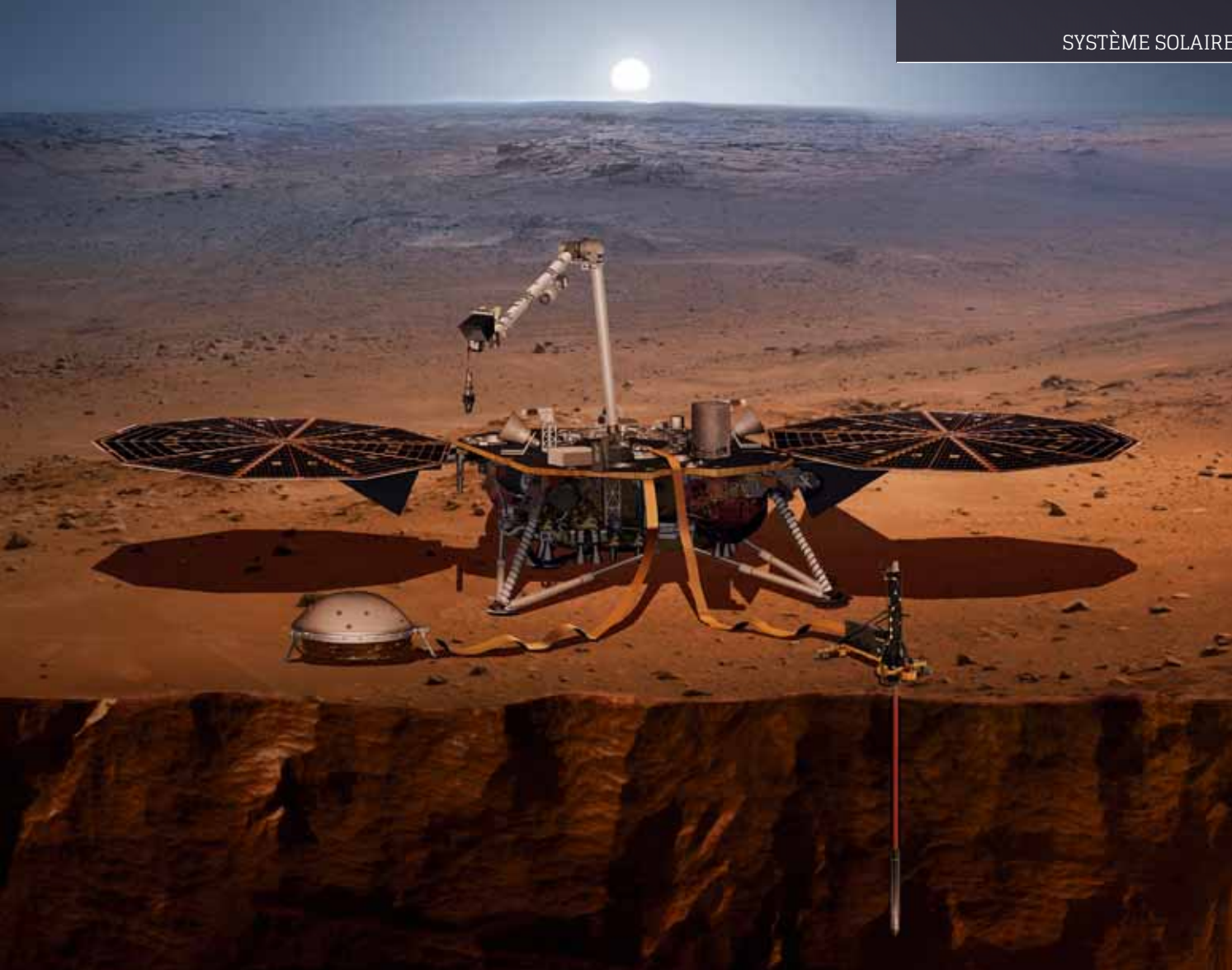
Avant de se poser sur la plaine volcanique d'Elysium Planitia, à 600 kilomètres du cratère de Gale où opère le robot Curiosity (voir carte p. 35), la mission doit entreprendre un voyage de six mois et 485 millions de kilomètres. L'arrivée sera suivie d'une délicate opération de déploiement. « Si des astronautes ont pu poser un capteur sismique sur la Lune, InSight sera la toute première mission de la Nasa installée à la surface d'une planète par un bras robotique, s'enthousiasme Philippe Lognonné, géophysicien à l'IPGP et professeur à l'université Paris-Diderot et à l'Institut universitaire de France. Il faudra ainsi placer le capteur, le couvrir, dérouler un câble pour le relier au lanceur... Ce sera une grande première en matière de robotique. »

Situé très près de l'équateur de Mars, Elysium Planitia assurera un ensoleillement maximal afin

InSight côté français

Outre la contribution du Cnes et de l'Institut de physique du globe de Paris, de nombreux laboratoires français ont participé à la mission InSight. Parmi eux, l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace⁵, l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie⁶, l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie⁷ et le laboratoire Navier⁸ ont contribué aux développements logiciels et instrumentaux. De leur côté, le Laboratoire de planétologie et géodynamique⁹, le laboratoire GéoAzur¹⁰ et le Laboratoire de météorologie dynamique¹¹ participeront aux opérations et à l'analyse de ces données qui aideront à comprendre la formation et l'évolution géologique de la planète¹².

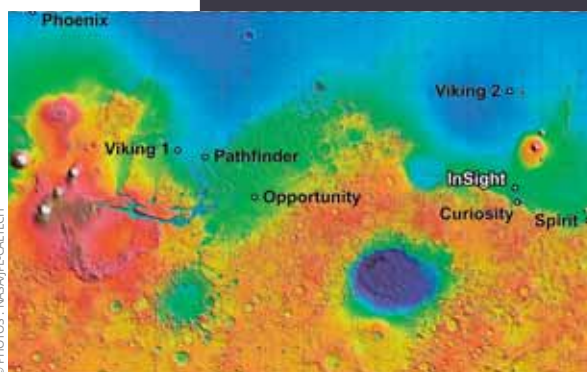
7. Unité CNRS/École polytechnique/Observatoire de Paris/Univ. Paris-Sud/Sorbonne Université. 1. Interior Exploration using Seismic INvestigations, Geodesy and Heat Transport (exploration intérieure par l'usage d'investigations sismiques, de géodésie et de transport de la chaleur). 2. Seismic Experiment for Interior Structures (expérience sismique pour les structures intérieures). 3. Unité CNRS/IPGP/Univ. Paris-Diderot/Univ. de La Réunion. 4. École polytechnique fédérale de Zurich, Institut Max-Planck, Imperial College. 5. Isae-SupAero. 6. Irap (CNRS/Univ. Paul-Sabatier). 7. IMPMC (CNRS/IRD/MNHN/Sorbonne Université). 8. Unité CNRS/École des ponts ParisTech/IFSTTAR. 9. LPG (CNRS/Univ. de Nantes/Univ. d'Angers). 10. Unité CNRS/Univ. Sophia Antipolis/Observatoire de la Côte-d'Azur/IRD. 11. LMD (CNRS/École polytechnique/ENS Paris/Sorbonne Université). 12. Notons aussi l'implication du Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LMA) pour l'étude de la propagation des ondes acoustiques sismiques sur Mars.



d'alimenter les panneaux solaires pendant les deux années du programme. Rien n'est laissé au hasard, car les précédentes tentatives d'étudier la structure de Mars ont rencontré un cuisant échec. Le projet russe Mars96 avait ainsi sombré dans le Pacifique avec tous ses instruments, dont deux sismomètres déjà sous responsabilité scientifique de l'IPGP.

« La seule expérience de sismologie réalisée sur Mars a été menée à l'occasion de la mission Viking dans les années 1970, relate Philippe Lognonné, investigateur principal de SEIS. Elle n'a pas détecté de séisme, car, en dehors d'un événement isolé, toutes les vibrations de l'instrument étaient corrélées à des bourrasques. »

Nous ne disposons donc d'aucune donnée sur l'activité sismique de Mars. La planète aurait été très agitée pendant son premier milliard



d'années, avec une tectonique associée au volcanisme et à des points chauds. Cette activité s'est estompée depuis, même si l'on sait que certaines coulées du mont Elysium ont moins de 10 millions d'années. « Détecter des secousses ou tremors volcaniques serait une très bonne surprise, avoue Philippe Lognonné, mais cette possibilité n'a pas été prise en compte lors du design de SEIS. »

Vue d'artiste de l'astromobile de la mission InSight sur Mars, qu'il devrait atteindre vers le 26 novembre 2018.

La mission InSight s'installera sur la plaine volcanique Elysium Planitia, à 600 km du rover Curiosity.

Voir sous la croûte martienne

Les modèles théoriques donnent plutôt à penser que le sol martien est secoué de la même manière que celui de la Lune, mais plus régulièrement. Le programme Apollo avait ainsi relevé une trentaine de séismes superficiels de magnitudes de 4 à 5,5 sur notre satellite, étalés sur sept ans.

Contrairement à la Terre, la Lune et, a priori, Mars ne sont pas composés d'une série de plaques tectoniques. Leur activité sismique est du coup bien plus réduite, limitée aux déformations provoquées par leur refroidissement. « Le rapport de ...

... taille entre Mars et la Lune devrait se retrouver dans la sismicité, détaille Philippe Lognonné. On espère ainsi détecter une cinquantaine de séismes par an, dont une dizaine de forte magnitude, jusqu'à 5,5. Plus une secousse est importante, plus on peut en tirer d'informations. »

De la même manière que le son se comporte différemment dans l'air et dans l'eau, l'analyse de la vitesse des ondes sismiques permet de comprendre la structure et la nature des matériaux qu'elles traversent. Les séismes les plus puissants fournissent davantage d'éléments car les ondes aux fréquences élevées se propagent plus en profondeur, livrant au passage les clés de l'intérieur de Mars avec, par exemple, l'épaisseur de sa croûte.

Des capteurs ultrasensibles

Sur Terre, les séismes sont cependant étudiés par tout un réseau d'appareils, souvent disposés dans des caves sismiques spécialement conçues pour éliminer les interférences. SEIS se retrouvera à la fois isolé et exposé aux rudes conditions de Mars. « Nous nous intéressons à

la vitesse de propagation des ondes, précise Philippe Lognonné. Sans connaître leur point de départ, nous n'avons besoin que d'un temps de passage et d'une distance. »

Lors d'un séisme suffisamment important, un premier train d'ondes appelé R1 va agiter le sismomètre. Il sera suivi de R2, la même série d'ondes mais passée par l'autre côté de la planète ! L'objectif est de capter R3 un peu moins de deux heures plus tard (R3 étant en réalité R1 après son tour complet de Mars). La durée écoulée entre R1 et R3 correspond au temps mis par les ondes pour parcourir la circonférence de la planète, une longueur connue.

« Plus une secousse est importante, plus on peut en tirer d'informations. »

Les chercheurs en déduisent alors la vitesse de propagation, sans avoir à localiser l'épicentre du séisme. Une seconde méthode utilisera les impacts de météorites, des chocs qui produisent eux aussi des ondes exploitables.

Les dizaines de milliers de kilomètres traversés atténuent cependant les ondes R3, qui finissent par n'être détectables que par des instruments extrêmement sensibles et bien installés. SEIS est composé de trois sismomètres à très large bande, entre 5 millihertz et 5 hertz, construits par l'IPGP, ainsi que trois autres couvrant une plage de 0,1 à 50 hertz, conçus à l'Imperial College et à l'université d'Oxford.

« L'association de deux types de capteurs permet de très bonnes performances sur des périodes courtes comme longues, assure Philippe

Lognonné. Le chevauchement sur la bande de fréquence intermédiaire aidera en cas de panne. » Toute mission martienne doit en effet parer aux risques d'incidents et aux maigres possibilités de réparations à distance.

L'instrument est ainsi protégé par une sphère de titane dont la conception a été dirigée à l'IPGP par Sébastien de Raucourt, ingénieur de recherche à l'université Paris-Diderot et médaille de cristal du CNRS 2018. « Le cœur du sismomètre est si sensible qu'il doit être gardé sous vide, à l'abri des frottements de l'air et des poussières, précise-t-il. Même l'atmosphère ténue de Mars suffirait à le perturber. La structure rigide en titane transmet cependant très bien les vibrations du sol. »

Cette coque de vingt centimètres de diamètre offre également une protection thermique, alors que la température peut changer de plus de 60 degrés entre le jour et la nuit. Un paravent fournira un abri supplémentaire au sismomètre. Le système de nivellement doit par exemple garantir que SEIS est bien placé à l'horizontale, quel que soit l'état du sol.

« L'une des plus grandes difficultés est d'abord de s'assurer que SEIS supporte les énormes chocs et vibrations du lancement et de l'atterrissage, reconnaît Sébastien de Raucourt. Il sera à la fois protégé par des amortisseurs, tandis que des butées, conçues pour absorber les vibrations de la fusée, caleront les parties mobiles. »

La mission InSight acheminera deux autres instruments : la sonde thermique allemande HP3¹³ et l'expérience RISE¹⁴. Celle-ci étudiera les variations de l'axe de rotation de Mars, un phénomène lié à l'état du noyau de la planète. De quoi compléter l'arsenal pour enfin explorer les profondeurs de la planète rouge. **M. K.**

Cette sphère en titane, livrée par l'Institut de physique du globe de Paris et la société Sodern, renferme les trois sismomètres à large bande de fréquence qui constituent le cœur de l'instrument SEIS.



© E. GRIMAUDON

13. Heat flow and physical properties probe (sonde des flux de chaleur et des propriétés physiques). 14. Rotation and interior structure experiment (expérience de rotation et de structure interne).

EN ACTION



*Plonger parmi les requins,
vivre dans un appartement
connecté et dompter les hadrons
pour lutter contre le cancer.*

ILLUSTRATION : SIMON LANDREIN POUR CNRS LE JOURNAL

Plongée dans la meute de requins

VIVANT

Biologie marine. À Fakarava, des centaines de requins gris de récif s'assemblent lors de chasses nocturnes frénétiques. Le biologiste Johann Mourier et le photographe plongeur Laurent Ballesta se sont infiltrés au cœur de la « meute ».

PAR LAURE CAILLOCE

Chaque année, en juin, la passe sud de l'atoll de Fakarava, dans l'archipel des Tuamotu en Polynésie française, abrite l'une des plus grosses concentrations de requins au monde. Des centaines de requins gris de récif s'y retrouvent pour un festin sanglant : par milliers, les mérours profitent en effet de la pleine lune pour venir pondre dans la passe. « *C'est en étudiant cette aggrégation unique de mérours – ils sont 18 000 le jour de la ponte, et se volatilisent aussitôt après – que l'on s'est rendu compte du nombre impressionnant de requins qui les convoitaient* », raconte Johann Mourier, biologiste marin au Criobe¹. Le tournage du documentaire *Le mystère Mérou*, réalisé en 2014 avec le photographe plongeur Laurent Ballesta², permet au chercheur d'estimer la quantité de squales – ils sont près de 700 dans cette passe d'à peine un kilomètre de long ! – et d'en marquer quelques-uns.

700 requins dans la nuit

Décidé à en savoir plus, il revient en 2017 avec un ambitieux projet : tapisser le fond de la passe de récepteurs acoustiques, 25 au total, et équiper quarante requins

d'émetteurs d'ondes sonores dotés d'accéléromètres, afin de suivre leurs moindres faits et gestes.

Un nouveau tournage est organisé par Laurent Ballesta, consacré cette fois aux seuls requins gris. L'objectif des deux compères, outre le marquage des requins, est de plonger au plus près de la « meute » afin de filmer les squales le jour mais aussi la nuit, lorsqu'ils se mettent à chasser. Johann Mourier ne boude pas son plaisir d'avoir participé au documentaire *700 Requins dans la nuit*³, diffusé en juin 2018 sur Arte : « *C'est une opportunité unique de vulgariser mes recherches, mais aussi de disposer d'un matériel scientifique – en l'occurrence, des heures et des heures de vidéo – auquel je n'aurais jamais accès autrement.* »

Si l'on dénombre près de 500 espèces de requins dans le monde – dont un tiers menacé de disparition –, on en sait peu sur cet animal. Son organisation sociale reste mystérieuse, son mode de vie et son régime alimentaire mal documentés en milieu naturel... « *Les requins n'ont pas l'occasion de manger tous les jours, et ont souvent l'estomac vide lorsqu'on les attrape* », explique le biologiste.

► Chasser en groupe maximise les chances pour les requins gris de Fakarava d'attraper une proie.

1. Centre de recherches insulaires et observatoire de l'environnement (CNRS/EPHE/UPVC). 2. Laurent Ballesta a notamment travaillé avec Luc Jacquet à l'occasion du film *L'empereur* (2017). 3. *700 requins dans la nuit*, de Luc Marescot (2018), produit par Arte France, Le Cinquième rêve, Andromède Océanologie, Les Gens bien productions, Filmin Tahiti et CNRS Images. 4. Accrochées à l'aileron des requins, elles s'en détachent automatiquement au bout de 48 heures.

Un marquage sous hypnose

Pour implanter des émetteurs sonores dans l'abdomen d'un requin de 25 kilos et de plus de 1,50 mètre de long, les plongeurs ont dû ruser. « Un requin que l'on retourne sur le dos tombe immédiatement en immobilité tonique, une sorte de transe pendant laquelle il ne bouge plus, explique Johann Mourier. Laurent Ballesta a donc proposé d'attraper les requins gris au lasso, pour pouvoir les retourner et les ramener le long du bateau dans cette position. » Une technique de marquage un peu sportive mais efficace, qui a également permis de poser les caméras embarquées.



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

sorte le rôle de rabatteur, il n'y a pas de partage des proies (...) C'est celui qui réussit à s'emparer le premier du poisson qui le dévore tout

entier. Pour autant, cela reste une véritable interaction sociale, qui fait du requin un animal bien plus évolué qu'on voulait le croire jusqu'ici. »

Un écosystème à préserver

Les images ont permis de déceler un nombre impressionnant de proies possibles pour le requin gris : il croquerait près de 50 espèces de poissons et mollusques différentes ! « C'est la première étude qui montre de manière exhaustive le régime alimentaire d'un requin en milieu naturel », s'enthousiasme Johann Mourier. Grâce à un effet spécial de cinéma utilisant plusieurs dizaines de caméras (le « Bullet time shot », voir photo ci-dessous), Johann Mourier peut également figer certaines des scènes de prédation et se déplacer tout autour.

Outre l'agrégation de mérours à la pleine lune de juin, la passe de Fakarava accueille les pontes massives de nombreux autres poissons et offre aux requins un garde-manger régulièrement approvisionné. « Ce véritable service de livraison à domicile expliquerait leur sédentarité, avance Johann Mourier. Sur les 43 individus équipés d'émetteurs, seuls deux avaient quitté la passe six mois plus tard. » Et le chercheur d'en tirer un premier enseignement : « Protéger les requins et interdire leur chasse, comme c'est le cas depuis 2011 en Polynésie, est essentiel, mais nos premiers résultats montrent que cela n'est pas suffisant. C'est tout l'écosystème qui doit être préservé pour que le requin puisse y survivre. » À la différence de Fakarava, miraculeusement épargné par l'activité humaine et la pêche, la plupart des autres atolls de Polynésie ont vu disparaître les agrégations de poissons... et les rassemblements spectaculaires de squales. II

Un animal plus social que prévu

Dès que la nuit tombe, les squales se mettent en chasse. « La nuit, les poissons sont moins vigilants. Le requin est un piètre chasseur et favorise donc les chasses nocturnes, avec un pic d'activité les nuits de pleine lune, particulièrement bien éclairées, indique Johann Mourier. Mais ce que l'on a découvert grâce aux plongées de nuit, c'est que le requin gris de Fakarava chassait en groupe – une vraie surprise, car les scientifiques pensaient jusqu'ici ces animaux peu sociables. » Dans ce qui semble être un incroyable chaos, les informations fournies par les images et les balises sonores permettent de saisir une véritable organisation. « Chaque nuit, d'énormes spirales de requins se forment qui attaquent tous les poissons qui passent. Si la proie échappe à une première mâchoire, puis à une deuxième, voire une troisième, il y a peu de chance que la suivante ne réussisse pas à la croquer », explique Johann Mourier.

Mieux : grâce aux émetteurs implantés dans l'abdomen des requins, on peut voir se former des duos, voire des trios d'individus, qui restent à proximité durant toute la chasse, de 18 heures à minuit. « Ces duos relèvent plus d'une relation opportuniste que d'une vraie coopération, souligne le biologiste. Si l'un des requins joue en quelque



▲ Les 32 caméras de cette arche permettent de filmer les scènes en stop motion et sous tous les angles, un effet nommé « Bullet time shot ».

La céramique sert à tout !

MATIÈRE

Matériaux. Connues depuis la préhistoire, les céramiques s'invitent aujourd'hui dans de nombreuses applications de pointe grâce à l'inventivité des chercheurs. La recette de base, le frittage, est toujours la même : chauffer à haute température un amas de poudre pour que ses grains s'agglomèrent jusqu'à former une structure compacte. Propriétés de cette microstructure : porosité, résistance aux déformations (dureté) et aux températures élevées, stabilité, et même légèreté et transparence. De l'aéronautique à la chirurgie, panorama de ces travaux innovants.

PAR STÉPHANIE BELAUD

DES COMPOSITES ULTRARÉSISTANTS

Comme le diamant, les céramiques sont très dures mais, peu résistantes aux chocs, elles cassent facilement. Pour y remédier, on fabrique des céramiques composites renforcées par des fibres, elles-mêmes en céramique : les CMC¹. « Légers et résistants, nos CMC vont pouvoir remplacer les pièces métalliques des moteurs d'avion, améliorant le rendement des moteurs tout en réduisant la dépense énergétique et la pollution », commente Gérard-Louis Vignoles, directeur du Laboratoire des composites thermostructuraux (LCTS)². Ce type de recherches – également menées dans le cadre de programmes collaboratifs entre le CNRS et l'Onera – permettra de répondre à des besoins très spécifiques, comme la rentrée atmosphérique des objets spatiaux.

Dans un tout autre registre, l'équipe de Sylvain Deville, chercheur au Laboratoire de synthèse et fonctionnalisation des céramiques (LSFC)³, a eu l'idée de s'inspirer de la nacre de certains coquillages. « Sa structure la rend 3 000 fois plus résistante que les "briques" dont elle est constituée », note-t-il. Pour la reproduire, les chercheurs ont utilisé des plaquettes d'alumine (poudre céramique courante). Mises en suspension dans l'eau avec un « mortier », et congelées de manière contrôlée, elles se sont auto-assemblées en s'empilant comme le carbonate de calcium dont est faite la nacre. La céramique obtenue est jusqu'à dix fois plus tenace qu'une céramique classique ! Cotutelle du laboratoire, l'entreprise Saint-Gobain mène des études pour utiliser le procédé de manière industrielle.

DES PROPRIÉTÉS LUMINEUSES

Au prix d'un frittage à haute température et haute pression, on fabrique des céramiques denses et sans porosité : la diffusion de la lumière est alors limitée et elles acquièrent des propriétés d'émission de lumière parfois égales aux qualités optiques et photoniques des monocristaux. L'équipe de Michel Mortier, à l'Institut de recherche de chimie Paris⁴, élabore aujourd'hui des céramiques fluorées de structure polycristalline, totalement denses et d'une transparence parfaite, ne nécessitant qu'un frittage à température modérée. Le procédé

– breveté – et le matériau obtenu permettent d'envisager la conception de lasers pulsés à très haute puissance. De son côté, l'équipe de Mathieu Allix, du laboratoire Cemhti⁵ du CNRS, vient de mettre au point des céramiques transparentes à base de YAG (grenat d'yttrium et d'aluminium), par cristallisation à pression ambiante d'un verre de même composition. Cette technique simple et peu coûteuse pourrait avoir un fort impact dans les domaines de la joaillerie, des lentilles optiques et des diodes électroluminescentes.

▼ Frittage d'une céramique dans un four à 1 700 °C.

UNE POROSITÉ UTILE POUR L'ENVIRONNEMENT

Poreuses par nature, les céramiques permettent de filtrer et traiter les liquides et les gaz. « Outre le fait qu'ils résistent mieux et plus longtemps que les filtres polymères à des conditions d'utilisation sévères, les filtres faits de céramique permettent d'atteindre des niveaux de filtration très fins et peuvent aussi servir de support à des réactions chimiques permettant d'éliminer des particules ou molécules indésirables », explique Anne Julbe, chercheuse à l'Institut européen des membranes (IEM)⁶. « Notre défi est de développer des filtres capables de cibler des molécules de plus en plus

petites ou présentes en très faibles concentrations (des micropolluants tels que les perturbateurs endocriniens) », précise André Ayral, chercheur à l'IEM. Le laboratoire développe notamment des membranes de séparation des gaz, par exemple pour isoler l'hydrogène, matière première des piles à combustible. Ou encore des membranes catalytiques qui combinent filtration et dégradation d'espèces nocives par des réactions d'oxydation. De tels filtres, conçus via des procédés économes et durables, garantiront un meilleur contrôle des rejets industriels et urbains dans le milieu naturel.

DES IMPLANTS OSSEUX ÉPHÉMÈRES

Formés de céramiques, les implants actuellement utilisés en chirurgie osseuse restent fragiles, surtout quand ils remplacent de grands volumes d'os ou sont insérés dans des zones à fortes sollicitations mécaniques, comme la mâchoire par exemple. D'où l'idée de concevoir des implants « éphémères » qui serviraient de support à la repousse de l'os jusqu'à sa régénération complète et disparaîtraient ensuite. « La repousse osseuse est lente et limitée en volume.

Notre défi est de mettre au point des implants qui la stimulent », explique Éric Champion, chercheur à l'Institut de recherche sur les céramiques (Ircer)⁷, à Limoges. Avec son équipe, il se concentre en particulier sur la formation des vaisseaux sanguins, indispensables au développement du tissu osseux. Ils ont ainsi montré qu'une céramique dotée de pores de forme triangulaire, plutôt que circulaire, permet un meilleur guidage des vaisseaux dans l'implant.

DES MATÉRIAUX POUR LE NUCLÉAIRE

Les pastilles d'oxyde d'uranium, combustibles des réacteurs nucléaires, sont en fait des céramiques. Elles fournissent ainsi un matériau résistant aux conditions extrêmes du milieu : température, pression, irradiation. Préparer la quatrième génération de réacteurs (réacteurs à neutrons rapides, notamment) et répondre à leurs enjeux – réutilisation d'une partie des déchets, amélioration de leur sécurité... – impose de faire évoluer ces matériaux combustibles. À l'Institut de chimie séparative de Marcoule (ICSM)⁸, des chercheurs tentent de contrôler la

microstructure des combustibles grâce à un dispositif d'observation inédit⁹ qui permet de suivre en temps réel la formation de celle-ci. « Nous disposons de modèles capables de prédire de manière de plus en plus fiable la microstructure des combustibles et son évolution », explique Nicolas Clavier, chercheur à l'ICSM. Des travaux sont également menés pour concevoir des céramiques adaptées au confinement de certains déchets. Inspirées de minéraux naturellement résistants à la radioactivité, elles pourraient être utilisées notamment pour l'enfouissement sur de très longues durées (projet Cigéo).



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

1. Composites à matrice céramique. 2. Unité CNRS/Université de Bordeaux/Safran/CEA. 3. Unité CNRS/Saint-Gobain. 4. Unité CNRS/Chimie ParisTech. 5. Conditions extrêmes et matériaux : haute température et irradiation. 6. Unité CNRS/ENSCM/Université de Montpellier. 7. Unité CNRS/Université de Limoges/ENSCI. 8. Unité CNRS/CEA/Université de Montpellier/ENSCM. 9. Technique de microscopie électronique à balayage en mode environnemental à haute température.

Le CNRS met en place le télétravail

Ressources humaines. Après plusieurs mois d'étude et deux enquêtes menées auprès du personnel, le CNRS lance sa campagne sur le télétravail à l'automne pour un démarrage du dispositif au 1^{er} janvier 2019.

PAR LAURENCE STENVOT

Un agent du CNRS passe en moyenne une heure trente par jour dans les transports pour se rendre sur son lieu de travail. Une journée par semaine en télétravail lui permettrait de gagner six heures par mois : autant de stress et de fatigue en moins, et de temps en plus pour sa vie personnelle.

« Le télétravail, par la souplesse qu'il induit, par les heures de transport qu'il permet d'économiser, est clairement un élément de conciliation de la vie professionnelle et de la vie familiale », commente Pierre Coural, directeur des ressources humaines du CNRS.

Un dispositif attendu par les agents

Inscrit dans la dynamique de la transformation numérique, le télétravail entend moderniser les modes d'organisation professionnelle. Reposant sur le volontariat, il se distingue du nomadisme et se fait dans un lieu précis (au domicile, dans un tiers-lieu). Sa mise en place au CNRS a été permise par le décret du 11 février 2016, suivi d'un arrêté du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation en novembre 2017.

Ce nouvel élément d'organisation du travail pourrait avoir un véritable impact sur l'attractivité du CNRS, alors que le télétravail se révèle être une attente de la part des agents. Au cours des mois de mars et avril 2018, l'organisme a ainsi lancé deux enquêtes sur cette thématique auprès des agents et des encadrants – des enquêtes qui ont recueilli plus de 10 000 réponses.

« Un agent CNRS sur trois a répondu à ces enquêtes, ce chiffre montre bien l'attente pour ce sujet. Sur les 10 000 personnes, 6 500 annoncent souhaiter "télétravailler", dont 2 000 chercheurs permanents, 4 000 ingénieurs et techniciens permanents et 500 chercheurs ou ingénieurs contractuels », détaille Florence Bouyer, nommée référente nationale télétravail en janvier 2018 et dont le rôle est de coordonner sa mise en place au sein de l'organisme.

Au-delà de l'amélioration de l'articulation entre la vie familiale et la vie professionnelle, le télétravail répond également à un autre besoin : « Il est question de la capacité à rester concentré sur un dossier sans être interrompu par toutes les sollicitations extérieures,

explique Pierre Coural. Le télétravail me semble une façon d'accorder un droit à la déconnexion. »

Le télétravail : pour qui et comment ?

« Le télétravail est ouvert à tous. Aucune fonction n'est par principe exclue », affirme le directeur. Si certaines activités se prêtent plus que d'autres à ce dispositif, il est également prévu des possibilités de télétravail à la demi-journée, ou encore tous les 15 jours. Tant les agents permanents que les contractuels pourront en faire la demande.

L'établissement va devoir équiper les demandeurs. « Notre priorité est d'acheter des ordinateurs portables pour les catégories de personnel qui en sont le plus dépourvues, estime Pierre Coural. Nous avons eu une bonne surprise à la lecture des enquêtes : le taux d'équipement des agents au sein des unités est bon. En revanche, les délégations régionales et les services centraux ont un taux d'équipement assez faible. » Un effort à fournir de



10 000 agents

ont répondu aux enquêtes
du CNRS sur le télétravail
réalisées en 2018.

65%

des agents ayant répondu
*souhaitent
télétravailler.*

plusieurs centaines de milliers d'euros, mais qui ne sera pas insurmontable sur deux ou trois ans, assure-t-il, ajoutant : « Notre objectif est que ceux qui n'ont pas d'ordinateur portable, notamment les techniciens et les assistants ingénieurs, puissent eux aussi bénéficier du télétravail. »

La question du nombre de journées ouvertes au télétravail par semaine a également été au cœur des discussions – notamment avec les partenaires sociaux qui ont émis un avis positif sur les « lignes directrices », document qui fixe les principes de mise en œuvre du dispositif au CNRS. Si le décret du 11 février 2016 offre la possibilité aux agents de la fonction publique de demander jusqu'à trois jours de télétravail par semaine, le CNRS recommande le chiffre d'un jour par semaine, tel que plébiscité lors des enquêtes.

« Celles-ci révèlent une grande convergence autour de cette durée : 70 % des agents ayant répondu favorablement au télétravail souhaitent en effet télétravailler une journée par semaine, et cette durée est tout à fait envisageable par les encadrants dans le fonctionnement

de leur équipe. Seulement 5 % des agents souhaitant "télétravailler" aimeraient le faire trois jours par semaine », avance Florence Bouyer.

Concernant le jour de la semaine où sera effectué le télétravail, il s'agit d'un choix individuel mais non exempt de conséquences sur le collectif de travail. Il se fera à l'échelon de l'unité ou du service, tout comme le choix des jours non « télétravaillables » et celui de la durée du dispositif. Le décret prévoit une période renouvelable de télétravail d'un an maximum. Il est cependant possible de favoriser des périodes plus courtes, par exemple de quelques mois, si cela s'accorde davantage à l'activité de l'agent.

Début octobre, les agents intéressés pourront faire leur demande en ligne sur la nouvelle application Ariane lancée par la direction des ressources humaines (DRH), une demande qui passera par le responsable de service puis par le directeur d'unité, avant d'être validée par la délégation, le tout dans un délai de deux mois.

Le démarrage officiel du télétravail se fera le 1^{er} janvier 2019, après une phase de réception du matériel informatique et de mise à jour des équipements (accès VPN, chiffage du disque dur).

Dans un second temps, la DRH mettra en œuvre le chantier des tiers-lieux, qui concernent aussi bien des lieux publics (université, communauté d'agglomération...) que privés, en lançant un appel à référencement sur toute la France.

Un guide et des formations

Les demandes se feront dans le cadre de campagnes (après celle de l'automne 2018, une seconde devrait être prévue au printemps 2019) et non pas tout au long de l'année, afin notamment de respecter une égalité de traitement dans l'examen des demandes des agents, mais aussi de répondre au besoin de formation au télétravail des responsables de structures.

« Les encadrants bénéficieront de deux niveaux de formation. Une première de sensibilisation, ouverte également aux agents, concernant les règles du télétravail, ses outils et sa mise en œuvre. Et une seconde qui visera à aider les encadrants à maintenir la continuité de service, à intégrer la nouvelle posture managériale et à préserver la cohésion d'équipe », explique Florence Bouyer, responsable de la coordination de la mise en place de la formation des encadrants et des agents.

Dans un souci de pédagogie, un guide opérationnel du télétravail sera publié à la rentrée. Il fournira des détails de mise en œuvre pratiques et exposera les lignes directrices du CNRS sur le télétravail à tous les agents souhaitant en bénéficier. ■



© S. MILLET POUR CNRS - LE JOURNAL

Allergies : vers de nouvelles pistes thérapeutiques

PROPOS RECUEILLIS PAR KHEIRA BETTAYEB



VIVANT SOCIÉTÉS

Santé. Si les allergies sont en pleine recrudescence, la recherche continue de progresser face à ces maladies avec, notamment, une nouvelle cible thérapeutique très convoitée

par l'industrie pharmaceutique. Le point avec les spécialistes Jean-Philippe Girard et Corinne Cayrol.

Votre équipe, à l'Institut de pharmacologie et de biologie structurale (IPBS)¹ est réputée pour ses recherches sur les mécanismes allergiques.

Pouvez-vous nous rappeler ce qu'est une allergie ?

Jean-Philippe Girard² : Il s'agit d'une réaction anormale, excessive et inappropriée, de notre système immunitaire vis-à-vis de substances inoffensives, dites allergènes : pollens, acariens, moisissures, poils d'animaux, venin de guêpe, certains aliments comme la cacahuète, etc. Pouvant apparaître à n'importe quel âge, les allergies sont liées à deux facteurs : une prédisposition génétique et l'exposition à un allergène.

Corinne Cayrol³ : Les allergies se manifestent par des éternuements, un écoulement et une obstruction du nez en cas de rhinite (rhume des foins), une gêne respiratoire et des sifflements dans l'asthme, des démangeaisons et plaques rouges pour l'eczéma, des démangeaisons, un gonflement des paupières et une rougeur des yeux lors d'une conjonctivite allergique, ou encore un gonflement de la bouche, des nausées ou des douleurs abdominales en cas d'allergies alimentaires. Ces symptômes altèrent la qualité de vie en provoquant troubles du sommeil, fatigue et irritabilité. Certaines

allergies, comme celle à l'arachide, peuvent même induire une réaction violente potentiellement mortelle : un choc anaphylactique.

Aujourd'hui, près de 30 % des Français sont allergiques, contre 3 % en 1970. En 2050, ce taux pourrait grimper à 50 %... À quoi est due cette explosion ?

J.-P. G. : À plusieurs facteurs : le réchauffement climatique, la pollution, l'évolution de notre mode de vie et de notre environnement, ainsi que l'exposition à de nouveaux aliments due à la mondialisation.

C. C. : Le réchauffement climatique augmente la concentration dans l'air des pollens et leur variété. En effet, la hausse des températures permet à certaines plantes poussant d'habitude sous d'autres latitudes de s'épanouir dans l'Hexagone. C'est le cas de l'ambrosie, une plante d'origine nord-américaine au pollen très allergisant, qui a colonisé la Bourgogne et la région Auvergne-Rhône-Alpes.

J.-P. G. : Sur notre mode de vie, une hypothèse est que l'évolution vers plus d'hygiène dans les pays développés a débouché sur moins d'exposition à des infections pendant la petite enfance. Notre système immunitaire deviendrait ainsi plus sensible aux substances étrangères, dangereuses ou non.

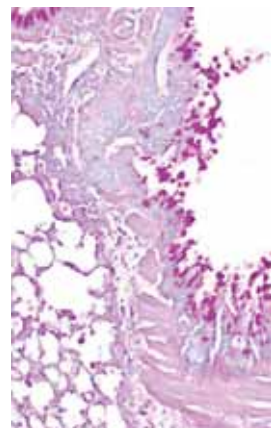
C. C. : D'autre part, nous utilisons de plus en plus de substances chimiques qui altèrent nos barrières épithéliales (peau, muqueuse nasale ou gastrique, etc.) : les cosmétiques, les détergents, ou encore les additifs alimentaires. Par ailleurs la pollution, notamment les particules fines de diesel, aggrave les symptômes allergiques.

Quel est le mécanisme des allergies et comment les soigner ?

C. C. : La réaction allergique s'opère en deux étapes. Dite phase de sensibilisation, la première correspond au premier contact avec l'allergène, sans signes cliniques ; le système immunitaire produit des anticorps : des immunoglobulines de type E ou IgE, spécifiques de cet allergène. La deuxième phase survient dès la seconde exposition à l'allergène et correspond à la réaction allergique elle-même. Alors, l'allergène est reconnu par les IgE fixés sur des cellules immunitaires qui libèrent diverses molécules, comme l'histamine. Lesquelles induisent une inflammation à l'origine des symptômes allergiques.

J.-P. G. : Pour les allergies simples, la prise d'antihistaminiques (associés ou non à des corticoïdes) permet d'atténuer les symptômes. Si c'est insuffisant, une solution peut être la

▲ Coupes de poumon. À gauche, l'asthme allergique est déclenché (mucus, en rose foncé) en raison de l'activation de la protéine IL-33, contrairement au cas de droite.



1. Unité CNRS/Université de Toulouse Paul-Sabatier. 2. Directeur de recherche à l'IPBS. 3. Chargée de recherche à l'IPBS. 4. Interleukin-33 (IL-33): A nuclear cytokine from the IL-1 family, C. Cayrol et J.-P. Girard, *Immunological Reviews*, 2018, vol. 281 (1): 154-168. 5. Environmental allergens induce allergic inflammation through proteolytic maturation of IL-33, C. Cayrol et al., *Nature Immunology*, avril 2018, vol. 19 : 375-385.



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

désensibilisation. Il s'agit de rendre le patient tolérant vis-à-vis de l'allergène, en l'exposant à des doses croissantes d'allergène par injection sous-cutanée ou voie sublinguale.

Quelles sont les dernières nouveautés, côté traitements ?

J.-P. G. : Lors de cette dernière décennie sont notamment arrivés deux types de traitements pour l'asthme sévère, qui touche 300 millions de personnes dans le monde. Il s'agit de thérapies à base d'anticorps visant à bloquer soit les IgE (Xolair®, autorisé en France depuis 2009), soit l'interleukine-5 (IL-5), une cytokine impliquée dans l'activation des éosinophiles, des cellules clés de l'allergie. En 2016 et 2017 ont été approuvés en France pas moins de deux produits destinés à bloquer l'IL-5 : le Nucala® (mépilizumab) produit par le géant pharmaceutique anglais GlaxoSmithKline (GSK), et le Cinquaero® (reslizumab) de la société israélienne Teva. Ceci dit, ces traitements sont réservés aux personnes souffrant d'un asthme sévère associé à une production importante d'éosinophiles. Il est donc urgent de mettre au point d'autres traitements pour toutes les formes d'asthmes sévères. Une cible thérapeutique soulève beaucoup d'espoir ici : l'interleukine-33, ou IL-33. Il s'agit d'une protéine humaine découverte par hasard par notre équipe en 2003. Depuis 15 ans, nos travaux, ainsi que ceux d'autres équipes, ont mis en

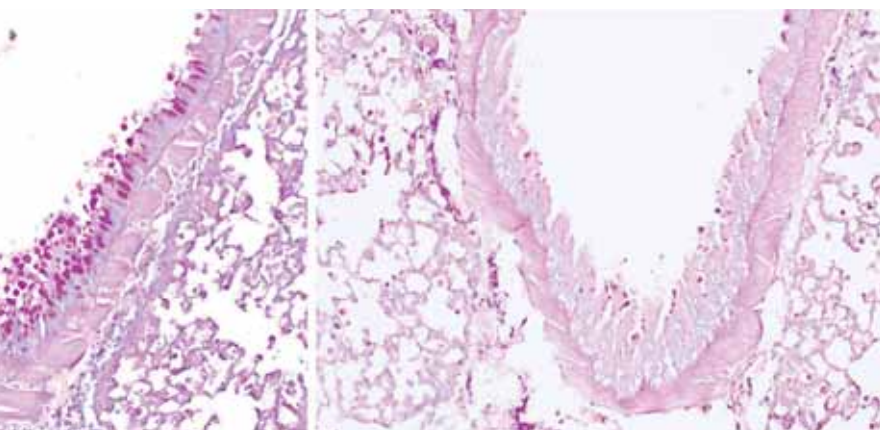
évidence le rôle majeur de l'IL-33 dans l'inflammation allergique et la prédisposition à l'asthme chez l'homme⁴.

Comment la protéine IL-33 intervient-elle dans l'asthme ?

C. C. : Nos travaux publiés en avril 2018⁵ indiquent que des allergènes respiratoires responsables de l'asthme (pollens, moisissures, acariens) ou les allergènes liés aux conditions de travail possèdent des enzymes capables de générer des formes hyperactives de l'IL-33. Ces signaux surpuissants activent des cellules immunitaires ressemblant aux lymphocytes : les cellules lymphoïdes innées de type 2, ou ILC2. Or, celles-ci ont pour rôle de produire de grandes quantités de deux cytokines majeures de l'allergie : l'IL-5 et l'IL-13. D'où les symptômes allergiques exacerbés observés dans l'asthme, comme une forte production de mucus rendant la respiration difficile.

Comment contrer ses effets ?

C. C. : L'idée est de développer des anticorps bloquant cette protéine ou son récepteur ST2, pour stopper à la fois la production d'IL-5 et d'IL-13. Et ce quelle que soit la forme d'asthme sévère, contrairement aux récents traitements ciblant l'IL-5. Plusieurs essais cliniques, menés par quatre grandes firmes pharmaceutiques, sont en cours chez des patients. Et d'autres essais ont lieu pour traiter les allergies autres que l'asthme sévère. **II**



© C. CAYROL ET J.-P. GIBAUD / IBS/CNRS-UNIVERSITÉ TOULOUSE 3 - PAUL SABATIER

En bref

PARTENARIAT FRANCO-JAPONAIS

Le 2 juillet a été créé le premier laboratoire commun entre le CNRS et une entreprise étrangère : lancé par le laboratoire Cemes du CNRS et l'entreprise Hitachi High-Technologies Corporation (HHT), il associe chercheurs français et ingénieurs japonais pour développer un nouveau microscope électronique capable de scruter les propriétés de la matière.

ACCORD AVEC ARIANEGROUP

L'industriel du spatial ArianeGroup et le CNRS ont signé une lettre-accord qui encadre une quinzaine de contrats de collaboration de recherche par an. Ce dispositif, simple et rapide à mettre en place, permet de fluidifier le partenariat entre des entreprises et des laboratoires du CNRS.

SCIENCE ET POST-VÉRITÉ

Fin avril, le Comité d'éthique du CNRS a publié l'avis « Quelles nouvelles responsabilités pour les chercheurs à l'heure des débats sur la post-vérité ? ». Il explore les différentes problématiques des scientifiques face à l'essor d'informations fondées sur des opinions et croyances plutôt que sur des faits émanant de la démarche scientifique.



>> www4.cnr-dir.fr/comets

COOPÉRATION FRANCO-ISRAËLIENNE

Le CNRS a signé le 27 juin deux accords avec le Weizmann Institute of science, prestigieuse institution de recherche israélienne : le premier cadre une collaboration avec le Laboratoire d'optique appliquée notamment en matière de lasers et de plasmas. Le second porte sur un partenariat interdisciplinaire autour de la création du LIA ImagiNano.

FÊTE DE LA SCIENCE

La Fête de la science se déroulera du 6 au 14 octobre en France métropolitaine et du 10 au 18 novembre en outre-mer et à l'international. Inaugurée le 5 octobre à la Cité des sciences par l'explorateur-chercheur Christian Clot, cette édition scrutera le thème des fausses nouvelles et des idées reçues.



>> www.fetedelascience.fr

Physique. Il tend à faire plus chaud en centre-ville qu'en banlieue, mais certains centres chauffent davantage que d'autres. Une équipe de recherche internationale vient d'établir que la disposition des immeubles conditionne la température nocturne des villes – une découverte clé pour l'urbanisme de demain.

PAR FUI LEE LUK



C'est chaud une ville la nuit

► Les grands immeubles et la structure en grille de New York (ici, de nuit), accentuent l'effet de chaleur.

Depuis les œufs au plat cuits sur des trottoirs brûlants jusqu'au personnage provocateur de Marilyn Monroe, au cinéma, prenant l'air sur une grille du métro new-yorkais, la canicule urbaine est objet de légendes. Mais ces températures élevées ont aussi des conséquences très réelles – et indésirables – sur les habitants des villes. Pour mieux comprendre les mécanismes qui rendent le centre ultra-urbanisé des villes plus chaud que leurs banlieues – un phénomène connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain (ICU) –, des chercheurs du laboratoire MSE2¹ basé au MIT², du LPTMS³ et de l'université de Californie à Irvine se sont associés en vue d'étudier pourquoi les effets d'ICU nocturnes sont plus importants dans certaines villes. Leurs résultats, qui viennent d'être publiés dans la revue scientifique *Physical Review Letters*⁴, établissent une corrélation nette entre les températures nocturnes et la configuration de la ville.

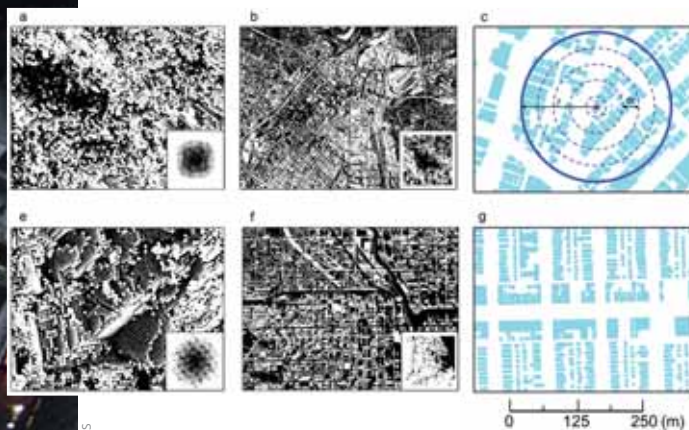
Végétation et courants d'air

Le concept d'îlot de chaleur urbain n'est pas nouveau. Si le terme a été forgé au milieu du xx^e siècle par le climatologue britannique Gordon Manley⁵, les premiers rapports sur le contraste entre la « chaleur artificielle » de Londres et celle de la campagne remontent à 200 ans⁶.

De fait, les ICU résultent d'abord de l'urbanisation des paysages ruraux. Le facteur majeur est le remplacement de la végétation naturelle par des matériaux de

construction – le béton et l'asphalte – qui absorbent davantage d'énergie thermique et solaire. L'effet d'ICU est très marqué la nuit, quand les zones moins urbanisées tendent à se rafraîchir alors que les matériaux de construction de la ville rayonnent de l'énergie accumulée durant la journée, issue essentiellement des radiations solaires et des activités humaines telles que l'industrie, les systèmes de refroidissement et la conduite automobile. L'effet de réchauffement urbain est accentué par les grands immeubles, qui bloquent les courants d'air refroidissants, et l'absence d'une couverture végétale susceptible de créer des zones ombragées et d'augmenter l'humidité de l'air. Cette combinaison de facteurs fait grimper la température des villes, parfois dans de fortes proportions. « Nous parlons de différences de température allant de 1,5 à 5 °C en moyenne, mais le record est détenu par Phoenix, en Arizona, avec une différence de près de 10 °C entre son centre et sa périphérie », indique Roland Pellenq, coauteur de l'étude et chercheur au MIT et au CNRS, qui dirige l'unité mixte internationale MSE2.

L'ennui, c'est que les ICU peuvent également provoquer des problèmes de santé, aggraver la pollution et accroître la consommation d'énergie. Sur ce dernier point, Roland Pellenq cite le cas de la Floride, où « le surcoût énergétique dû à la climatisation dans les ICU est évalué à 400 millions de dollars par an, ce qui entraîne le rejet de 2 500 tonnes supplémentaires de CO₂ dans l'atmosphère ». Mais les ICU ne sont pas toujours



► Les données sur la densité des constructions montrent que la structure de Los Angeles (b, c) s'apparente à celle du verre amorphe (a), et celle de Chicago (f, g) au cristal colloïdal (e).

© D. MORROCCO/REUTERS/GETTY IMAGES

nuisibles : « Le Massachusetts, par exemple, économise 200 millions de dollars par an en chauffage, soit l'équivalent de 1 200 tonnes de CO₂ », ajoute-t-il.

Des disparités entre centres-villes

Une chose pourtant a toujours échappé aux chercheurs. Pourquoi certains centres-villes sont-ils plus chauds que les autres durant la nuit ? Pour leur étude, Roland Pellenq et ses collaborateurs se sont focalisés sur la « texture », c'est-à-dire les motifs dessinés par l'agencement des rues et des immeubles et jusqu'ici jamais considérés à l'échelle d'une ville entière. Pour déterminer les textures des 51 villes de l'échantillon (principalement en Amérique du Nord, mais également en Nouvelle-Zélande, en Australie, au Royaume-Uni, en Allemagne, en Autriche, aux Pays-Bas et en Suède), l'équipe a entré les données sur la position des immeubles recueillies sur Internet (Google Maps) dans des algorithmes de physique statistique adaptés pour le besoin, et qui étaient habituellement utilisés pour décrire la façon dont les atomes sont disposés au sein des matériaux.

« L'idée était de réduire la complexité urbaine à un agglomérat moyen représentant le voisinage immédiat d'un immeuble », explique Roland Pellenq, qui a imaginé cette approche avec le codirecteur du MSE2, Franz-Josef Ulm, « pendant les pauses-café, dans la cour du MIT, en admirant la ligne des gratte-ciel de Boston, au-dessus de la rivière Charles... » La plupart des immeubles étudiés appartiennent aux « secteurs résidentiels, qui représentent environ la moitié de la consommation d'énergie en chauffage et climatisation aux États-Unis ».

Grâce à ces calculs, les physiciens ont fabriqué un index d'aménagement des villes, sur une échelle allant

de 0 (en désordre, comme des atomes dans un liquide) à 1 (très structuré, comme les atomes d'un cristal). Ensuite, pour mesurer l'intensité des effets d'ICU dans les villes étudiées, l'équipe s'est reportée pour chacune aux statistiques de température sur plusieurs années, comparées à celles relevées en dehors de la ville, « généralement l'aéroport local », précise Roland Pellenq.

Villes « cristallines » et villes « liquides »

Les résultats ont révélé que les villes « cristallines » – à l'image de la plupart des villes nord-américaines, caractérisées par une structure en « grille » comme à Manhattan ou Chicago – emmagasinaient plus de chaleur que des villes chaotiques « liquides » comme Londres, généralement plus anciennes, qui se refroidissent plus facilement. Cette tendance s'explique par la façon dont la chaleur est piégée dans les rues droites et perpendiculaires, dont les immeubles se renvoient la chaleur émise par ceux d'en face. « Nos travaux permettent de savoir dans quels quartiers il faudrait d'abord mettre en place des stratégies d'atténuation des effets d'ICU », souligne le directeur du MSE2. L'équipe espère également « étendre ses recherches aux grandes villes européennes et étudier l'évolution des ICU au cours du temps, en retraçant l'histoire de la croissance de ces villes ».

Tournées vers l'avenir, ces découvertes offrent de nouvelles orientations aux urbanistes et aux élus qui souhaitent des villes moins énergivores. Le principal enseignement, c'est que si la structure urbaine en grille mène, dans les zones chaudes, à une surchauffe et à un gaspillage d'énergie en climatisation, elle est un atout dans les zones froides, qui peuvent s'accommoder d'un surcroît de chaleur. « Mais ça ne veut pas dire que nous allons démanteler les villes existantes, ajoute Roland Pellenq. Cette étude montre que si nous voulons réduire les effets d'îlots de chaleur urbains, il faut s'orienter vers la science des matériaux et l'ingénierie pour trouver de meilleures solutions d'isolation thermique, afin de réduire les rayonnements et les transferts de chaleur entre immeubles. » II

1. Multi-Scale Materials Science for Energy and Environment, unité mixte internationale (CNRS/MIT/Aix-Marseille Université). 2. Massachusetts Institute of Technology. 3. Laboratoire de physique théorique et modèles statistiques (CNRS/Univ. Paris-Sud). 4. « Role of City Texture in Urban Heat Islands at Nighttime », J. M. Sobstyl et al., *Physical Review Letters*, publié en ligne le 9 mars 2018. 5. G. Manley, « On the frequency of snowfall in metropolitan England », *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, janvier 1958, vol. 84 (359) : 70-72. 6. L'ouvrage de Luke Howard, *The Climate of London* (volume 1), est paru en 1818.

Les enfants du marketing



SOCIÉTÉS

Sciences humaines et sociales. Friandises, jouets, produits dérivés... Le marketing jeunesse touche tous les domaines de la consommation. Et intéresse parallèlement les chercheurs qui analysent les relations entre l'univers de l'enfance et la sphère marchande. Le point avec Valérie-Inès de la Ville.

PROPOS RECUEILLIS PAR PHILIPPE TESTARD-VAILLANT



Vous êtes l'une des responsables scientifiques¹ d'une conférence internationale qui réunissait en avril 2018 à Angoulême des chercheurs en sciences humaines et des professionnels autour du marketing jeunesse. Quel impact notre culture de consommation de masse a-t-elle sur les enfants ?

Valérie-Inès de la Ville² : Nous sommes immergés dans un bain marchand. Une étude américaine a montré que dès six mois, un enfant reconnaît le logo de Mac Donald's. Plus tard, même s'il n'est pas en mesure d'acheter lui-même les produits, il dispose souvent d'une grande capacité d'influence pour orienter les achats de ses proches. On estime que, pour certaines catégories de

produits (alimentation, achats de séjour en club, sorties culturelles...), il intervient sur 70 à 80 % des décisions d'achat de sa famille. De plus, il représente un marché futur car 75 % des marques auxquelles il est exposé enfant feront partie de son répertoire une fois adulte.

L'enfant consommateur de produits qui lui sont destinés existe depuis toujours... À partir de quand observe-t-on une inflexion du phénomène ?

V.-I. V. : Pendant des siècles, les objets destinés aux enfants ont été fabriqués dans le cadre d'une économie domestique agricole ou artisanale. C'est à la fin du XVIII^e siècle et, surtout, au milieu du XIX^e, que des industries

► Très tôt, l'enfant est immergé dans un bain marchand et influence aussi les achats.

liées à l'enfance sont apparues en Europe et aux États-Unis. Un discours marchand adressé à la mère mais aussi à l'enfant s'est alors progressivement structuré et a entraîné la naissance d'un marketing de masse. Les premiers grands magasins, par exemple, ont créé des rayons pour petits garçons et fillettes et distribué aux bambins des images et des ballons arborant le nom du magasin. Ces pratiques se sont sophistiquées au début du XX^e siècle, comme en témoignent les revues professionnelles de l'époque qui apprenaient déjà aux vendeurs à s'adresser à l'enfant accompagné de sa mère.

Fin mai, l'Assemblée nationale s'est refusée à imposer le Nutri-Score³ sur les emballages mais aussi à inscrire dans la loi l'interdiction des publicités pour des produits alimentaires trop gras, trop sucrés ou trop salés à destination des enfants.

Comment jugez-vous ce refus ?

V.-I. V. : Toute publicité est interdite dans les programmes jeunesse du service public. Mais s'il est important d'encadrer très strictement la publicité à destination des enfants, voire de la proscrire quand il s'agit de *junk food* (produits de mauvaise qualité nutritionnelle), l'interdire sur toutes les chaînes de télévision ne résoudra pas à soi seul le problème de l'obésité, et risque de créer d'autres problèmes. Les chaînes sont en effet contractuellement tenues de contribuer au financement d'œuvres destinées au jeune public. Si les revenus de leur régie publicitaire diminuent, leur participation au financement de nouveaux programmes pour les enfants risque de baisser également.

Pourquoi les marques ciblent-elles aujourd'hui le segment des « tweens », qui représentent grosso modo les 8-12 ans ?

1. Elle en est aussi la créatrice en 2004. 2. Professeure à l'Institut d'administration des entreprises, directrice du Centre européen des produits de l'enfant à l'université de Poitiers. 3. Logo à cinq couleurs – du vert foncé (A) à l'orange foncé (E) – apposé sur les emballages pour renseigner le consommateur sur la qualité nutritionnelle des produits alimentaires transformés. Ce dispositif, facultatif, est recommandé par un arrêté ministériel du 31 octobre 2017. 4. L'Alliance européenne pour l'éthique en publicité.



Lire l'intégralité de l'entretien
sur lejournald.cnrs.fr

V.-I. V. : Ces apprentis consommateurs, qui refusent tout ce qui est enfantin et aspirent à imiter des modèles plus adultes, veulent découvrir l'univers des marques et utiliser celles-ci pour se construire une identité sociale. Ils sont aussi très sensibles au fait d'appartenir à un groupe et acceptent la prescription si elle vient d'un pair, sans oublier qu'ils ont des pratiques médiatiques qui leur donnent de l'autonomie par rapport à leurs parents. Enfin et surtout, ils disposent de sommes relativement importantes d'argent de poche. Selon une étude récente d'un cabinet de conseil spécialiste de la jeunesse, la somme globale donnée aux 4-14 ans en France avoisinerait 1,1 milliard d'euros par an.

Les jeunes bousculent aussi les canons du marketing en postant des « vidéos de déballage » sur YouTube. Quel est le statut des enfants Youtubeurs ?

V.-I. V. : Pour l'instant, il y a un vide juridique. Est-ce du loisir ou du travail ? L'association Open (Observatoire de la parentalité et de l'éducation numérique) considère qu'il s'agit de travail dissimulé qui rapporte de l'argent aux parents et réclame une législation sur ce point. Comme ces Youtubeurs nouent des partenariats avec des marques, l'European Advertising Standards Alliance⁴ suggère de rendre obligatoire le signalement, dans les vidéos YouTube, des contenus sponsorisés par une marque, ce qui les rapprocherait d'une publicité. Somme toute, les enfants, aujourd'hui, s'amusent (ou travaillent ?) pour créer des contenus qui permettent de constituer des audiences, lesquelles sont ensuite monétisées par les plateformes de diffusion (YouTube, Facebook, Twitter, Instagram...). Les enfants se retrouvent donc au cœur même d'un nouveau système capitaliste de médias de masse qui se construit à partir de leur créativité et des contenus générés par les audiences. **II**

© PHOTOS : M. LIHOREAU



Des fleurs connectées pour étudier les abeilles

VIVANT

NUMÉRIQUE

Mathieu Lihoreau a mis au point avec des lycéens un dispositif original de « fleur connectée » afin de décrypter le comportement de ces pollinisateurs.

PROPOS RECUEILLIS PAR ANNE-SOPHIE BOUTAUD

Comment est né le projet Abeilles-biodiversité¹ avec des élèves du lycée de Granville ?

Mathieu Lihoreau² : Les enseignants m'ont contacté il y a deux ans pour intervenir sur un projet de construction de ruches connectées par des élèves de filière technique. Je suis venu sur place présenter mes travaux et, notamment, mon projet de « fleur connectée ». J'ai donné aux élèves un cahier des charges. Ils ont conçu différents modules, les ont assemblés et ont pu tester la fleur avec de véritables abeilles. Si aujourd'hui nous avons validé un prototype ensemble, il reste maintenant à l'améliorer pour une production en série et une utilisation pour la recherche sur le comportement des abeilles.

Pourquoi ce projet et en quoi consistent ces fleurs connectées ?

M. L. : On connaît très mal la façon dont les abeilles sélectionnent les fleurs disponibles dans leur environnement et se déplacent entre elles ! Cela est dû à la difficulté de suivre un grand nombre d'individus, parfois plusieurs milliers dans une seule colonie, sur de grandes distances et de longues durées. Cette « fleur artificielle », placée au milieu de fleurs naturelles, délivre des quantités contrôlées de nectar et de pollen

artificiels, enregistre les visites des abeilles qui butinent sur la fleur, et les identifie individuellement. À terme, ces fleurs pourront communiquer entre elles pour créer des « champs connectés ». Avec ce système, nous allons étudier comment les abeilles exploitent des ressources en fonction de leur distribution spatiale, mais aussi de la qualité nutritionnelle de leurs nectars et pollens. Cela nous permettra également de mieux comprendre les dynamiques de pollinisation, laquelle est essentielle à la reproduction des plantes et au maintien des écosystèmes.

Ce projet peut-il sensibiliser aux questions environnementales ?

M. L. : Les démarches de science participative permettent de mobiliser une force de travail conséquente, constituée de personnes avec un regard éclairant, extérieur au monde académique. Elles permettent aussi de sensibiliser un large public sur nos thématiques de recherche, parfois sociales, comme ici le problème du déclin des insectes pollinisateurs et l'enjeu de la sécurité alimentaire mondiale.



Lire l'intégralité de l'entretien
sur lejournald.cnrs.fr

1. Projet soutenu par la Fondation Dassault Systèmes. 2. Mathieu Lihoreau est éthologue au Centre de recherches sur la cognition animale (CNRS/Université de Toulouse Paul-Sabatier).

Les promesses de l'hadronthérapie

MATIÈRE

SOCIÉTÉS

Cancérologie. Le 5 juillet a été inauguré à Caen un nouveau centre de traitement et de recherche dédié à une arme anticancer de pointe, en plein essor : l'hadronthérapie.

PAR KHEIRA BETTAYEB

Chaque année en France, 150 000 nouveaux cas de cancers sont traités par radiothérapie, seule ou associée à la chimiothérapie ou à la chirurgie. Ces traitements permettent dans la majorité des cas une rémission complète. Pour les autres, une nouvelle forme de radiothérapie, l'hadronthérapie, pourrait faire la différence. « Celle-ci est particulièrement indiquée pour les tumeurs résistantes à la chimio et à la radiothérapie, ou inopérables du fait de leur localisation près de tissus vitaux : tumeurs cérébrales, du crâne, de la face ou du cou, près du cœur ou de l'œil, etc. », détaille Balosso, cancérologue et chef du service de radiothérapie du CHU de Grenoble. Au total, ce traitement pourrait concerner 15 000 patients chaque année.

Un ciblage précis

Comme la radiothérapie conventionnelle, l'hadronthérapie consiste à irradier les cellules tumorales avec un faisceau de particules pour les détruire. Mais, alors que la première utilise des photons de haute énergie (ou rayons X), « l'hadronthérapie repose, elle, sur des ions chargés positivement, notamment des ions hydrogènes, ou "protons", – c'est la protonthérapie – ; et des ions carbone – c'est la carbonethérapie », explique Daniel Cussol, physicien nucléaire au Laboratoire de physique corpusculaire de Caen¹. Ces ions sont accélérés dans des synchrotrons ou des cyclotrons, à des vitesses vertigineuses... pouvant atteindre 219 000 kilomètres par seconde ! Puis ils sont concentrés en un faisceau de moins d'un millimètre de diamètre permettant d'irradier les tumeurs.

Comparés aux rayons X, ces faisceaux sont en théorie plus précis. Concernant les ions carbone, ils seraient aussi plus efficaces. Mais surtout, « les ions chargés délivrent la majorité de leur énergie au niveau de la tumeur visée. Ce qui permet de maximiser les dégâts au niveau de la tumeur, tout en préservant au mieux les cellules saines autour », précise Daniel Cussol.

Un défi interdisciplinaire

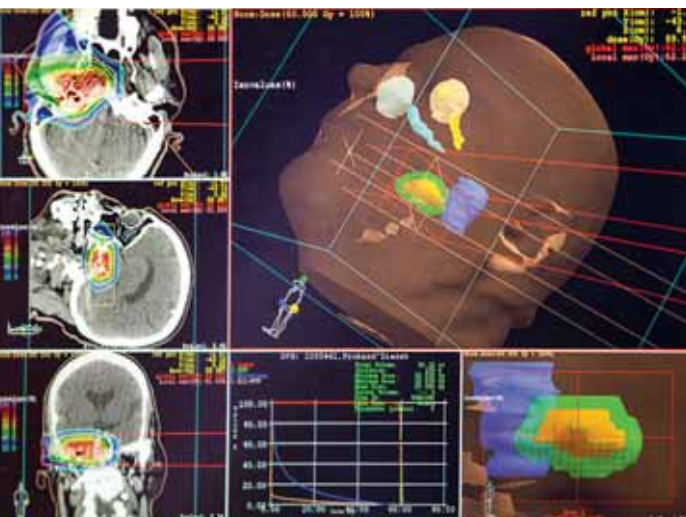
Mais pour les scientifiques, il reste de nombreuses questions en suspens, sur l'efficacité réelle de la technique, sur ses effets précis sur les tissus, sur son éventuelle toxicité, ou encore sur la manière d'exploiter au mieux sa puissance antitumorale. Menée par une dizaine de laboratoires rien qu'au CNRS, fédérés pour la plupart par le programme France Hadron², « la recherche sur l'hadronthérapie est très interdisciplinaire, et implique la radiobiologie, la physique nucléaire, la chimie, la biologie



▼ L'accélérateur ProteusOne®, la machine de soins de protonthérapie inaugurée au centre Cyclhad.

cellulaire et moléculaire et bien sûr la médecine », souligne Sylvain David, directeur adjoint scientifique en charge de l'interdisciplinarité à l'IN2P3 du CNRS.

Les physiciens veulent par exemple mieux évaluer un phénomène susceptible de fortement modifier les effets de la carbonethérapie : la fragmentation des ions carbone. « Quand ils percutent des atomes du corps humain, ces ions peuvent en effet "se casser" en particules plus petites. Plus légères, celles-ci peuvent aller beaucoup plus loin que la cible initiale, et occasionner des dégâts dans des tissus sains », détaille Daniel Cussol. Ce chercheur et son groupe travaillent donc à « déterminer la nature des fragments produits, leurs directions



La protonthérapie permet d'irradier précisément la tumeur tout en préservant les tissus sains.

[Lire l'intégralité de l'article sur **lejournal.cnrs.fr**](#)

une dizaine d'essais cliniques de phase 3 sont en cours dans le monde. « En décembre 2017, nous avons lancé une étude – financée par l'Assurance-maladie et menée sous la responsabilité légale des hospices de Lyon – sur 250 patients recrutés dans une vingtaine de centres en France », indique Jacques Balosso. Les premiers résultats devraient arriver dans cinq ans. Mais il faut aussi étudier finement les effets de l'hadronthérapie sur les tumeurs et sur le tissu sain, en particulier le cerveau. À la plateforme Cyceron de Caen, des scientifiques mènent ainsi plusieurs expériences sur des cellules, des tissus et des

animaux, et en utilisant l'imagerie biomédicale pour étudier les effets sur le cerveau. À quelques encablures, au Centre de recherche sur les ions, les matériaux et la photonique³, on étudie les effets de l'hadronthérapie à l'échelle cellulaire et moléculaire.

Problème pour la recherche : « L'accès aux faisceaux de protons et d'ions carbone reste encore très limité... », regrette Sylvain David. Et pour cause : en France, il n'existe pour l'instant que trois centres dédiés à la protonthérapie, qui sont en outre destinés en priorité au traitement : le Centre de protonthérapie de l'Institut Curie à Orsay, le Centre Antoine-Lacassagne à Nice et le nouveau centre Cyclhad inauguré à Caen en juillet. Pour la carbonothérapie, c'est



d'émission, leur énergie, etc. Cela, pour chaque type de noyau atomique présent dans les tissus humains, et susceptible d'être percuté dans les ions carbone. Et pour chaque type de tissu ». Leurs résultats pourraient permettre de mieux maîtriser l'efficacité de la carbonothérapie, mais aussi de mener au développement d'instruments innovants. « Les fragments secondaires créent des rayonnements pouvant sortir du corps humain. Leur détection via des techniques d'imagerie pourrait servir à vérifier la bonne réalisation du traitement en temps réel », précise Daniel Cussol.

nethérapie, mais aussi de mener au développement d'instruments innovants. « Les fragments secondaires créent des rayonnements pouvant sortir du corps humain. Leur détection via des techniques d'imagerie pourrait servir à vérifier la bonne réalisation du traitement en temps réel », précise Daniel Cussol.

Une dizaine d'essais en cours

Autre défi pour les médecins : vérifier la supériorité de l'hadronthérapie sur les autres traitements. Pour ce faire,

pire : il n'en existe encore aucun en France.

Heureusement, les choses changent sensiblement grâce au programme Archade⁴ lancé en 2007⁵. La première phase s'est conclue en juillet 2018 avec l'inauguration du centre Cyclhad et l'acquisition d'une première machine de soins de protonthérapie, ProteusOne®, pour un coût total de 76,5 millions d'euros. « À terme, cet appareil va permettre de traiter 345 patients par an, dont un tiers seront des enfants », précise Philippe Lagalle, président-directeur général de la société Cyclhad.

Les chercheurs, eux, attendent désormais un second accélérateur, C400, d'un coût estimé à 55 millions d'euros. Prévu pour 2023, « il sera consacré à 50 % au traitement, et 50 % à la recherche », promet Philippe Lagalle. Il devrait aussi être le premier au monde à permettre des essais de carbonothérapie sur l'animal ». De quoi espérer enfin voir la recherche française en hadronthérapie prendre sa pleine dimension. **II**

1. Unité CNRS/Ensi Caen/Université de Caen Basse-Normandie 2. www.france-hadron.fr 3. Unité CNRS/Ensi Caen/Université Caen-Normandie/CEA. 4. Pour « Advanced Resources Center for HADrontherapy in Europe ». 5. Lancé par l'ex-Région Basse-Normandie, il regroupe le centre de santé François-Baclesse de Caen, le CHU de Caen, le Ganil, l'Ensi Caen, l'université de Caen Basse-Normandie, Nucléopolis et le CNRS.

Objectif parité

Ressources humaines. Si la place des femmes progresse au CNRS, le chemin est encore long pour établir une véritable égalité. Lancé le 28 juin dernier, le Comité parité-égalité doit explorer de nouvelles pistes.

PAR LAURENCE STENVOT

Le CNRS emploie à ce jour plus de 31 000 personnes, dont 43 % de femmes. Si la parité est atteinte pour la catégorie des ingénieurs et techniciens avec 50 % de personnel féminin¹, la catégorie des chercheurs souffre encore d'un retard en la matière. Cette dernière est en effet composée de seulement 34 % de femmes. Une donnée qui témoigne, certes, d'une amélioration au cours de la dernière décennie (en 1999, on comptait 30,1 % de chercheuses au CNRS), mais qui montre une progression lente. À ce rythme, la parité serait atteinte... en 2088 ! Si le vivier des chercheuses est au cœur des problématiques, une attention toute particulière est accordée à la réussite des candidates aux concours, à leur accès à des postes de direction et à la lutte contre la ségrégation professionnelle entre les branches d'activité des ingénieurs et techniciens dans le cadre de la politique de parité et d'égalité au CNRS. Malgré ces efforts, l'organisme n'est toujours pas en mesure d'assurer à ses chercheuses des carrières équivalentes à celles de ses chercheurs. Un chiffre parmi d'autres : en 2016, on ne comptait que 22,5 % de femmes parmi les scientifiques promus chez les directeurs de recherche de classe exceptionnelle, dont seulement 7,4 % dans le grade le plus élevé (DRCE2).

« Accélérer l'évolution »

« Le président-directeur général Antoine Petit souhaite des propositions d'actions concrètes afin

d'accélérer l'évolution vers la parité et vers des carrières égales pour les chercheuses. Une évaluation des politiques mises en place permettra de mesurer l'impact de ces mesures généralisées à l'ensemble du CNRS », indique Élisabeth Kohler, directrice de la Mission pour la place des femmes, dont le rôle est d'assurer l'élaboration et le suivi du plan d'action pour la parité et de coordonner sa mise en œuvre.

Afin de renforcer le dispositif et d'impliquer l'ensemble des instituts dans la préconisation et l'évaluation de ces mesures, Antoine Petit a demandé la création d'un Comité parité-égalité, dont il a fixé les orientations lors de son lancement le 28 juin 2018. Le comité a toute liberté pour explorer des solutions pratiques et formuler rapidement des propositions. Le collège de direction du CNRS sera saisi de ces recommandations pour donner force exécutive à celles qui seront retenues.

Des disciplines pour tou(te)s

« Malgré des efforts déjà importants, la progression vers la parité au CNRS est trop lente et le nombre de candidates dans certaines disciplines est trop faible. Le comité proposera des actions concrètes pour attirer, garder et promouvoir davantage des chercheuses. On ne peut pas se permettre de passer à côté d'un vivier formidable », commente Martina Knoop, déléguée scientifique à l'Institut de physique et coprésidente du Comité parité-égalité

aux côtés d'Emmanuel Royer, directeur adjoint scientifique à l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions.

« Les disciplines scientifiques ne sont pas sexuées. Une fille ne devrait donc pas imaginer qu'une discipline n'est pas pour les filles et un garçon ne devrait pas imaginer qu'une discipline n'est pas pour les garçons, ajoute Emmanuel Royer. Le monde de la recherche, et en particulier le CNRS, doit agir dès maintenant pour que toutes et tous trouvent leur place, en fonction de leur seule compétence. »

Le Comité parité-égalité est composé de 18 membres (9 femmes et 9 hommes) aux profils variés, dont 15 nommés par les directeurs des instituts du CNRS, ainsi que le directeur des ressources humaines et deux



ALINE CERF ET A. K. JIMENEZ ZENTANO, DU LAAS. © F. MAUGNE/LEAS/CNRS PHOTO THÈQUE

1. Malgré leur raréfaction progressive dans les grades les plus élevés et une grande disparité selon les branches d'activités.



représentants de la Mission pour la place des femmes qui assurent la coordination et le secrétariat.

L'appui des instituts

Ce comité vient ainsi compléter et renforcer le dispositif du CNRS en faveur de la parité et de l'égalité professionnelle, qui comprend déjà la Mission pour la place des femmes au CNRS et son réseau de correspondants égalité dans toutes les délégations régionales.

« L'expertise collective du comité, réunissant des membres aux compétences et connaissances de domaines variés, donnera lieu à des recommandations plus adaptées aux réalités spécifiques de chaque terrain de recherche (laboratoire, instituts...). Enfin, à travers les membres du comité, les instituts seront directement impliqués dans l'application des recommandations et pourront témoigner de leur effectivité auprès des agents », estime Élisabeth Kohler. II

➤ Si la parité est acquise chez les ingénieurs et techniciens, la part des chercheuses n'est encore que de 34 % au CNRS.

En bref

Coopération avec la Chine

Le 25 juin à Pékin, Antoine Petit, président-directeur général du CNRS, et Bai Chunli, président de l'Académie des sciences de Chine, ont officialisé le renouvellement de l'accord-cadre entre les deux institutions. Signé au Palais de l'assemblée du peuple devant le Premier ministre français Édouard Philippe, son homologue chinois Li Keqiang et Frédérique Vidal, ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, l'accord vise à pérenniser la coopération scientifique amorcée dès 1978, à créer de nouveaux laboratoires communs et à encourager la mobilité des chercheurs entre les deux pays. Aujourd'hui, la Chine est le premier partenaire scientifique du CNRS en Asie, en nombre de projets de coopération.

Partenariat prolongé avec Michelin

En juin, le CNRS et le groupe Michelin ont signé un nouvel accord-cadre pour renforcer leur collaboration jusqu'en 2022. Le premier accord-cadre signé en 2012 avait conduit à la signature d'environ 120 contrats, dont 80 de collaborations de recherche ou de prestation de service. Le nouvel accord vient prolonger cette collaboration construite autour de projets menés avec plus de 70 laboratoires du CNRS, particulièrement dans les domaines de la chimie, des sciences de l'ingénierie et des systèmes et de la physique. Près de 200 articles scientifiques ont été publiés depuis le début de la collaboration entre le CNRS et Michelin, qui a aussi abouti à la création de trois laboratoires communs de recherche.

L'incroyable inventaire du patrimoine afghan

SOCIÉTÉS

Archéologie. Depuis un siècle, la Délégation archéologique française en Afghanistan recense le patrimoine d'un des pays les plus instables de la planète. 5 000 sites grecs, bouddhiques ou encore islamiques ont déjà été identifiés, au sol ou... depuis les airs !

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURE CAILLOCE

Le pays est depuis trente ans associé à des images de guerre. Au point d'oublier à quel point l'Afghanistan a alimenté les fantasmes des archéologues. C'est là qu'Alexandre le Grand aurait épousé la belle Roxane dans les années 330 avant notre ère ; là que le bouddhisme a déployé quelques-uns de ses plus beaux chefs-d'œuvre, à l'image des bouddhas de Bamiyan détruits par les talibans ; là que passent pendant des siècles les marchandises de la route de la soie... Julio Bendezu-Sarmiento dirige la Délégation archéologique française en Afghanistan (Dafa)¹. Il nous explique pourquoi il est urgent de recenser le patrimoine archéologique afghan, alors que les projets de développement économique se multiplient – à l'instar du projet de gazoduc qui doit traverser le sud du pays –, et que les pillages n'ont jamais été aussi intenses.

La Délégation archéologique française en Afghanistan est la seule équipe archéologique étrangère ayant une présence permanente dans ce pays. Pourquoi ?

Julio Bendezu-Sarmiento : Tous nos locaux – laboratoire de restauration, bibliothèque... – se trouvent effectivement à Kaboul. Depuis l'explosion qui a causé la mort de 90 civils dans le quartier diplomatique de Kaboul, au printemps 2017, nous sommes même les seuls archéologues étrangers à continuer d'exercer dans le pays. C'est



lié à notre histoire très forte avec lui. La Dafa a été créée en 1922 alors que l'Afghanistan s'ouvrait tout juste vers l'extérieur. Un contrat d'exclusivité signé entre les gouvernements français et afghan lui a confié l'exclusivité des fouilles opérées sur le territoire afghan, et a fixé la règle du partage à 50-50 des objets trouvés – raison pour laquelle de nombreux objets afghans sont aujourd'hui visibles au musée Guimet et au Louvre, à Paris. La Dafa a perdu le monopole des fouilles dans les années 1960 et a même été contrainte de quitter le pays durant l'occupation soviétique et la guerre civile qui a suivi.

Depuis notre retour, en 2003, notre rôle a évolué. Si nous continuons à faire des fouilles éclair sur le terrain – jamais plus de 15 jours pour des questions de sécurité –, nous remplissons également un rôle d'expertise auprès des autorités afghanes. Nous participons à une « Commission des objets volés » pour faire la part entre les faux et les vrais objets anciens – les pillages de sites archéologiques sont en effet légion dans le pays. Nous évaluons aussi tous les grands projets de développement,

► Ce Bouddha en terre cuite trouvé à Mes Aynak a été restauré à la Dafa. À gauche, Julio Bendezu-Sarmiento, avec l'expert en restauration Ermano Carbonara.

qu'il s'agisse de projets d'urbanisme, de construction de routes ou d'exploitation minière. Pour ce faire, le gouvernement afghan nous a confié en 2014 la mission de réaliser une vaste carte archéologique du pays.

Est-ce lié à la découverte de vestiges bouddhiques à Mes Aynak, cette mine de cuivre confiée en 2008 à la Metallurgical Corporation of China ?

J. B.-S. : 26 mines exceptionnelles, qu'elles soient d'or, de cuivre, de fer ou encore de métaux rares, sont répertoriées dans le pays, et le souhait du gouvernement est d'en confier rapidement l'exploitation à des compagnies étrangères. La mine de Mes Aynak, au sud-est de Kaboul, représente le deuxième gisement mondial de cuivre, vraisemblablement exploité dès l'Antiquité... Les premières traces d'un site bouddhique ont été trouvées par la Dafa en 1976, raison pour laquelle le gouvernement afghan a demandé à la Metallurgical Corporation of China, via la Banque mondiale, de financer des fouilles préventives avant de démarrer l'exploitation. Ce que les équipes internationales d'archéologues ont découvert est au-delà de ce qu'on imaginait : une ville de plusieurs kilomètres carrés qui comprenait plusieurs monastères, des **stupas**, des forteresses, des édifices administratifs, des habitations... et qui n'était documentée nulle part dans les textes historiques. Le projet d'exploitation minière a été suspendu et l'est toujours aujourd'hui.

Concrètement, comment procédez-vous pour établir cette carte archéologique ?

J. B.-S. : Nous travaillons sur clichés uniquement : des clichés aériens de prospection effectués autour des concessions minières par Airbus, des cartes satellites déclassifiées fournies par l'Otan, mais aussi des photos de drones... Au total, nous disposons de plusieurs milliers de clichés qu'il faut examiner à l'œil nu, ce qui demande du temps et une certaine habitude : depuis toujours, les constructions en Afghanistan ont utilisé la terre crue, ce qui les rend plus fragiles et plus difficiles à repérer. C'est l'une des raisons pour lesquelles les premiers archéologues de la Dafa se sont longtemps cassé les dents à la recherche des traces de la présence grecque sur le territoire afghan – notamment dans la

région de Bactres (Balkh) où l'on savait que les généraux d'Alexandre avaient fondé une colonie. Ils cherchaient des bâtiments en pierre, comme dans le reste du monde grec, alors qu'en réalité seuls les éléments décoratifs – comme les colonnes et leurs chapiteaux – étaient en marbre ou en stuc...

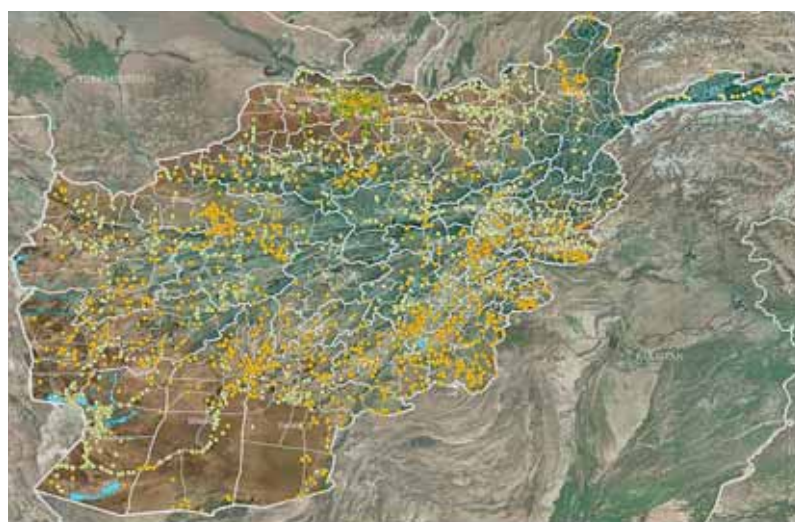
Comment reconnaît-on des vestiges sur une carte satellite ?

J. B.-S. : Il s'agit de bien connaître la typologie des types de bâtiments recherchés : les caravansérails, par exemple, ont une architecture caractéristique, avec une cour fermée pour les animaux, une petite mosquée, et des chambres situées tout autour de la cour... Mais en réalité de nombreux sites que nous trouvons ont déjà été visités par les pillards et portent les marques de leur passage : ils sont littéralement criblés de trous de pillage, que l'on aperçoit très bien du ciel.

Combien de sites avez-vous déjà répertoriés ?

J. B.-S. : Quand la Dafa a quitté l'Afghanistan, suite à l'invasion russe, près de 1 300 sites avaient déjà été découverts et publiés. On se doutait qu'il y en avait beaucoup plus : ce pays est un véritable musée à ciel ouvert et il suffit de creuser pour trouver quelque chose ! Depuis le début du projet en 2014, notre équipe de 20 personnes (dont une majorité de chercheurs et de techniciens afghans) y a déjà passé des centaines d'heures : aujourd'hui, nous totalisons près de 5 000 sites et nous sommes loin d'avoir fini. L'idée est de produire un véritable système d'information géographique (SIG) : chaque point sur la carte donnera accès à une base de données faisant état des informations disponibles sur chaque site archéologique. **II**

STUPA
Tumulus
(empilement de briques ou de pierres) au cœur duquel était à l'origine enfermée une relique du Bouddha.



▼ Carte archéologique de l'Afghanistan établie par la Dafa. À ce jour, près de 5 000 sites ont été identifiés, dont certains découverts très récemment.

1. La Dafa est un Institut français de recherche à l'étranger (Ifre) qui dépend directement du ministère des Affaires étrangères.

Recherche appartement du futur

PAR ANNE-SOPHIE BOUTAUD

SOCIÉTÉS



NUMÉRIQUE



Nouvelles technologies. Cet automne à Montpellier, deux étudiants emménageront dans un appartement truffé de capteurs, dans le cadre du projet Human at home (HUT). L'objectif : explorer les usages et effets des objets connectés sur notre – futur – quotidien.

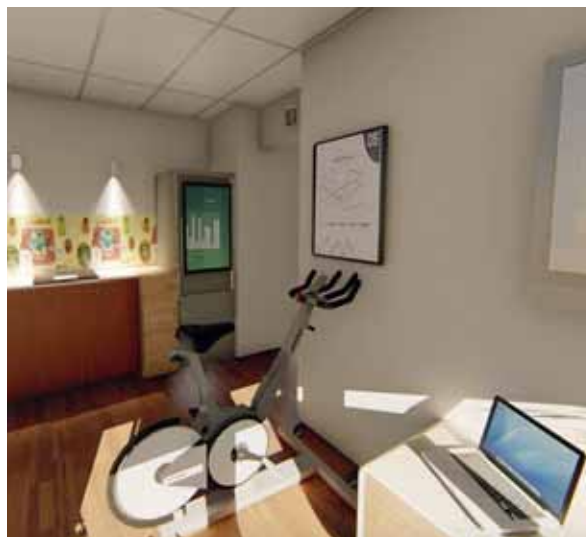
Imaginons plutôt. Installé(e) devant votre télé, un petit creux vous pousse à finir un paquet de gâteaux... qui échoue dans votre poubelle. Aussitôt, une notification s'affiche sur tous les écrans de l'appartement : on vous suggère, via un site marchand, de vous réapprovisionner en friandises dans la journée. Une autre alerte tombe : vous avez dépassé la dose de sucre journalière recommandée, information qui s'inscrit automatiquement dans votre dossier médical partagé. Future routine ou scénario de science-fiction ? C'est l'enjeu du projet HUT¹. Car « si le *xx^e* siècle était celui du saut technologique, le *xxi^e* sera celui d'une rupture dans les usages », analyse Alain Foucaran, directeur de l'Institut d'électronique et des systèmes² et initiateur du projet avec le juriste Malo Depincé³.

Comment interagissons-nous avec l'habitat du futur ? Quelles informations est-il envisageable, et souhaitable, de partager ? Comment encadrer leur usage ? L'analyse des données récoltées durant ce projet de trois ans renouvelables pourrait apporter des réponses...

Une « chimère » expérimentale

Ce projet rassemble une soixantaine de chercheurs du CNRS, de l'université de Montpellier et de l'université Paul-Valéry Montpellier 3 : juristes, économistes, informaticiens, architectes, spécialistes du marketing, des sciences du langage, de la santé, du théâtre. Car les nouvelles technologies qui nous entourent « finissent par poser des questions, sociales et éthiques », explique Anne Laurent, du Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier⁴. Il s'agit de travailler sur

ces nouvelles questions qui nous agitent en amont. Et de manière croisée. Notre proposition est donc de monter un lieu expérimental, une chimère, en en grossissant le trait pour en explorer les limites. »



▼ Au total, une cinquantaine de types de capteurs seront installés dans cet appartement-observatoire.

L'expérience se déroulera dans un trois-pièces truffé de capteurs. « Cinq types de données vont être récoltés », détaille Alain Foucaran. Certains capteurs seront directement liés aux coHUTEurs pour mesurer leur rythme cardiaque, définir leurs déplacements et leurs postures dans l'appartement afin d'évaluer, par exemple, si ces données peuvent être considérées comme des marqueurs de bien-être ou de mal-être. D'autres seront produites par l'habitat, comme la qualité de l'air, le taux d'humidité ou la température. Nous nous intéresserons également aux informations extérieures à l'appartement, comme la

pollution ou la pression atmosphérique. Nous récolterons aussi certaines données économiques grâce à des étagères connectées, afin d'identifier quel produit a été consommé et en quelle proportion. Enfin, et c'est assez novateur, nous étudierons certaines données captées via les réseaux sociaux. »

Pour concevoir cet appartement, le consortium a bénéficié d'un plateau modulable à la Maison des sciences de l'homme Sud, où il pourra également, en parallèle, mener des expériences.

Droit du consommateur

« Les géants du Net comme les Gafam collectent actuellement des données personnelles. Pour quoi ? Pour qui ? La législation actuelle peine à protéger le consommateur », avance Alain Foucaran. « Nous nous interrogeons sur la manière dont ces objets influencent nos comportements et inversement, poursuit Malo Depincé. Nous voulons observer comment les gens vont s'approprier ces technologies, les utiliser ou les refuser. »

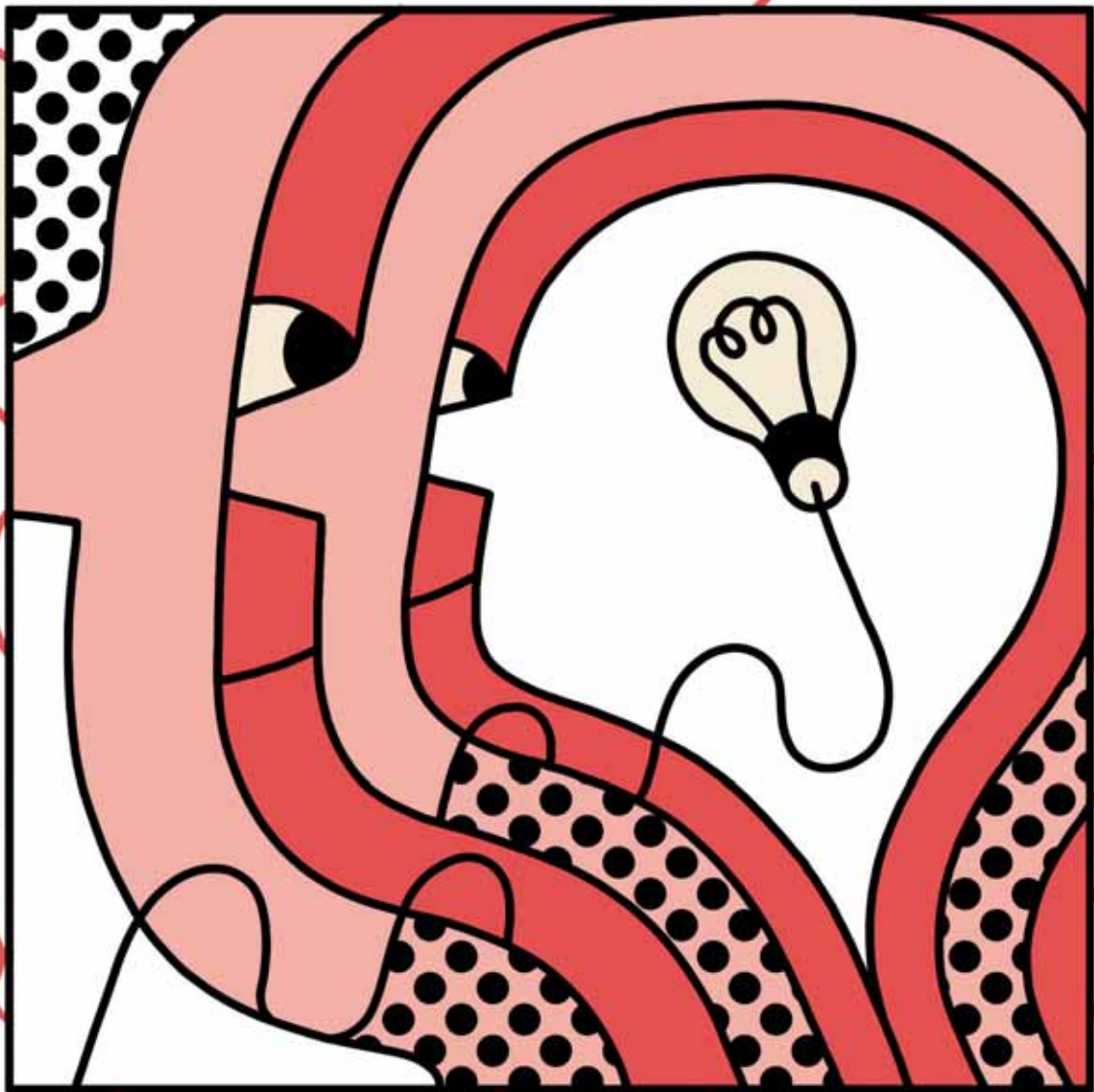
Les deux étudiants volontaires emménageront à la rentrée pour une première phase d'un an. Les coHUTEurs parviendront-ils à jouer le jeu ? Rien n'est laissé au hasard : « Un comité d'éthique a été mis en place pour protéger leur vie privée. [Il] pourra être saisi à tout moment par les habitants, les chercheurs ou s'autosaisir », précise le juriste. II



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

1. Ce projet est soutenu par la Maison des sciences de l'homme Sud et bénéficie du soutien financier de la Mission pour l'interdisciplinarité du CNRS et du consortium Montpellier Méditerranée Métropole. 2. Unité CNRS/Université de Montpellier. 3. Malo Depincé est directeur adjoint du laboratoire Dynamiques du droit (CNRS/Université de Montpellier). 4. Unité CNRS/Université de Montpellier/Université Paul-Valéry Montpellier 3/Université de Perpignan Via Domitia/Inria.

LES IDÉES



*Réflexions sur les armes autonomes,
le phénomène des fablabs
et l'évolution de la radiochimie
depuis Marie Curie.*

ILLUSTRATION : SIMON LANDREIN POUR CNRS LE JOURNAL

SOCIÉTÉS



NUMÉRIQUE



Sociologie. La France compte plusieurs centaines de *makerspaces* et autres *fablabs*, ces ateliers de fabrication



collaboratifs très imprégnés de culture numérique. La sociologue Isabelle Berrebi-Hoffmann revient sur un phénomène mondial qui se développe à rebours de la logique capitaliste.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURE CAILLOCE

Des makers aux fablabs, la fabrique du changement

Qui sont les « makers » ?

Isabelle Berrebi-Hoffmann¹ : Un *maker*, c'est quelqu'un d'inventif qui fabrique lui-même des objets utiles à sa vie quotidienne, un informaticien qui bricole ses propres drones ou robots, ou encore un artiste qui détourne des objets... Autant de personnes qui adhèrent à la philosophie du faire soi-même et de l'autonomie d'accès aux objets de consommation, sans passer par le *mass-market*. Né aux États-Unis au début des années 2000, le mouvement *maker* est en fort développement depuis dix ans : c'est le résultat de la convergence entre la culture numérique du libre et de l'*open source* d'un côté et des savoir-faire artisanaux plus traditionnels de l'autre. Dans sa philosophie, il a des similitudes avec des phénomènes plus anciens comme les « shakers », cette secte protestante établie dans les environs de Boston qui visait l'autarcie et fabriquait elle-même ses meubles, vêtements, mais aussi avec le mouvement « Arts and Craft » apparu en Angleterre dans la deuxième moitié du XIX^e siècle : ce mouvement artistique voulait en effet réhabiliter le travail artisanal et la « belle ouvrage » en réaction à la révolution industrielle et à ses produits standardisés de piètre qualité.

Il ne suffit pas d'être bricoleur et fan de numérique pour être un *maker*, où se situe la différence ?

I. B.-H. : Le mouvement *maker* repose sur le partage de la connaissance et des outils nécessaires à la fabrication. Il s'incarne dans des espaces collaboratifs appelés *makerspaces*, *fablabs* ou encore *hackerspaces*. Ce sont généralement des espaces de type associatif auxquels on accède librement ou moyennant une adhésion modique. Le *hackerspace* est très centré sur le logiciel et la fabrication de robots. Le *fablab* est un atelier de fabrication qui

▼ Le mouvement *maker* est né de la rencontre entre la culture de l'*open source* et des savoir-faire plus traditionnels.



répond à une charte très précise élaborée au MIT (Massachusetts Institute of Technology), où est né le premier *fablab* en 2001, et doit notamment offrir un certain nombre de machines-outils pilotées par ordinateur telles qu'une imprimante 3D ou une découpeuse laser.

Enfin, le *makerspace*, qui est aussi l'appellation générique de tous ces endroits, désigne souvent un espace plus grand, plus généraliste, et peut également accueillir des artisans qui viennent fabriquer tout ou partie des objets qu'ils commercialisent... L'Artisan's Asylum, le plus grand *makerspace* des États-Unis, accueille ainsi 12 ateliers différents dans ses 3 700 mètres carrés situés à Somerville, Massachusetts : électronique, joaillerie, cycles, découpe bois, peinture, textile...

Vous évoquez le partage comme une valeur cardinale du *maker*...

I. B.-H. : Le partage du savoir est indissociable du mouvement *maker* : il se fait de manière informelle, l'un donnant un coup de main à l'autre, mais aussi via des cours organisés au sein des *makerspaces*. Le design des objets et tous les plans sont en *open source* et circulent librement. Il peut s'agir de patrons pour faire soi-même ses vêtements, de fichiers numériques permettant de fabriquer des appareils électroniques, un potager d'appartement, ou même de construire une maison à 10 000 euros avec une imprimante 3D ! Mais le partage s'opère



© ARTISANS'ASYLUM

également au-delà des murs de l'atelier. Les *makerspaces* sont en effet des communautés à la fois très ancrées localement, et totalement ouvertes sur l'extérieur.

Tous ces espaces font partie de réseaux mondiaux où l'échange est permanent. Ils sont d'ailleurs en pointe sur l'utilisation des outils collaboratifs numériques : des espaces de partage dans le « cloud » de type Google Drive, des outils de téléconférence à plusieurs... Cette mise en réseau donne une puissance et un véritable pouvoir d'action au mouvement qui possède ses propres revues – à l'instar de *Make*, un magazine papier et en ligne créé en 2005 –, ses blogs et ses événements *maker* comme les « Maker Faire » lancées aux États-Unis en 2006 et aujourd'hui présentes dans près de 40 pays dans le monde.

Combien de membres compte la communauté des makers ?

I. B.-H. : C'est difficile à dire. Il n'existe pas de recensement ou d'appellation centralisée pour tous les lieux. Quant à extrapoler leur nombre de visiteurs... Mais on estime qu'il existe aujourd'hui plusieurs centaines de *makerspaces* en France et plusieurs milliers dans le monde. On assiste à l'émergence d'un phénomène mondial qui brouille les frontières entre loisirs et travail, non marchand et marchand, local et global... Certains *makers* viennent là car ils



Makers. Enquête sur les laboratoires du changement social, Isabelle Berrebi-Hoffmann, Marie-Christine Bureau et Michel Lallement, Seuil, avril 2018, 352 p., 21 €

sont en transition professionnelle et veulent acquérir de nouvelles compétences, d'autres sont des indépendants qui ne veulent pas travailler seuls, d'autres sont lycéens, étudiants, retraités. Il n'est pas aisé d'établir un profil type, tant le mouvement *maker* est en ébullition !

Pourquoi s'intéresser au mouvement *maker* lorsqu'on est sociologue du travail et des organisations ?

I. B.-H. : Parce qu'il est un véritable laboratoire du changement social et entraîne une transformation des modes de production et de consommation. En s'attaquant comme les *hackerspaces* au système actuel d'obsolescence programmée, en inventant des réseaux où circulent li-

brement les savoir-faire, le mouvement *maker* s'inscrit clairement à rebours du capitalisme « vertical » – celui des multinationales et de la consommation de masse. Ce qui est passionnant pour les sociologues que nous sommes, c'est qu'il invente des fonctionnements jusqu'alors inconnus en théorie des organisations, à commencer par celui de « communauté ouverte » – un véritable oxymore en sociologie qui a surtout travaillé sur les communautés fermées aux liens forts.

Ces communautés en réseau – et par définition sans leaders – ont inventé un mode de communication qui diffuse partout dans le monde. Elles organisent des « unconferences » (des « non-conférences ») – des conférences participatives qui prennent le contre-pied des présentations magistrales –, des *hackatons* où des groupes de développeurs volontaires se réunissent pour faire de la programmation informatique collaborative, ou encore des « Five minutes of fame », des prises de parole très courtes. Ces nouvelles façons de collaborer se diffusent jusque dans le monde de l'entreprise, qui essaie même parfois de créer ses propres *fablabs* internes. Il n'y a pas que l'ubérisation et l'économie de plateformes qui influencent l'économie aujourd'hui : le mouvement *maker* aussi lui imprime son empreinte... Jusqu'où ? Seul l'avenir le dira. **II**

1. Isabelle Berrebi-Hoffmann est sociologue au Lise, Laboratoire interdisciplinaire pour la sociologie économique (CNRS/Cnam).



PHOTOS : DR

Armes létales autonomes : de quoi parle-t-on ?

Raja Chatila et Catherine Tessier,

roboticien¹ et chercheuse en intelligence artificielle²

Les « armes autonomes », quand ce ne sont pas les « robots-tueurs », font l'objet, depuis environ trois ans, de nombreux articles de presse, lettres ouvertes et débats, dont on constate le caractère sensationnel et anxiogène des arguments avancés, ainsi que la quasi-absence d'explications et d'arguments scientifiques et techniques. Depuis 2014, le débat est engagé à l'ONU à Genève, dans le cadre de la Convention sur certaines armes classiques (CCAC), sur la question d'une interdiction ou d'un moratoire sur le développement de telles armes.

Des mots à la réalité

Le vocable de « robot-tueur » suggère que le robot serait animé par l'intention de tuer, voire qu'il en serait conscient, ce qui n'a évidemment pas de sens pour une machine, quand bien même elle a été conçue et programmée pour détruire, neutraliser ou tuer : on ne parle pas, par exemple, de « missile-tueur ». Il s'agit là d'une rhétorique du pathos qui entrave par nature la discussion éthique, mais qui est utilisée pour rechercher un effet de rejet du public.

Le terme « autonome » est également problématique parce que les différentes parties prenantes, et en premier lieu les scientifiques, lui accordent des acceptions multiples. Une « arme autonome » peut ainsi désigner un engin qui réagit automatiquement à certains signaux prédéfinis, ou bien qui optimise sa trajectoire pour atteindre un objectif dont il aura reconnu automatiquement une signature prédéfinie, ou encore qui cherche automatiquement dans une zone donnée une cible spécifiée par certaines caractéristiques.

Plutôt donc que de parler d'« arme autonome », il semble plus pertinent



▼ Quelle part réserver à l'humain dans la décision d'engager une cible ?

d'étudier quelles fonctions sont – ou pourront être – automatisées, c'est-à-dire assignées à des programmes informatiques, et avec quelles limitations, dans le cadre d'un partage de l'autorité avec un opérateur humain.

Les fonctions automatisées

Les fonctions de guidage et de navigation sont depuis longtemps automatisées (pilotage automatique des avions ou des drones, par exemple) et n'ont pas soulevé de questionnement notable ; elles sont non critiques pour ce débat. Plus sensibles sont les fonctions d'identification et d'engagement (c'est-à-dire d'ouverture du feu) automatiques de cibles.

Les armes existantes, qui sont dotées de capacités de reconnaissance de cibles, sont équipées de logiciels qui comparent des signaux perçus par les capteurs (radio, radars, caméras, etc.) avec une base de signatures (modèles prédéfinis de cibles). Cela concerne en

général de gros objets « faciles » à reconnaître (radars, bases aériennes, chars, batteries de missiles). L'engagement des cibles est réalisé sous supervision humaine. En revanche, ce type de logiciels ne permet pas d'évaluer la situation aux alentours de ces objets – par exemple, la présence de civils.

Reconnaître des cibles complexes

Les discussions et controverses actuelles portent sur le fait qu'une arme puisse être dotée de la capacité de reconnaître des cibles plus complexes (par exemple, des combattants par rapport à des blessés hors de combat), dans des situations et des environnements eux-mêmes complexes (par exemple, dans une situation évolutive), et de la capacité d'engager de telles cibles sur la seule base de cette reconnaissance.

De telles capacités supposeraient de disposer d'une description formelle (mathématique) des états possibles de

1. Raja Chatila dirige l'Institut des systèmes intelligents et de robotique (CNRS/UPMC/Inserm). 2. Catherine Tessier est maître de recherche à l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (Onera), et enseignante à l'Isae-Supaéro. 3. L'IEEE est une association professionnelle et scientifique internationale. Son comité pour l'Initiative mondiale sur l'éthique des systèmes autonomes et intelligents a publié en 2017 le document : *Ethically Aligned Design: A Vision for Prioritizing Human Well-being with Autonomous and Intelligent Systems* (version 2).

l'environnement, des éléments d'intérêt et des actions à effectuer, sachant qu'il n'y a pas de situation type. Elles supposeraient également de reconnaître, à partir des capteurs, tel état, tel élément d'intérêt, et d'évaluer si les actions envisagées respectent les principes d'humanité (éviter les maux superflus), de discrimination (distinguer les objectifs militaires des populations et biens civils), et de proportionnalité (adéquation entre les moyens mis en œuvre et l'effet recherché) inscrits dans le droit international humanitaire (DIH). Les difficultés sont liées au fait de pouvoir comprendre automatiquement une situation sur la base de modèles mathématiques.

Qui décide ?

Au-delà des aspects techniques et légaux, est-il éthiquement admissible que la décision de supprimer un être humain identifié par une machine soit confiée à cette machine ? Plus précisément, on doit se demander comment et par qui seraient établies la caractérisation, la modélisation et l'identification des objets d'intérêt, ainsi que la sélection de sous-ensembles d'informations (au détriment de certaines autres) pour calculer automatiquement la décision. Il s'agit également de savoir qui spécifierait ces algorithmes et comment il serait démontré qu'ils sont conformes aux conventions internationales et aux règles d'engagement, surtout s'ils sont capables d'apprentissage. En outre, qui devrait être responsable en cas de violation des conventions ou de

détournement d'usage ? Car, au-delà des armes proprement dites, il est également important de réfléchir, lors de leur conception, aux potentiels détournements d'usage d'objets dits « autonomes » à des fins d'attaque. Par exemple, comment la voiture autonome ou le drone de loisir peuvent-ils être rendus robustes au piratage et à la modification malveillante ?

Clarifier la responsabilité

Face à ces questions, plusieurs organisations internationales appellent à ce qu'une arme dite « autonome » soit toujours sous contrôle humain significatif, c'est-à-dire que la décision d'engager une cible soit toujours prise par un être humain. D'un point de vue technique, il faut vérifier qu'un être humain dispose, en toutes circonstances, des informations suffisantes et du temps pour prendre cette décision, et cerner en quoi les informations calculées, sélectionnées et transmises par la machine influencent l'appréciation et la décision humaines.

Ainsi, les préconisations formulées par le comité éthique de l'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens³, qui portent sur l'ensemble des technologies des systèmes autonomes et intelligents, énoncent pour les systèmes d'armes létales autonomes quelques principes dont la prévisibilité, la traçabilité, ou l'identification claire des responsabilités humaines.

Les systèmes adaptatifs et apprenants devraient ainsi être conçus de sorte qu'ils puissent expliquer leur raisonnement et leurs décisions aux opérateurs humains de manière compréhensible, les opérateurs demeurant responsables de la mise en œuvre de ces dispositifs. De plus, des systèmes autonomes au comportement prévisible pourraient devenir imprévisibles dans un déploiement en essaim où un comportement émergent imprévu peut apparaître. Ce type d'usage devrait donc être proscrit.

Enfin, il faut souligner que si les armes autonomes peuvent aider à gagner une guerre, l'effet psychologique de leur usage sur les populations qui en seront victimes risque fort d'empêcher de gagner la paix. ▀



© FEDOR/ADOBESTOCK



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

La revue *Hermès* célèbre ses 30 ans

Depuis trois décennies, la revue *Hermès* décrypte les enjeux de la communication sous toutes ses formes, tentant inlassablement de remettre l'humain à sa juste place en plein règne du numérique. Car les techniques, malgré leur essor exponentiel, ne constituent pas l'alpha et l'oméga de la communication : comme le rappellent dans ce numéro anniversaire Dominique Wolton, directeur de la publication, et Bernard Valade, rédacteur en chef, ce n'est pas parce que les hommes disposent d'outils plus rapides que jamais pour échanger que les murs tombent, que les guerres cessent et que les distances culturelles s'amenuisent. Référence dans son domaine, la revue nous offre, pour sa quatre-vingtième livraison, un sommaire particulièrement alléchant et actuel. Suivant le fil rouge des trois axes de recherche privilégiés par *Hermès* (la cognition, la communication et la politique), scientifiques et personnalités littéraires et artistiques livrent leurs réflexions sur l'espace public, la traduction, les controverses, le numérique, l'information, la culture, la mondialisation, ou encore sur la diversité culturelle.

» <https://hermes.hypotheses.org>



Hermès 80. 30 ans d'indisciplines. 1988-2018..., Bureau de la rédaction (dir.), CNRS Éditions, juin 2018, 355 p., 25 €

À lire



SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

Particules fines, solvants, glyphosate, phtalates, déchets toxiques... La liste est longue des produits nocifs pour notre santé. Si la Charte française de l'environnement affirme depuis peu que chacun a le droit de vivre dans un milieu équilibré et respectueux de la santé, établir le lien de causalité entre environnement et maladie n'est pas si facile et requiert l'intervention de nombreux experts : biologistes, toxicologues, géographes, sociologues, politistes, juristes, philosophes... Ce sont les conditions de l'expertise que la philosophe Marie Gaille nous dévoile dans cet ouvrage collectif, et les blocages qu'elle peut générer entre scientifiques, industriels et instances décisionnaires.

Pathologies environnementales. Identifier, comprendre, agir, Marie Gaille (dir.), CNRS Éditions, mai 2018, 384 p., 25 €

FÉMINISMES

Des premières mobilisations à la fin du XVIII^e siècle jusqu'à l'institutionnalisation de la lutte pour les droits des femmes après 1945, la question des droits et de l'émancipation des femmes s'est étendue à tous les continents, et s'y pose selon des modalités spécifiques de luttes politiques, nationales et anticoloniales. Le point de vue global adopté par l'historienne Florence Rochefort dans cette histoire des féminismes permet de saisir ces interactions transnationales et de retracer les grandes caractéristiques des modes de pensée et de mobilisation contre les inégalités entre les sexes.

Histoire mondiale des féminismes, Florence Rochefort, PUF, collection « Que sais-je ? », août 2018, 128 p., 9 €

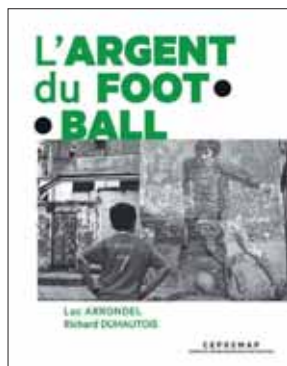


FOOTBALL

Montants colossaux des transferts et des salaires des joueurs, propriétaires de club milliardaires, explosion des droits TV : le football est-il devenu un « business » rentable ? Pour les auteurs de cet ouvrage, l'évolution de ce sport est le reflet de celle de la société : il est entré dans l'ère de la postmodernité. De local à national, de national à international, le ballon rond, tout comme l'économie, s'est globalisé.

Et si l'économie du football professionnel actuel n'a plus grand-chose à voir avec celle des années 1970, les clubs sont en moyenne à l'équilibre financier, et ce sport n'a jamais vraiment permis aux propriétaires de clubs de s'enrichir ou de faire des profits. Le football n'est pas en crise... mais il se transforme. Alors, le XXI^e siècle sera-t-il sportif ?

L'argent du football, Luc Arrondel, Richard Duhautois, Cepremap, juin 2018, 228 p., 12 €



lire aussi notre billet « Le football, petit ou grand business ? » sur lejournal.cnrs.fr

ALIMENTATION

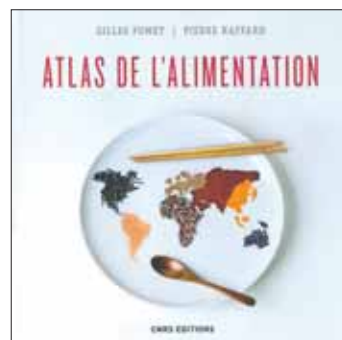
Le goût peut-il être planétaire ?

Comment les aliments ont-ils voyagé ?

Notre biodiversité alimentaire s'est-elle appauvrie ?

Les auteurs de cet atlas décortiquent nos manières de produire et de consommer, de la domestication des plantes à l'origine des produits d'aujourd'hui, de l'avènement de l'élevage intensif au succès du « manger local ».

« *Se nourrir est un acte qui a pris de multiples dimensions et qui a de multiples signifiants* », assurent-ils dans cet ouvrage richement illustré de photographies et de cartes. Une véritable épopée des nourritures terrestres.



Atlas de l'alimentation, Gilles Fumey, Pierre Raffard, CNRS Éditions, avril 2018, 240 p., 24 €

PARCOURS

Oser, résister, mais surtout s'aventurer : une philosophie de vie pour Jean Malaurie, directeur de recherche émérite au CNRS et à l'EHESS, explorateur et spécialiste du



Grand Nord, qui plaide depuis plus de cinquante ans pour la même cause, celle des peuples autochtones. Dans cet ouvrage, il revient en détail sur son combat pour les Inuit de Thulé, menacés par l'installation d'une base nucléaire au cœur de leur territoire

depuis les années 1950. « *Homme des origines, je ne cesserai jamais ce combat en faveur des peuples autochtones, de toutes minorités et particulièrement venant du fond des âges* », clame-t-il. À 95 ans, Jean Malaurie nous fait partager ses convictions écologiques à travers les étapes de son exceptionnel parcours.

Oser, résister, Jean Malaurie, CNRS Éditions, juin 2018, 288 p., 19 €



La radiochimie à la croisée du vivant

Christophe Den Auwer,

chimiste, professeur à l'Institut de chimie de Nice¹.

Si les « rayons uraniques » ont été découverts par Antoine Henri Becquerel en 1896, c'est certainement dès 1898, avec les travaux de Pierre et Marie Curie, que la radiochimie prend son essor et devient une discipline à part entière de la chimie. Depuis, elle n'a cessé de s'adapter aux besoins de nos sociétés, au point que l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) en donne une définition très large : c'est la part de la chimie qui traite des matériaux radioactifs.

Aujourd'hui, la radiochimie est une discipline à la croisée des chemins. Elle émerge aux champs de la santé (radio ou curiethérapie, radiodiagnostic et imagerie), de la défense (sécurité nucléaire, armement, non-prolifération) et de l'énergie (cycle du combustible et réacteurs du futur, démantèlement, gestion des déchets radioactifs, sûreté des installations). Elle peut aussi servir en biologie ou à dater des roches et des événements géologiques... Bref, elle est au point central d'enjeux politiques, économiques et sociaux qu'il est parfois difficile de concilier.

La chimie des radioéléments

Parmi les principaux objets d'étude des radiochimistes, on trouve les éléments de la série actinide (An), dont la position dans le bas du tableau périodique leur confère des propriétés physico-chimiques bien spécifiques. Tous les nucléides de cette famille sont radioactifs (on les appelle aussi des radioéléments). Mais en cas d'événement nucléaire (accident, rejet, attaque), les éléments actinides ne constituent pas nécessairement la source majeure (ou unique) de rejet radioactif. Certains produits de fission comme le césium, le strontium ou l'iode peuvent contribuer de façon bien plus significative à la radioactivité totale

libérée et ont parfois un rôle important dans le métabolisme humain. En revanche, les actinides comptent parmi les rares éléments du tableau périodique à n'avoir aucun rôle essentiel dans les processus biochimiques normaux qui se produisent dans les organismes vivants.

À leur interaction avec le vivant est associée une double toxicité : chimique et radiologique. Leur toxicité chimique peut ressembler à celle des métaux lourds lorsque ceux-ci viennent concurrencer les métaux essentiels de l'organisme (fer ou calcium), mais tout dépend de leur forme chimique (on parle de spéciation). Leur radiotoxicité provient des rayonnements ionisants émis par le radionucléide lors d'une exposition interne. Les études empiriques nous révèlent que les principaux organes ciblés par les actinides sont le squelette, le foie et les reins (les poumons dans certains cas particuliers de contamination orale). Les scientifiques tentent de cerner ces processus afin d'élaborer des mécanismes de blocage ou de décorporation.

Chimie et biologie

Dans notre équipe, à l'ICN, nous essayons de mieux comprendre les processus chimiques de transport et d'accumulation des radionucléides – des actinides notamment – dans l'environnement, le biotope et *in fine* chez l'homme. Nous nous intéressons entre autres à la forme chimique et à la réactivité de ces éléments en milieu biologique, à leurs mécanismes d'incorporation puis de fixation. Plus précisément, nous cherchons à décrire les modes de liaison entre l'actinide et les protéines cibles (qui dépendent des voies métaboliques) et leurs effets sur la structure et la fonction de cette dernière.

Dans ce domaine, il est fondamental de confronter les données de la chimie

aux études de transfert *in vivo*, questions que nous partageons avec nos collègues biochimistes et biologistes, notamment au sein du réseau Toxicologie nucléaire animé par le CEA². Chez l'homme, c'est le système osseux qui a retenu l'attention du consortium mené par Georges Carle³. Nous travaillons ainsi sur les mécanismes chimiques d'accumulation de l'uranium dans le système osseux. On sait déjà, par exemple, que quelques heures après l'intoxication, environ 10 à 15 % de l'uranium se trouve dans l'os où il peut rester plusieurs années (60 à 70 % est excrété directement, le reste sera réparti entre le foie, les reins et les tissus). Il est déposé préférentiellement sur les sites de croissance osseuse et sur les zones de calcification du cartilage squelettique.

Il est donc nécessaire de décrire au mieux les formes chimiques de l'uranium lors du transfert vers les cellules osseuses et *in fine* lors de l'accumulation dans la matrice osseuse elle-même. Notre principal outil est la spectroscopie d'absorption des rayons X, qui se pratique sur une ligne de lumière d'anneau synchrotron (comme la ligne Mars de Soleil ou ROBL de l'ESRF). Nous avons, par exemple, pu définir les modes de liaison de l'uranium avec l'ostéopontine, une protéine impliquée dans la régénérescence osseuse. Toutes ces données doivent permettre de mieux comprendre comment l'uranium s'accumule dans la matrice osseuse et les mécanismes biochimiques qui le permettent.

Cet exemple relatif à la toxicologie montre combien la radiochimie moderne est liée à de nombreuses autres disciplines et s'invite dans des problématiques de société. Depuis un siècle, elle s'est transformée : plus vaste dans ses implications, moins monodisciplinaire dans ses applications. **II**



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

1. Unité CNRS/Univ. de Nice Sophia-Antipolis. 2. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. 3. Unité mixte de recherche Tiro-Matos, à la faculté de médecine de Nice.

Erik Gonthier, maître de conférences, ethnominéralogiste au Muséum national d'histoire naturelle¹

“Je me souviens...”

PROPOS RECUEILLIS PAR ANNE-SOPHIE BOU TAUD

... de la redécouverte de ces instruments « fossiles », des lithophones, en 2004, au musée de l'Homme. Ces objets étaient jusque-là identifiés comme des outils, des « pilons sahariens néolithiques » datés de 9000 à 2500 avant notre ère. Pour moi, c'était impossible : pesant de 7 à 9 kilos, ils étaient trop lourds pour être maniés, trop longs pour être efficaces. En les percutant dans mes mains, je décèle des harmoniques mais pas de résonance. J'ai d'abord pensé à un son technique, permettant d'évaluer si une roche est exploitable ou transportable. Ancien violoniste, il me vient à l'esprit que ce pourrait bien être des instruments de musique... Sur des morceaux de mousse, pour ne pas feutrer la résonance, je martèle la roche avec un maillet : une longue résonance se dégage, puis deux notes distinctes. Des sons identiques à ceux que pouvaient percevoir les hommes du Néolithique ! Ce qui est étonnant, c'est qu'il n'existe quasiment aucune représentation de ces objets dans l'art pariétal. Si la mémoire collective a pu oublier leur utilisation d'origine, la recherche nous permettra d'en retracer l'histoire...

PHOTO : PATRICK GAILLARDIN/LOOKATSCIENCES



▶ Visionner notre vidéo
« Concert à l'âge de pierre »
sur lejournel.cnrs.fr

1. Laboratoire Histoire naturelle de l'homme préhistorique (CNRS/MNHN/Univ. de Perpignan Via Domitia).







de Denis Guthleben,
historien au CNRS

CNRS et Université : les noces de tourmaline

S'il est un sujet qui traverse toute l'histoire du CNRS, c'est celui des relations entre notre établissement et les universités. Au fil des décennies, il a entretenu bien des débats, encouragé une foule d'initiatives, mais aussi nourri des fantasmes qui ont la peau dure. Il serait présomptueux de prétendre faire le tour de la question ici, mais rien n'empêche de rappeler quelques faits...

« Contre... tout contre »

Le premier a trait à la naissance du CNRS, et renvoie à un préjugé coriace : le Centre aurait été conçu pour neutraliser une Université défaillante en matière de recherche.

En un mot, il aurait été créé contre l'Université. Quelques arguments semblent étayer cette hypothèse. Scientifiquement, l'Université française s'est parfois montrée frileuse devant des disciplines nouvelles : la génétique expérimentale, mise au ban de nos facultés dans l'entre-deux-guerres alors qu'elle se développait partout ailleurs, fournit un exemple frappant. Sans compter que, financièrement, l'Université peinait à soutenir la recherche. « *La grande misère de nos laboratoires* »

était dénoncée jusqu'à la une de la presse, à l'instar du *Petit Journal* dévoilant en mars 1921 l'installation de Jean Perrin à la Sorbonne : « *trois pièces en enfilade, grandes chacune comme un cabinet de débarras, les préparations traînent à terre ou sont clouées au mur faute de place...* »

Mais le CNRS n'a pas été conçu pour évincer les universités. Ses fondateurs appartenaient tous à l'*alma mater*¹, à commencer par le premier d'entre eux : professeur de chimie-physique à la faculté des sciences de Paris, Jean Perrin n'a jamais envisagé de la supplanter, mais de la suppléer tout en posant avec le Centre les bases d'une politique nationale de la recherche. Autour de lui, la plupart des responsables du CNRS et de ses laboratoires étaient des universitaires : Aimé Cotton, Henri Laugier, Georges Teissier et Georges Urbain professaient à Paris, Henri Longchambon à Lyon, Louis Néel

à Strasbourg puis à Grenoble, Gaston Dupouy à Toulouse... Et tous avaient constaté, aussi bien dans la définition des orientations à l'échelle du pays que dans le fonctionnement particulier de leurs laboratoires, les avantages de la complémentarité entre les deux institutions. En somme, dès 1939, le CNRS s'est comporté avec l'Université comme Sacha Guitry avec les femmes : « *contre... tout contre* » !

Mariages mixtes

Au fil des années, l'union n'a fait que se renforcer, au point qu'il a bientôt été question de mariage. Et c'est le CNRS qui, au milieu des années 1960, a formulé sa demande. L'idée revient à Pierre Jacquinot, directeur du Laboratoire Aimé-Cotton et professeur de spectroscopie à Paris, qui a commencé à l'échafauder dès son arrivée à la direction générale du CNRS en 1962 : établir avec les laboratoires universitaires des « *contrats pluriannuels comportant une aide sélective et spécialisée* ». Car le CNRS avait prévu de fournir lui-même la dot – il faut dire qu'il avait alors les moyens de sa générosité, avec une subvention d'État qui avait doublé entre 1958 et 1960 et connu ensuite chaque année une croissance supérieure à 25 % en valeur constante...

Le nouveau dispositif a finalement été inauguré le 1^{er} janvier 1966 : 60 « laboratoires associés » ont été reconnus par le CNRS. Le 1^{er} janvier 1967, ce chiffre est monté à 106, alors qu'une formule d'« équipes de recherche associées », mieux adaptée aux petites formations – en biologie et en sciences humaines notamment –, rencontrait la même réussite avec 81 contrats signés. Puis, de 187, ces associations sont passées à 278 en 1968, 363 en 1969...

Bien sûr, les appellations ont évolué depuis. Pour faire simple : les « LA » et les « ERA » sont devenues des « UM » – unités mixtes – en 1984, puis des « UMR » – unités mixtes de recherche – en 1987. Mais la philosophie est toujours restée la même, et le succès ne s'est jamais démenti : après 52 ans de mariage – on parle de noces « de tourmaline », que ne va-t-on pas inventer ! – et malgré quelques prises de bec, le couple CNRS-Université demeure d'une solidité à toute épreuve. ■

Après 52 ans
de mariage,
le couple demeure
d'une solidité à
toute épreuve.

1. Expression d'origine latine signifiant « mère nourricière ». Par la suite, elle a été employée pour désigner l'université.



© Éric Michel

Platonium

Une œuvre immersive art-science
de Éric Michel et Akari-Lisa Ishii

Une production CNRS

**PARVIS DE LA CITÉ DES
SCIENCES ET DE L'INDUSTRIE**

6 OCTOBRE 2018

Dans le cadre de



www.cnrs.fr/platonium



**NUIT
BLANCHE**
[2018]



CNRS X STARTUP

Notre recherche au cœur de la deep tech

10 oct. 2018

13 heures, siège du CNRS

3, rue Michel-Ange - 75016 Paris

L'événement dédié aux entreprises innovantes et aux chercheurs-entrepreneurs du CNRS

**Ateliers participatifs, tables rondes
et rencontres avec des start-up
issues du CNRS**



cnrs.fr/evenement/cnrsxstart