

Trimestriel n° 311
MARS 2023

CNRS

LE JOURNAL



Avec Juice,
l'Europe décolle
pour Jupiter

DOSSIER
En route vers
la sobriété

Cancer : des
traitements ciblés
en ligne de mire

PORTRAIT
Bérengère Dubrulle
ou l'effet tourbillon

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS #13

Entrez dans les coulisses
de la recherche

#13 actuellement
en vente
en librairie et Relay

200 pages / 12,50 €

#14 à paraître en mai



www.carnetsdescience-larevue.fr



CNRS ÉDITIONS

CNRS LE JOURNAL

Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

Téléphone : 01 44 96 40 00

E-mail : lejourn@cnrs.fr

Le site Internet : <https://lejournal.cnrs.fr>

Anciens numéros :

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

Directeur de la publication :

Antoine Petit

Directeur de la rédaction :

Jérôme Guilbert

Rédacteur en chef :

Matthieu Ravaut

Rédactrice en chef adjointe :

Charline Zeitoun

Chefs de rubrique :

Laure Cailloce, Saman Musacchio, Yaroslav Pigenet

Rédactrices :

Sophie Félix, Laurence Stenvot

Ont participé à ce numéro :

Kheira Bettayeb, Julien Bourdet, Anaïs Culot, Denis

Guthleben, Mathieu Grousson, Martin Koppe,

Louise Mussat, Matthieu Stricot, Philippe

Testard-Vaillant, Salomé Tissolung

Secrétaire de rédaction :

Émilie Silvoz

Direction artistique :

David Faure

Iconographies :

Valérie Delchambre,

Anne-Emmanuelle Héry, Sophie Léonard

Gestionnaire :

Mathieu Chatellier

Assistant de direction :

Frédéric Roman

Illustrations :

Anne-Hélène Dubray / Agent 002

Laurent Bazart / Illustrissimo

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 :

contact-mediatheque@cnrs.fr

<https://images.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 :

Béregère Dubrulle, Prix Irène Joliot-Curie 2022, ici au

Service de physique de l'état condensé.

© FRÉDÉRIQUE PLAS

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

Abonnez-vous gratuitement sur :

» lejournal.cnrs.fr/abojournal

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



“La création de la Mission programmes nationaux renforce la capacité du CNRS à initier et piloter de grands programmes pluridisciplinaires.”

Dans le cadre de France 2030, l'État a créé des Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) pour construire ou consolider un leadership français dans des domaines majeurs où la science et l'innovation feront la différence.

Le CNRS est, pour l'heure, pilote ou copilote de 31 PEPR sur les 41 lancés par le gouvernement. Comme en témoignait un dossier dans le numéro précédent du journal, ces programmes ambitieux, dotés chacun d'un financement de plusieurs dizaines de millions d'euros, mobilisent les meilleures communautés sur tout le territoire.

Deux types de programmes se déploient en ce moment même. Tout d'abord, les PEPR exploratoires qui visent des secteurs scientifiques ou technologiques en émergence et pour lesquels l'État souhaite identifier et structurer les communautés : allant du stockage sur ADN aux matériaux, en passant par la robotique, la génétique, le climat et l'environnement, ou encore le numérique, les thématiques sont à la fois larges et de première importance comme le PEPR Propsy, présenté dans ces pages et qui concerne les recherches sur les pathologies psychiatriques.

Les PEPR d'accélération quant à eux, s'inscrivent dans les priorités nationales de l'État et sont destinés à accompagner les transformations déjà engagées avec

des produits, services, usages et acteurs bien identifiés. Une quinzaine de marchés clés ont été identifiés parmi lesquels la santé, l'agriculture et l'alimentation, le numérique, la culture, l'éducation, la mobilité ou encore le développement durable.

Ces thèmes représentent des centaines d'équipes, des milliers de chercheurs et de chercheuses des organismes de recherche et des universités, engagés pour procurer à la France un avantage concurrentiel dans la production de résultats de recherche majeurs ; ils permettront d'accroître les connaissances et alimenteront l'ensemble du cycle de vie d'une innovation, de l'émer-

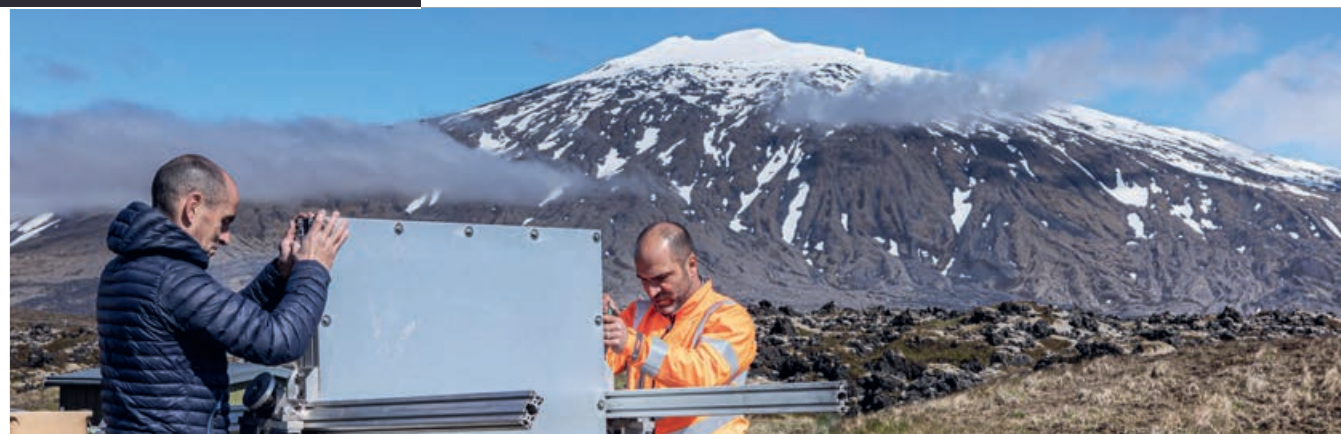
gence d'une idée dans un laboratoire de recherche jusqu'à la mise sur le marché. Leur champ est large et leurs perspectives engagent des moyens financiers, humains et des relations de partenariat qui renforcent la mission du CNRS comme organisme responsable et opérateur, à l'échelle nationale, de la programmation de la recherche.

C'est pourquoi a été créée en tout début d'année une Mission programmes nationaux (MiPN), destinée à articuler ses ressources, ses forces et ses atouts dans toutes leurs dimensions scientifiques, de valorisation, de communication et de gestion. Nous renforçons ainsi la capacité du CNRS à initier, piloter et animer de grands programmes scientifiques pluridisciplinaires, en liaison avec les politiques publiques de soutien à la recherche et à l'innovation.



Frédéric Villieras,
directeur de la Mission programmes nationaux du CNRS

© UNIVERSITÉ DE LORRAINE



© CAROL MÜLLER / CNRS PHOTO THÈQUE

GRAND FORMAT

11

En route vers la sobriété	12
Des muons en Islande	26
Objectif Jupiter	32



© PASCAL ITO

Éveline Heyer
ou l'Odyssée des gènes

08

EN PERSONNE 5

Bérengère Dubrulle, l'effet tourbillon	6
Éveline Heyer ou l'Odyssée des gènes	8
Brèves	10



© STEVE GOSCHKEISSNER / SPL / PHANE

Ce que les nanoparticules
font à nos cellules

55

EN ACTION 39

« Il n'y a pas de santé sans santé mentale »	40
Les maths multiplient les innovations	44
Dans le cerveau, ce sont les connexions qui commandent !	46
Un robot plongeur pour nettoyer les zones côtières	48
Contre le cancer, des traitements ciblés en ligne de mire	50
Un algorithme pour éviter les débris spatiaux	52
Le CNRS, moteur d'innovation	54
Ce que les nanoparticules font à nos cellules	55



© UGC / AP

Féminicide:
nommer le crime
pour pouvoir
le combattre

62

LES IDÉES 57

« L'humain a créé les conditions de la surpopulation de sangliers »	58
Féminicide : nommer le crime pour pouvoir le combattre	62

LA CHRONIQUE

Quand la physique fait société	66
--------------------------------------	----

EN PERSONNE



*Où l'on rencontre notamment une
chercheuse tourbillonnante, femme
scientifique de l'année, et une spécialiste
de l'histoire de l'humanité.*

Bérengère Dubrulle, l'effet tourbillon

MATIÈRE

PORTRAIT Elle est la femme scientifique de l'année 2022 ! Bérengère Dubrulle, physicienne, a reçu le 10 février le prix Irène Joliot-Curie décerné par l'Académie des sciences. Une distinction de plus pour cette spécialiste des turbulences qui est notamment à l'origine d'un nouveau modèle de formation de planètes.

PAR LOUISE MUSSAT

Avec Bérengère Dubrulle, ça tourbillonne. Au sens figuré – elle se dévoile d'emblée énergique, pensées vives, cheffe d'orchestre d'une vie à cent à l'heure – comme au sens propre : les tourbillons, elle y pense quasiment tout le temps. Et pour cause : « *Ils sont partout, à toutes les échelles* », explique-t-elle, des tourbillons quantiques aux tourbillons galactiques qui dominent le paysage cosmique.

Traquer la clé des mystères de l'Univers

Ces vortex qui font danser l'infiniment grand et l'infiniment petit, Bérengère Dubrulle, directrice de recherche au CNRS, au Service de physique de l'état condensé (Spec)¹, en a fait l'objet d'une quête. Sans relâche, elle s'efforce d'explorer la turbulence dans les fluides, de déchiffrer toutes ces spirales de matière pour les réduire en équations, et ainsi mieux appréhender le monde. « *Tout l'Univers est fait de fluides, agités par des tourbillons. Les décrypter revient donc à trouver la clé des mystères de l'Univers*, assène-t-elle, grand sourire lumineux en guise de ponctuation. *Plus précisément, la clé réside dans la résolution de l'équation de Navier-Stokes qui décrit le mouvement des fluides newtoniens, c'est-à-dire de quasiment tous les gaz et les fluides. C'est à cette équation que tous les ingénieurs se réfèrent pour concevoir des machines ou des véhicules, par exemple des avions.* »

Mais, problème, cette équation pourrait comporter une singularité, soit une sorte d'anomalie à cause de laquelle on ne peut plus garantir l'unicité de la solution ; plusieurs solutions seraient alors possibles ! Coquetterie de mathématicien maniaque ? Aucunement répond la

chercheuse : « *Admettons que des constructeurs comme Dassault ou Airbus cessent d'expérimenter leurs prototypes et, pour élaborer leurs engins, ne se fient qu'aux simulations basées sur l'équation de Navier-Stokes – ce qui est la tendance actuelle. Puisqu'il existe potentiellement plusieurs solutions, cela pourrait se traduire, par exemple, par des ailes d'avion qui ne se comportent pas comme attendu en vol... Je ne vous cache pas que j'y pense un peu quand j'embarque dans un avion ! C'est un tel casse-tête que l'équation de Navier-Stokes a été classée au rang des sept problèmes du millénaire². Celle ou celui qui le résoudra deviendra à coup sûr célèbre.* » Ce sera peut-être grâce à elle, qui obstinément s'attelle à en percer les secrets.

Une « martienne » inspirée par Marie Curie

Sa vocation de chercheuse est née vers 8 ans, non seulement en contemplant le ciel depuis la maison bretonne de sa grand-mère, mais aussi en feuilletant des livres sur les grandes figures de l'Histoire. « *Parmi les personnages qui m'ont marquée à l'époque, il y avait Marie Curie. En lisant la biographie de cette femme qui avait mené une brillante carrière de recherche, je me souviens m'être dit "c'est ça que je veux faire, et je peux le faire !"* » Évidemment, le prix Irène Joliot-Curie (fille de Marie Curie, Ndlr), que vient de lui décerner l'Académie des sciences, résonne un peu comme un clin d'œil du destin.

“*Enfant, en lisant la biographie de Marie Curie, je me souviens m'être dit : « C'est ça que je veux faire, et je peux le faire ! ».*”

Toute sa scolarité durant, la physicienne se sent « *comme une martienne* », comprend tout au bout de deux minutes de cours, écrit des poèmes le reste du temps.

1. Unité CEA/CNRS. 2. En 2000, le Clay Mathematics Institute présente au Collège de France sept problèmes majeurs des mathématiques, qui sont des défis à la communauté scientifique (par exemple la conjecture de Poincaré ou l'hypothèse de Riemann). Chacun est doté d'un prix d'un million de dollars.



© FREDÉRIQUE PLAS

Se sent seule, souvent. Tout change quand elle rentre à l'École normale supérieure (ENS) : « Là-bas, j'ai rencontré des martiens comme moi, qui partageaient mes centres d'intérêt. L'astronomie, notamment », se souvient-elle. Après l'ENS, Bérengère Dubrulle choisit de mener une thèse en astrophysique, sous la direction de Jean-Paul Zahn, de l'Observatoire de Paris, sur la formation des planètes, avant d'entrer au CNRS en 1991.

Des turbulences tout en maîtrise

Elle a alors 26 ans et s'apprête à apporter sa première grosse pierre à l'édifice de la recherche : « Nous étions confrontés à une énigme : si l'on s'en tenait au modèle de formation des planètes par "effet boule de neige", c'est-à-dire par l'accrétion progressive de petits grains de glace et de silicate présents dans le disque protoplanétaire, le processus prenait des centaines de millions d'années, alors que l'on sait que notre planète a été façonnée en quelques dizaines de millions d'années. J'ai alors proposé d'ajouter au modèle l'effet de la turbulence, auquel tout disque protoplanétaire devait selon moi être soumis ; et ça a marché : tout comme

► Bérengère Dubrulle, ici au Service de physique de l'état condensé, est lauréate du prix Irène Joliot-Curie 2022.

les particules de savon se rassemblent dans le vortex formé par l'eau du bain qui se vide, les grains du disque entourant le Soleil se rassemblent très efficacement le long de multiples tourbillons. Ce qui fait grossir les embryons de planètes à un rythme plus soutenu ».

À la fin des années 1990, Bérengère Dubrulle, déjà lauréate de la médaille de bronze du CNRS depuis quelques années, n'est ainsi rien de moins que l'auteure d'un nouveau scénario de formation planétaire, aujourd'hui admis et utilisé par l'ensemble de la communauté. Accessoirement, elle est aussi déjà mère de trois enfants, et enceinte du quatrième. « J'ai voulu assumer pleinement le choix d'être mère, raconte-t-elle. De ce fait, ma carrière a un peu stagné pendant vingt ans, mais je ne regrette rien. Avoir des enfants, ça vous ancre dans la réalité, ça vous pousse à faire une pause dans des réflexions de théoricien qui peuvent parfois tourner en boucle. »

Un virage pour le climat

En 1999, direction l'université du Colorado, en tant que chercheuse détachée. « C'est là-bas que, pour la première fois, j'ai entendu parler du changement climatique. Je me suis immédiatement dit qu'il fallait que je fasse quelque chose », dit-elle. L'expérience lui fait prendre un virage dans sa carrière : elle entend désormais exploiter son expertise ès tourbillons en géophysique, pour mieux comprendre les caprices de l'atmosphère et l'impact des activités humaines sur le climat.

De retour en France, elle intègre donc le Spec. Dans ce nouveau temple de la physique, avec « plein d'outils à disposition pour faire des mesures et vérifier nos modèles », Bérengère Dubrulle ausculte en particulier les phénomènes de bifurcation, c'est-à-dire les changements de cap brutaux dans les circulations marines et océaniques. « Cela fait longtemps que l'on voit dans nos expériences l'équivalent d'un possible arrêt du Gulf Stream sous l'effet du changement climatique : c'est exactement le scénario du film Le Jour d'après. Dès le début des années 2000, je faisais partie de ces scientifiques, dépeints dans le film, qui alertent sur les conséquences potentiellement extrêmes du réchauffement, et qui ne sont pas écoutés... »

Aujourd'hui, désormais écoutée de tous, elle tente de comprendre comment des turbulences à toute petite échelle pourraient être à l'origine des fameuses bifurcations. En marge de ses travaux, elle s'emploie toujours à faire progresser la compréhension de la coriace équation de Navier-Stokes, prend part à de nombreuses actions de vulgarisation, continue aussi d'écrire de la poésie, comme quand elle était petite et martienne... et de traquer la clé des mystères de l'Univers, en tourbillonnant. II



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

Évelyne Heyer ou l'Odyssée des gènes

VIVANT 

ENTRETIEN Pourquoi *Homo sapiens* a-t-il eu la « bougeotte », finissant par coloniser l'ensemble de la planète ? Comment des facteurs culturels ont-ils influé sur nos gènes ? L'anthropologue et généticienne Évelyne Heyer nous raconte l'aventure humaine à travers l'espace et le temps, au prisme des dernières conclusions tirées grâce à la génétique.

PROPOS RECUEILLIS PAR MATTHIEU STRICOT

Votre équipe d'anthropologie génétique étudie l'aventure humaine de manière autant biologique que culturelle...

Évelyne Heyer¹. Oui, nous partons de l'idée que l'humain transmet non seulement ses gènes, mais aussi sa culture, et que cela joue dans son évolution. L'unité Éco-anthropologie² que je dirige mêle donc sciences de la vie et sciences humaines et sociales, en incluant de la génétique des populations, de l'anthropologie, de la linguistique, de la primatologie ou encore de la démographie historique. L'éco-anthropologie propose une lecture originale en étudiant comment les humains façonnent des cultures et des environnements, et comment, « en retour », ceux-ci façonnent la biologie de nos organismes au travers de l'évolution.

Y a-t-il eu un déclic, une énigme sans réponse, qui vous a poussée vers cette approche ?

É.H. C'est à peu près ça. Pour ma thèse sur les populations humaines, j'essayais de comprendre pourquoi il existait une forte prévalence d'une maladie génétique rare dans une

population humaine donnée. J'ai vite remarqué que les concepts appris en génétique des populations et en théorie de l'évolution ne suffisaient pas à l'expliquer. Il fallait ajouter une composante culturelle. Je me suis donc décidée à explorer cette dimension dans l'évolution biologique des populations.

En quoi les récentes découvertes en génétique révolutionnent-elles le domaine ?

É.H. L'accès facilité aux données génétiques au niveau des individus, grâce au séquençage haut débit, est le grand progrès. Notre ADN est une sorte de mosaïque de différents fragments transmis par nos ancêtres. En comparant ces fragments au sein d'individus de différentes zones géographiques, on peut retracer s'ils avaient des ancêtres communs et retracer des migrations. Cela permet aussi de comprendre le rôle des structures de parenté : elles peuvent favoriser davantage les migrations des femmes que celles des hommes, et favoriser ou limiter les mariages entre apparentés. L'ADN nous permet aussi d'accéder à des informations de

type culturel auxquelles on n'aurait pas accès autrement. En travaillant sur des gènes impliqués dans l'adaptation à l'alimentation, ceux qui permettent la digestion de tel ou tel aliment par exemple, on peut ainsi étudier le degré d'adaptation des humains à leur environnement.

Pourquoi la manière de se déplacer des hominidés et la façon dont elle a évolué se révèlent-elles plus complexes qu'on ne le pensait ?

É.H. La locomotion des chimpanzés sur deux ou quatre pattes n'est qu'une spécialisation. Quand on remonte à l'ancêtre commun, on trouve quelque chose d'intermédiaire. C'est la quantité de temps passé sur deux pattes qui varie d'une lignée à l'autre. Ainsi le « fémur de Toumaï », trouvé au Tchad en 2001, montre qu'il était bipède habituel mais aussi arboricole et quadrupède. Un moment déterminant a eu lieu il y a environ 2 millions d'années, quand le premier hominidé (*Homo erectus* ou *Homo habilis*, on l'ignore) est sorti d'Afrique. On le sait grâce à la découverte de la mandibule de Dmanissi en 1991, dans l'actuelle Géorgie. La lignée *Homo* est alors devenue essentiellement bipède.

La migration est-elle constitutive de notre espèce ?

É.H. Oui, mais ça ne veut pas dire que tout le monde migre. Notre génome révèle ces histoires de migration mais



À lire :
La Vie secrète des gènes, É. Heyer, Flammarion, oct. 2022, 160 p., 18 €

L'Odyssée des gènes, É. Heyer, Flammarion, août 2020, 388 p., 22,90 €

1. Directrice de l'unité Éco-anthropologie (CNRS/Muséum national d'histoire naturelle-MNHN) et professeure d'anthropologie génétique au MNHN. 2. Unité CNRS/MNHN.



© PASCAL ITO

► Évelyne Heyer, en juillet 2022.

aussi des adaptations locales, avec des populations stabilisées sur plusieurs milliers d'années. Pourquoi *Sapiens* a-t-il autant bougé ? Il n'y a pas de raison climatique, ni écologique car nous étions alors très peu nombreux et il n'y avait pas de pénurie de nourriture justifiant notre sortie d'Afrique. Je crois que notre espèce a migré de manière involontaire, faisant quelques kilomètres par génération, et finissant par coloniser l'ensemble de la planète, en allant voir « de l'autre côté de la colline », par curiosité. Seuls certains lieux ont nécessité une réelle adaptation des points de vue technologique et biologique, car l'être humain a la faculté d'être étonnamment généraliste.

Ces voyages ont-ils eu des répercussions dans notre diversité génétique ?

É. H. Oui, cela a limité les différences entre les populations. Songez que deux humains pris au hasard sur la planète sont génétiquement identiques à 99,9 % ! Depuis notre sortie d'Afrique, la seule différence géné-

tique qui se traduit par une importante différence phénotypique (un trait observable), c'est la couleur de peau. Il s'avère en fait que l'adaptation à un ensoleillement plus faible par une couleur de peau plus claire est d'autant plus importante que l'alimentation est pauvre en vitamine D. La sélection d'une couleur de peau plus claire en Europe s'est donc certainement produite lors du passage à une alimentation moins riche en vitamine D, au Néolithique. Ce qui signifie que, en l'état actuel des connaissances, l'Européen typique d'avant le Néolithique, il y a entre 40 000 et 5 000 ans, était plutôt de peau foncée, voire noire. Avec des yeux bleus, car une autre mutation nous indique que c'était très fréquent dans la région.

Comment travaillez-vous sur le terrain ?

É. H. En Afrique centrale, je m'appuie sur les ethnologues de mon unité qui travaillent dans la région depuis plus de vingt ans. Ces personnes ont une connaissance des populations,

ont accès aux autorités et elles connaissent des homologues sur place. Cela permet de mener des enquêtes interdisciplinaires bien préparées. En Ouzbékistan, je travaille dans les villages avec des chercheurs de l'Académie des sciences. En Sibérie, je me suis aussi appuyée sur un ethnologue de mon unité, Boris Chiclo, parti en amont pour trouver des interlocuteurs locaux. Nous formons toujours des équipes mêlant des chercheurs en sciences humaines et en biologie.

Les recherches du paléanthropologue Yves Coppens, décédé le 22 juin dernier, vous ont-elles inspirée au long de votre parcours ?

É. H. Il étudiait des périodes plus anciennes et des objets différents, mais j'admire sa capacité à intégrer les nouveaux résultats de la recherche, même quand ils n'allaient pas dans le sens de ce qu'il pensait. C'est un état d'esprit particulièrement crucial dans une science en mouvement. Il m'a beaucoup apporté humainement et je partage son souci de la diffusion des connaissances.

Vos travaux sont au cœur de questions sociétales très débattues. Comment les diffusez-vous au grand public ?

É. H. J'ai notamment travaillé sur l'exposition « Nous et les autres – Des préjugés au racisme » en 2017/2018 au musée de l'Homme. Nous avons réfléchi aux connaissances qu'on pouvait apporter en s'associant avec des historiens et des sociologues sur les questions de société comme le racisme. J'essaie aussi de trouver le temps pour rédiger des ouvrages aussi accessibles que possible. Mon livre *L'Odyssée des gènes* avait pour objectif de montrer que nous avons tous des ancêtres migrants. Une question définitivement d'actualité. **II**



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

Adeline Nazarenko nouvelle directrice de l'INS2I

© C. FRÉLON / CNRS PHOTOTHÈQUE



« Fondements empiriques de la linguistique » lancé en 2011. En 2014, elle intègre l'INS2I en tant que chargée de mission puis directrice adjointe scientifique en 2016, avant de créer en janvier 2022 la Mission pour l'expertise scientifique du CNRS qu'elle dirige jusqu'à cette nomination.

Le 1^{er} février, Adeline Nazarenko a été nommée à la tête de l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INS2I) du CNRS. Elle succède à Ali Charara, qui occupait ces fonctions depuis janvier 2019. Spécialiste du traitement automatique des langues, elle mène des recherches sur l'analyse sémantique des textes et les méthodes d'accès à l'information. Depuis une dizaine d'années, elle s'intéresse en particulier à l'analyse des textes juridiques. En 1996, elle avait rejoint le Laboratoire d'informatique de Paris Nord, un laboratoire sous co-tutelle entre le CNRS et l'université Sorbonne Paris Nord, avant de devenir responsable d'une équipe de recherche et présidente du département d'informatique de l'université. Elle prend une part active dans la création puis la direction du Laboratoire d'excellence

Deux mathématiciens du CNRS à l'honneur

Chaque année depuis 1885, grâce à une dotation provenant de la famille du mathématicien Claude-Antoine Peccot, le Collège de France distingue des mathématiciens de moins de 30 ans, particulièrement prometteurs, au travers des « cours Peccot » : les lauréats ont notamment l'opportunité de présenter leurs recherches au travers de quatre conférences au Collège de France. Cette année, ce sont deux mathématiciens du CNRS qui sont récompensés : Thibault Lefeuvre, de l'Institut de mathématiques de Jussieu-Paris Rive Gauche et Charles Bertucci, du Centre de mathématiques appliquées, donneront ainsi leurs cours en mars et avril.

#HorizonEU #EtoilesDeLEurope



© XGSE BOUZAS/MESR

Nicolas Mansard et Jean-François Doussin (4^e et 5^e en partant de la gauche) figurent au palmarès des Étoiles de l'Europe 2022.

2 étoiles pour le CNRS

Le 6 décembre dernier, le musée du quai Branly-Jacques Chirac a accueilli la cérémonie des Étoiles de l'Europe qui récompense les coordinateurs de projets de recherche collaboratifs européens. Les trophées ont été remis à 12 lauréats dont deux scientifiques portant des projets CNRS : Jean-François Doussin, chercheur en chimie de l'atmosphère et Nicolas Mansard, chercheur en robotique.

Nominations en délégations

Le 1^{er} janvier, Géraud Delorme, précédemment secrétaire général à la métropole Nice Côte d'Azur, a été nommé délégué régional du CNRS pour la circonscription Alsace. Il succède à Patrice Soullie. À compter du même jour, Isabelle Longin a été nommée aux fonctions de déléguée régionale de la circonscription Paris-Normandie, issue de la fusion des délégations Paris Michel-Ange et Normandie.



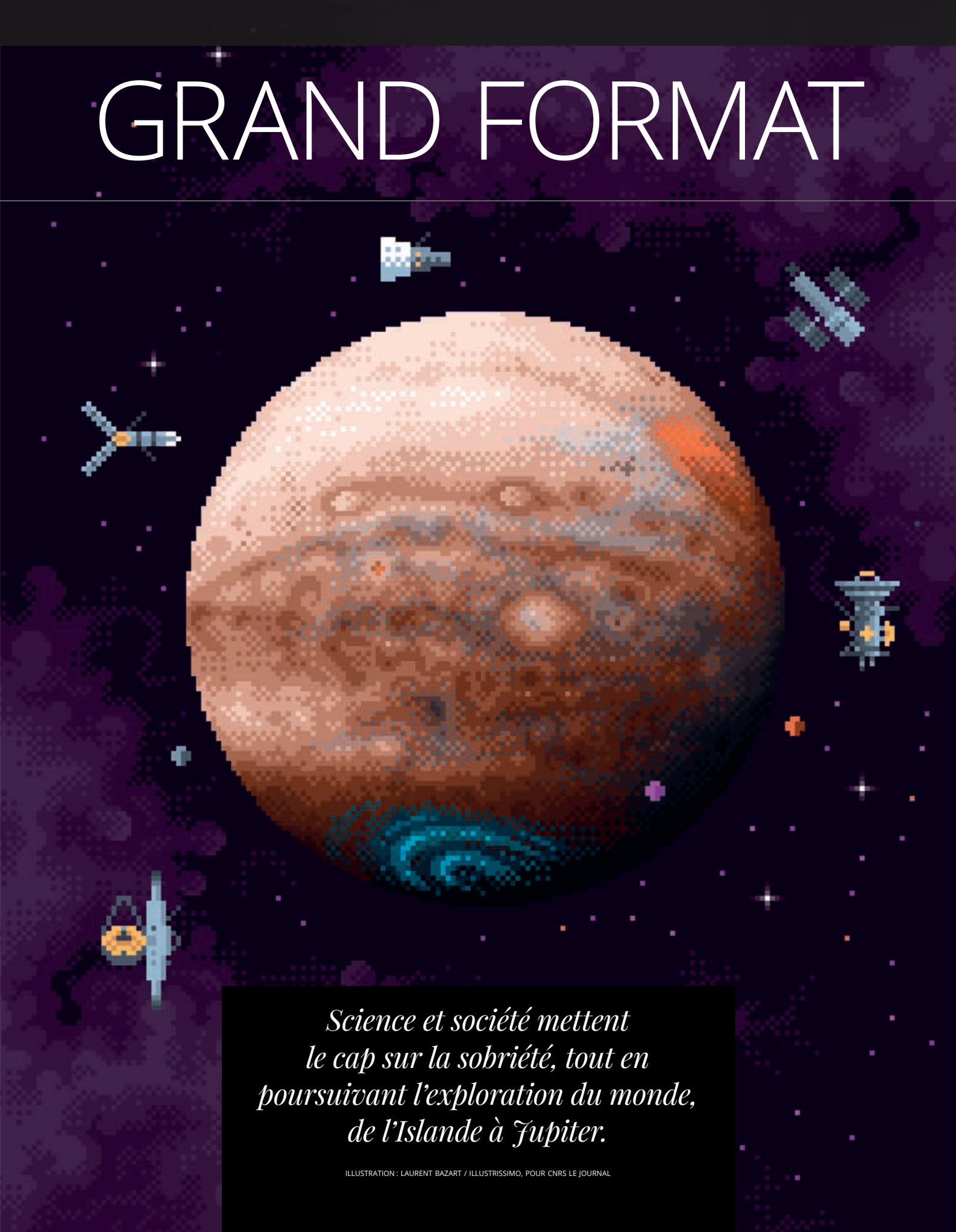
Géraud Delorme



Isabelle Longin

© F. PLAS / CNRS PHOTOTHÈQUE

GRAND FORMAT



*Science et société mettent
le cap sur la sobriété, tout en
poursuivant l'exploration du monde,
de l'Islande à Jupiter.*

ILLUSTRATION : LAURENT BAZART / ILLUSTRISSIMO, POUR CNRS LE JOURNAL

En route vers la sobriété



Face aux défis climatique, environnemental, énergétique... notre mode de vie, notre système économique, notre façon même de faire de la recherche sont questionnés. Pistes de réflexions et premiers engagements à découvrir ici.

DOSSIER RÉALISÉ PAR LAURE CAILLOCE ET SOPHIE FÉLIX
ILLUSTRATIONS ANNE-HÉLÈNE DUBRAY / AGENTE 002



«La sobriété ne peut pas reposer seulement sur les individus»

Qu'est-ce que la sobriété dont on nous parle beaucoup depuis quelques mois ? Comment la définir ?

Sophie Dubuisson-Quellier¹. Tout dépend sous quel angle on envisage la notion. L'arrivée du concept de « sobriété » dans le discours public est très récente et très rapide. Il y a quelques mois encore, le terme était considéré comme tabou car il évoquait l'écologie punitive. La sobriété à laquelle les Français sont appelés aujourd'hui, et les Européens plus largement, s'est imposée dans un contexte particulier, qui est un contexte de crise énergétique lié à la guerre en Ukraine ; il s'agit d'une modération des consommations d'énergie, qui vise surtout le consommateur final et repose sur la responsabilisation des individus.

Mais en réalité, la notion de sobriété existe dans la recherche en sciences sociales depuis une vingtaine d'années déjà. Elle a fait l'objet de nombreux travaux, principalement chez les chercheurs anglo-saxons, sous le terme de « *sufficiency* » – un concept repris par le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) pour la toute première fois en 2022, et qu'on pourrait traduire par « ce qui est suffisant », « ce qui suffit ».

Que recouvre ce terme de « *sufficiency* », qui sonne différemment de sa traduction française de « sobriété » ?

S. D.-Q. Dans la littérature scientifique, la *sufficiency* concerne la modération de la consommation, mais aussi, plus en amont, de nouvelles orientations de la production et des services. Elle pose la question de la soutenabilité de notre mode de vie, de ce qui est « suffisant » ou « assez » (« *enough* »), et suggère l'introduction de limites. Plusieurs modèles ont été développés en ce sens, comme le modèle du « Donut » (du nom du célèbre beignet américain troué en son milieu, Ndlr)



© V. HIRON

ENTRETIEN Sophie Dubuisson-Quellier, sociologue, membre du Haut conseil pour le climat, revient pour *CNRS le Journal* sur le concept de sobriété, ses objectifs et ses verrous.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURE CAILLOCE

proposé par l'économiste Kate Raworth. Avec des limites basses, qui sont le socle minimum correspondant à la satisfaction des besoins de l'individu et à une vie décente, et des limites hautes, qui figurent le plafond à ne pas dépasser afin de préserver les ressources et l'habitabilité de notre planète. Le « suffisant » se trouverait entre ces deux limites.

La notion de *sufficiency* va bien au-delà de la gestion conjoncturelle d'une pénurie d'énergie. Elle suppose de redéfinir les niveaux de besoins et de bien-être, et pose la question des modalités à utiliser pour décider de ce qui est suffisant et de ce qui est de l'ordre du « trop ».

Les questions de sobriété, on le voit, relèvent d'un problème d'organisation sociale avant tout – une notion absente de la réflexion actuelle en France. Elles posent aussi un vrai problème de démocratie : derrière, se profile la question de la juste répartition de ressources limitées, dans des sociétés déjà profondément inégalitaires.

**+
À écouter**

« Pourquoi nous consommons tant »
conférence de Sophie Dubuisson-Quellier à Sciences Po,
sur Soundcloud : <https://tinyurl.com/6nnu2ub4>

1. Directrice de recherche au CNRS, au Centre de sociologie des organisations (CNRS/Sciences Po Paris).

En quoi les inégalités sociales sont-elles un frein à la sobriété ?

S. D.-Q. Changer de comportement suppose que les individus aient le choix entre plusieurs options. Or on sait qu'en fonction de son niveau de revenu, de l'endroit où l'on habite, les décisions que l'on prend sont en réalité extrêmement contraintes. Prendre moins sa voiture demande qu'on ait accès à des alternatives : marche, vélo, ou transports publics par exemple, ce qui est faisable en centre-ville, mais l'est beaucoup moins lorsqu'on habite en zone rurale. De même, lorsqu'on est locataire d'un logement mal isolé et doté d'un mode de chauffage dépendant des énergies carbonées, on n'a pas vraiment le choix de faire autrement. La recommandation actuelle de limiter la température à son domicile à 19 °C peut ainsi sembler pesante pour les 20 millions de personnes qui vivent dans la précarité énergétique et n'atteignent pas ces 19 °C l'hiver.

Aujourd'hui, on fait beaucoup reposer la transition énergétique sur la bonne volonté des individus. Pourtant, la recherche en sociologie montre bien que les contraintes qui pèsent sur chacun d'entre nous sont très inégales, et conditionnent fortement notre capacité à agir. C'est pourquoi les travaux sur la *sufficiency* insistent sur le fait que les dimensions de justice sociale doivent être au cœur des politiques de sobriété. Cela implique d'engager des actions structurelles comme la rénovation énergétique des bâtiments, notamment, afin que les changements de comportements soient véritablement accessibles à tous.

Au-delà de la question centrale des inégalités, comment atteindre la sobriété dans nos sociétés dites « de consommation » ?

S. D.-Q. C'est ce qui s'appelle une injonction contradictoire : on nous demande d'être sobres dans une société qui est tout entière organisée autour de l'abondance. Les gains de productivité réalisés depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale ont servi majoritairement à accroître la production, jusqu'à atteindre une situation dans laquelle les industriels ont plus de produits à offrir que de consommateurs en face. Pour écouler ces produits en surnombre sur des marchés saturés, les entreprises mettent toujours plus d'argent dans les techniques de vente – le marketing, la publicité, et plus récemment, l'intelligence artificielle – et se retrouvent à devoir produire encore plus, pour absorber ces coûts et maintenir un prix de vente abordable.

C'est un système effréné, extrêmement énergivore, qu'on ne sait pas arrêter. Introduire ici ou là un peu de sobriété ne changera pas grand-chose. D'autant que l'action publique encourage de manière récurrente cette consommation de masse : pensons aux primes à la casse sur l'automobile ou aux politiques de relance économique après le choc du Covid...

Les questions de sobriété relèvent d'un problème d'organisation sociale avant tout – une notion absente de la réflexion actuelle en France.





Allonger la durée de vie des objets, plutôt que de les jeter. C'est ce que proposent les bénévoles des « Repair cafés », comme ici à Paris.

© DARGUREA

Les efforts que chacun de nous peut faire, à son petit niveau, servent-ils à quelque chose ?

S. D.-Q. Il est important que les individus s'engagent dans la transition et qu'ils disposent d'ordres de grandeur pour le faire. Mais tout ne peut pas reposer sur eux : des petits gestes additionnés les uns aux autres ne feront jamais une lame de fond. De plus, on risque avec cette politique des petits gestes, des petits pas, de décourager par l'absence de résultats probants les personnes qui consentent déjà aujourd'hui à des efforts importants, soit par conviction, soit parce qu'elles sont soumises à des contraintes fortes. C'est le collectif qui mettra en mouvement les individus, en se donnant des objectifs clairs et des moyens pour les atteindre, pas l'inverse.

Quel est le bon niveau collectif pour agir selon vous ?

S. D.-Q. Les autorités publiques – gouvernement, collectivités territoriales – ont un rôle crucial à jouer, en agissant sur le cadre réglementaire et en montrant une direction, en planifiant et en organisant la transition. Mais d'autres niveaux d'action sont possibles, dans les entreprises et les organisations professionnelles, dans les associations de quartier, les copropriétés, etc. Chacun de ces collectifs peut réfléchir à ses usages et produire de nouvelles normes.

Dans le monde de la recherche, par exemple, nous sommes amenés à prendre régulièrement l'avion, pour assister à des colloques internationaux notamment. Est-ce à chaque chercheur de s'interroger sur ses pratiques, ou bien ne pourrait-on pas en discuter tous ensemble ? Réfléchir au niveau collectif ne signifie pas forcément édicter une règle unique pour tous : on pourrait ainsi considérer que de jeunes chercheurs en début de carrière ont davantage besoin de voyager pour rencontrer leurs pairs.

“La société ne bougera que si nous sommes sur une trajectoire collective, dans laquelle chacun prend sa juste part.”

La société ne bougera que si nous sommes sur une trajectoire collective, dans laquelle chacun prend sa juste part. Aujourd'hui, les autorités peuvent avoir l'impression que les contraintes qu'exige le changement climatique sont trop lourdes pour les individus ; mais en réalité, certains groupes sociaux, comme les agriculteurs, sont déjà dans des situations difficiles et ont besoin dès maintenant de ce changement collectif.

Sur cette question du changement climatique et de la nécessaire transition qu'il implique, on entend beaucoup les climatologues, et beaucoup moins les chercheurs en sciences sociales...

S. D.-Q. C'est vrai que nous sommes encore trop peu sollicités. Aujourd'hui, et c'est un énorme paradoxe, c'est aux climatologues que l'on pose les questions du changement social. Or s'ils sont très désireux d'impulser ce changement, ils n'ont pas forcément les outils conceptuels pour cela.

Les sciences du climat ont permis de comprendre les mécanismes et les impacts du changement climatique, mais

ce changement climatique est dû aux formes matérielles et institutionnelles qu'ont prises nos organisations économiques : au caractère central qu'y tient le recours aux énergies fossiles, à la façon dont sont organisés les circuits financiers, aux choix d'aménagement des villes et des systèmes de transport, ou encore au mode de définition de nos objectifs de prospérité.

La transition passe par des changements profonds de nos organisations économiques, politiques et sociales, et nous avons besoin des sciences sociales – sociologie, science politique, économie, anthropologie... – pour la faire. ■

PIB et transition écologique sont-ils compatibles ?

Alpha et Oméga des politiques économiques depuis l'après-guerre, le PIB permet-il de répondre aux objectifs de la transition écologique ? Pour certains économistes, cet indicateur strictement monétaire ne prendrait pas en compte les « irréversibilités » que sont les dommages à l'environnement.

PAR LAURE CAILLOCE

Difficile d'imaginer nos économies contemporaines sans leur boussole : le Produit intérieur brut (PIB) et sa fameuse croissance, scrutée année après année par les gouvernements de la planète entière. De plus en plus de voix s'élèvent cependant pour questionner la pertinence de cet indicateur face aux défis de la transition environnementale : le PIB, qui a accompagné les Trente Glorieuses et une croissance basée essentiellement sur les énergies fossiles, peut-il aujourd'hui permettre de lutter contre les émissions de gaz à effet de serre et l'érosion de la biodiversité ? Faut-il l'améliorer, le compléter, voire le remplacer par des indicateurs plus efficaces ?



Le PIB n'est pas un totem intangible, affirme Florence Jany-Catrice, économiste au Centre lillois d'études et de recherches sociologiques et économiques¹, qui rappelle que sa création est relativement récente. « C'est à l'économiste américain Simon Kuznets qu'on attribue la paternité, au début des années 1930, d'un prototype de PIB appelé à l'époque "revenu national", explique-t-elle. Simon Kuznets répondait alors à une demande du gouvernement des États-Unis – celui-ci n'avait pas réussi à anticiper la crise financière de 1929, et voulait disposer d'un indicateur permettant de mesurer la santé économique du pays. » Kuznets a construit un indicateur agrégé, qui additionnait revenus agricoles et industriels, et excluait une partie des activités de services jugées improductives.

Le PIB tel que nous le connaissons aujourd'hui n'a vraiment émergé qu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale, au moment où les systèmes de comptes nationaux ont été créés. « Le PIB a été imaginé pour accompagner les politiques publiques de reconstruction sur une base industrielle et marchande, rappelle Florence Jany-Catrice. Les fortes croissances enregistrées en France lors des Trente Glorieuses sont fortement liées à ce contexte. » Il a d'ailleurs fait l'objet de nombreux changements au fil des ans, intégrant par exemple en 1977 les services rendus par les administrations publiques qui en étaient jusqu'alors exclus, comme les soins médicaux ou l'enseignement, parce que rendus sur une base non marchande.

« Ce n'est que dans les années 1980/1990 que, d'indicateur de moyens, le PIB est devenu un indicateur de finalité, précise l'économiste. Aujourd'hui, les gouvernements ont pour principal objet d'accroître le PIB, c'est devenu un projet de société. » Mais est-ce une logique compatible avec une société plus sobre en carbone et en ressources naturelles ?

Un « PIB vert », mythe ou réalité ?

S'agissant des émissions de carbone, « leur lien avec le PIB a été formalisé dès 1993 par le Japonais Kaya dans l'équation du même nom », rappelle Patrick Criqui, économiste au Laboratoire d'économie appliquée de Grenoble². Celle-ci définit les émissions de CO₂ en un produit de plusieurs ratios, et donne une première idée des leviers d'action possibles. La décomposition s'effectue comme suit : les émissions de CO₂ d'un pays sont le produit de l'intensité en CO₂ des énergies utilisées, de la quantité d'énergie par unité de PIB, du PIB par habitant et du nombre total d'habitants.

$$CO_2 = \frac{CO_2}{\text{énergie}} \times \frac{\text{énergie}}{PIB} \times \frac{PIB}{\text{population}} \times \text{population}$$

« La quantité d'énergie par unité de PIB (énergie/PIB) a déjà considérablement diminué en France ces cinquante dernières années, mais reste un levier clé pour la réduction des émissions. Cela passera par des équipements plus performants et davantage de sobriété énergétique dans notre vie quotidienne, commente l'économiste. L'intensité en CO₂ des énergies utilisées (CO₂/énergie), elle, ne pourra baisser qu'en recourant massivement aux énergies décarbonées. » Si Patrick Criqui évoque les limites du PIB « qui ne prend pas en compte les effets négatifs sur



Salon de l'automobile de Paris, en 1956.

l'environnement », il plaide pour garder ce « thermomètre de l'économie », aussi imparfait soit-il, à condition de le combiner avec d'autres indicateurs environnementaux et sociaux.

« Le PIB est un indicateur lié à une conjoncture bien particulière – l'après Seconde Guerre mondiale et la reconstruction. Il est de plus très lié aux énergies fossiles. L'imaginaire de "croissance infinie" qu'il véhicule ne correspond pas à la trajectoire de soutenabilité sur laquelle nous devons nous engager », insiste pour sa part Florence Jany-Catrice. Et pour cause : le PIB comptabilise des flux – en l'occurrence, les revenus dégagés par les activités économiques sur une année donnée –, et non des stocks. Or c'est en stocks que les limites planétaires s'expriment : surface forestière, taille des populations d'insectes ou d'oiseaux, stocks de poissons dans l'océan, stocks encore de ressources minérales... « Tous ces stocks ont permis une croissance économique folle durant les révolutions industrielles et l'après-guerre, rappelle Florence Jany-Catrice. Or aujourd'hui, on dispose de très peu d'indicateurs de stocks, et les systèmes productifs intensifs conduisent à l'épuisement du patrimoine écologique de manière irréversible. »

Sur les neuf limites planétaires définies en 2009 par une équipe de vingt-six chercheurs internationaux (érosion de la biodiversité, acidification des océans, pollution chimique, eau douce, etc.), six sont déjà dépassées. « Que se passera-t-il lorsqu'il n'y aura plus d'insectes pour polliniser les fleurs ? », interroge cette économiste, qui porte un regard critique sur la possibilité d'un « PIB vert » qui concilierait croissance économique et finitude de la planète. « Défini à la fin des années 1980,

1. Unité CNRS/Université de Lille 2. Unité CNRS/Inrae/Univ. Grenoble-Alpes. 3. Du nom des prix Nobel d'économie Amartya Sen et Joseph Stiglitz et du directeur de l'Office français de la conjoncture économique de l'époque, Jean-Paul Fitoussi.

le concept de "PIB vert" défend l'idée que la croissance économique peut permettre de déployer les moyens d'inventer les outils technologiques qui conduiront à régler le problème écologique. Cela repose sur une croyance extrême dans ce que les économistes appellent le "progrès technique", qu'il convient d'interroger. »

L'impasse du tout-monétarisation

La bataille fait rage, aujourd'hui, autour des indicateurs qui pourraient suppléer le PIB. Au niveau international, le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) produit notamment l'Indice de richesse inclusive (*Inclusive Wealth Index* ou IWI), qui calcule capital humain, capital écologique et économique.

Problème, selon la chercheuse : comme le PIB, l'IWI est un indicateur strictement monétaire. « Lorsqu'on utilise le langage de la monétarisation pour quelque chose qui n'a pas de prix, la qualité de l'air ou de l'eau par exemple, on est dans un imaginaire où il y a toujours une solution aux dégradations, avertit l'économiste. La monétarisation ne permet de penser ni l'impossible substituable des dimensions, ni les irréversibilités. »

Le tout-monétarisation peut même déboucher sur des résultats aberrants : William Nordhaus, économiste lauréat du prix de la Banque de Suède en 2018, l'équivalent du Nobel d'économie, a ainsi pu affirmer que le niveau optimal de réchauffement climatique, c'est-à-dire la température à laquelle les coûts et les bénéfices liés au réchauffement s'équilibraient, était de 4 °C...

Aussi louables soient-ils, les 17 objectifs de développement durable mis au point par l'ONU, et leurs 232 indicateurs, semblent quant à eux impossibles à mettre en place pour servir de boussole aux dirigeants d'un pays, quel qu'il soit.

“Lorsqu'on utilise le langage de la monétarisation pour quelque chose qui n'a pas de prix, comme la nature, on est dans un imaginaire où il y a toujours une solution aux dégradations.”

« Il faut pouvoir disposer d'un tableau de bord compact pour piloter un État », affirme Patrick Criqui, qui signale : « déjà, en 2009, les recommandations du rapport Stiglitz-Sen-Fitoussi³ commandé par Nicolas Sarkozy et consacré à la mesure de la performance économique et du progrès social, ne disaient pas autre chose. »

D'autres pistes sont à l'étude. Le stock de carbone disponible est l'un des indicateurs possibles, pour Florence Jany-Catrice et Patrick Criqui, à l'international comme en France. « Il y a depuis de nombreuses années déjà en France une stratégie nationale bas carbone, les feuilles de route existent, rappelle ce dernier. Le gros problème, c'est comment on inscrit

cette feuille de route dans la réalité...

Sur ce point, on constate toujours un écart entre les discours des autorités et les transformations effectives, alors qu'il faut décarboner en profondeur nos systèmes socio-techniques. »

La croissance en question

« Au niveau des territoires, j'ai développé des indicateurs de santé sociale et de santé écologique qui reposent sur plusieurs dimensions, raconte Florence Jany-Catrice, qui consacre depuis vingt ans ses travaux aux nouveaux indicateurs de richesse. J'y intègre l'occupation des sols, la biodiversité à travers par exemple l'inventaire des Znieff, les zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique... » La chercheuse reconnaît cependant qu'il reste un gros travail d'inventaire à faire pour appréhender notre patrimoine naturel dans sa globalité. « Le carbone, on le quantifie, ça va encore. Mais dès qu'il s'agit de qualitatif, comme avec la biodiversité, c'est plus compliqué... »

« Avec la question du climat et de la transition écologique, nous sommes devant un mur qui nous impose une transformation extrêmement profonde et brutale de tout notre système socio-technique, formule Patrick Criqui. Il faut arriver à une transformation totale en moins de trente ans, ce qui n'a jamais été fait avant. Cela sera extraordinairement difficile. »

Face à ce mur, la croissance du PIB ne peut plus être l'unique objectif, selon Patrick Criqui, qui affirme que les économistes ont depuis longtemps abandonné l'idée d'une croissance forte et infinie. « Toutes les projections internationales intègrent l'idée selon laquelle il y aura un ralentissement du PIB, parce que la croissance démographique se tasse dans les pays émergents, parce que les gains de productivité ne progressent plus, parce que le rattrapage de l'économie chinoise touche à sa fin... »

« On commence à voir des travaux en macroéconomie qui réfléchissent au concept de stagnation (aussi appelée économie stationnaire, NDLR), », ajoute Florence Jany-Catrice, qui rappelle à toutes fins utiles : « zéro croissance, ça ne veut pas dire qu'on ne produit plus rien, cela veut seulement dire que l'on ne produit pas plus que l'année précédente. » II



Manifestation des agents de l'Office national des forêts (ONF) en 2017.

© NICOLAS TAVERNIER/REA

Transition bas carbone: un plan ambitieux pour le CNRS

Suite à un premier bilan des émissions de gaz à effet de serre, un plan de transition bas carbone a été lancé au CNRS. Les premières actions concernent quatre thématiques : achats, numérique, mobilité et énergie.

PAR SOPHIE FÉLIX



Dans les salles blanches, comme ici au sein de la centrale NanoRennes de l'IETR, des équipements souvent énergivores doivent réguler la température, la pression et le taux d'humidité, et limiter tout ce qui pourrait altérer les substances manipulées, comme la poussière.

Pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 degré d'ici 2100, il faut atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Les accords de Paris ont ainsi fixé l'objectif de diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) de 40 % d'ici 2030. « *La recherche a un double rôle à jouer : celui de proposer des solutions bien sûr, mais aussi d'adopter elle-même des pratiques compatibles avec cet objectif* », assure Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS. En tant qu'acteur majeur de la recherche sur le climat en France et dans le monde – il est le premier contributeur des contenus scientifiques des rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) –, « *le CNRS doit être exemplaire sur ce qui constitue la responsabilité sociale d'une institution* », ajoute-t-il.

Un bilan pour identifier les leviers d'action

Dans un premier temps, l'organisme a réalisé son bilan des émissions de gaz à effet de serre (BGES), comme l'exige la stratégie nationale bas-carbone pour les établissements publics tous les trois ans. « *Au sein du CNRS, ce BGES a été conçu comme une véritable démarche de l'établissement mobilisant de nombreux acteurs afin d'estimer l'ensemble des leviers possibles pour diminuer nos émissions* », raconte Blandine de Geyer, référente nationale « développement durable » au CNRS. Ce travail s'est appuyé sur la méthodologie recommandée par l'Agence de la transition écologique Ademe. La collaboration avec le groupement de recherche Labos 1point5 a été déterminante pour la partie achats : ce groupement de recherche du CNRS, soutenu par l'Ademe, Inria et Inrae, a pour ambition de fédérer la recherche française sur la question de son impact environnemental et a fourni des outils et un travail de recherche inédit sur les calculs de facteurs d'émissions.

Résultat : une photographie à un instant T, en l'occurrence l'année de référence 2019, des émissions de GES issues des activités de l'organisme, comme les déplacements domicile-travail des agents, les missions effectuées par les scientifiques dans le cadre de leurs activités de recherche (se rendre sur le terrain, participer à des colloques, etc.), et les achats nécessaires aux recherches et à la vie des laboratoires (dont la restauration).

Avec près de 2 000 éléments pris en compte, ces achats représentent 74 % des émissions de GES du CNRS. La consommation d'énergie représente 6 % des émissions, largement dominées par l'utilisation de gaz et d'électricité. Pour ce premier BGES, le CNRS a pris le parti de prioriser des périmètres sur lesquels il dispose de moyens d'action en tant qu'hébergeur, employeur ou payeur. Seuls sont donc comptés les bâtiments gérés par le CNRS – qui hébergent près de 20 000 personnes dont 8 000 permanents CNRS. Estimés via une enquête nationale menée fin 2021, les déplacements domicile-travail de l'ensemble des agents CNRS représentent 6 % des émissions totales pour 5 millions de kilomètres par semaine, soit 125 fois le tour de la Terre. L'utilisation de voitures est responsable de l'écrasante majorité de ces émissions de déplacements quotidiens. Sans surprise, les voyages en avion dominent quant à eux les émissions annuelles des missions : les 300 millions de

“La recherche a un double rôle : celui de proposer des solutions, mais aussi d'adopter elle-même des pratiques compatibles avec cet objectif.”

Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS

kilomètres parcourus par les airs représentent plus de neuf dixièmes des émissions produites par ces missions (soit 11,8 % des émissions globales), contre 0,5 % pour les 60 millions de kilomètres parcourus en train.

Ce premier bilan permet d'évaluer le volume des émissions des activités du CNRS à près de 14 tonnes équivalent carbone par an par agent en moyenne, l'objectif des accords de Paris pour une neutralité carbone étant de 2 tonnes par personne, toutes émissions comprises. « *Une des difficultés du BGES est la localisation et la disponibilité des données. Cela peut donner lieu à des incertitudes, qui sont calculées et prises en compte dans l'analyse. Ces incertitudes peuvent être liées à l'extrapolation des données disponibles ou aux facteurs d'émissions eux-mêmes*, assure Blandine de Geyer. *Le BGES est avant tout un outil permettant de mesurer les ordres de grandeur et d'évaluer les résultats entre deux exercices.* » La démarche sera optimisée pour le prochain bilan sur l'année 2022, en affinant le périmètre et en corrigeant les angles morts identifiés.

Diminuer l'impact sur l'environnement

Après l'analyse des résultats de ce premier bilan, le CNRS s'engage donc aujourd'hui dans un plan de transition bas carbone « *ambitieux et nécessaire* » selon Alain Schuhl : « *Ce plan s'inscrit dans la stratégie du CNRS qui vise à diminuer l'impact de la recherche française sur l'environnement, tout en*

La délégation régionale Occitanie Est explore diverses pistes de production d'énergie renouvelable, comme ici l'installation de panneaux photovoltaïques.



© CNRS - DÉLÉGATION OCCITANIE EST

Empreinte carbone des activités du CNRS en 2019 (en % des émissions)

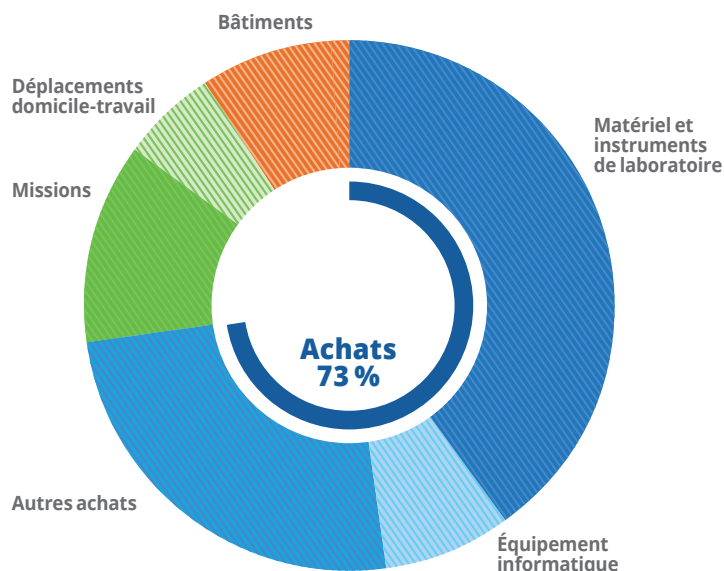
CONSOUMATIONS DES BÂTIMENTS



DÉPLACEMENTS DOMICILE-TRAVAIL



DÉPLACEMENTS EN MISSION



© CNRS + Source : BGES 2022 sur les données 2019 - Les incertitudes parfois importantes ne sont pas représentées

conservant son excellence ». Inspiré des initiatives de laboratoires ou des délégations régionales, ce plan donne un cadre national, à décliner en fonction des spécificités des contextes locaux ou des domaines de recherche. Il est appelé à évoluer en fonction des résultats mesurés, selon des indicateurs à définir, et d'éventuelles nouvelles obligations légales.

Dans un premier temps, quatre premières thématiques ont été identifiées, avec pour première étape un focus sur l'impact carbone de l'organisme : les achats, le numérique, la mobilité et l'énergie. Pour chacune, sont proposées de nombreuses pistes avec des investissements (financiers, humain, en temps) et des délais de mise en œuvre et d'impact variables (voir infographie pages suivantes).

Des axes transverses complètent ces thématiques, notamment sur la sensibilisation et la formation des agents. Un projet du CNRS et de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) figure d'ailleurs parmi les dix lauréats de l'appel à défi « innovation écoresponsable » lancé par le gouvernement en juillet dernier et va permettre d'engager des actions en ce sens. « L'objectif de ce projet commun est de proposer des outils de sensibilisation et de mobilisation "clés en main" pour les laboratoires en s'appuyant sur des dispositifs d'intelligence collective », explique Blandine de Geyer, en charge de ce projet pour le CNRS. Ces outils – fresques du climat, ateliers collaboratifs Ma terre en 180 minutes, etc. – ont pour objectif d'ouvrir des espaces de dialogue pour identifier des solutions adaptées à l'écosystème local, tout en s'inscrivant dans la

démarche nationale. Reconnaître et valoriser l'investissement des laboratoires déjà engagés est également clé pour amener le CNRS vers une trajectoire bas carbone.

En pratique, le plan de transition bas carbone sera piloté par le Comité « développement durable », présidé par Alain Schuhl, en lien avec le réseau de référents mis en place au sein des directions fonctionnelles, délégations régionales, instituts et laboratoires, autour de la référente nationale. Ces référents doivent accompagner la démarche de transition

bas carbone au plus près des unités. « Les initiatives locales sont nombreuses, pertinentes et importantes, rappelle Alain Schuhl. Concevoir un cadre national était aussi une demande des agents. »

Une question d'éthique

Plus largement, les questions environnementales sont au cœur de la réflexion de l'organisme sur ses pratiques : est-il même possible de poursuivre simultanément un objectif de sobriété et une production de connaissances au meilleur niveau mondial ? Le Comité d'éthique du CNRS a été saisi de la question. « De nombreux collectifs

de scientifiques s'interrogent sur le rôle de la recherche au regard des défis environnementaux. Le sujet clive, au minimum inquiète », indique sa présidente Christine Noiville. Publié en décembre 2022, le rapport du Comets conclut que le monde de la recherche a la responsabilité de limiter les impacts environnementaux de ses activités.

« La crise environnementale conduit aujourd'hui à affirmer que la prise en considération de l'environnement constitue une condition d'une recherche responsable, et donc une composante

“La prise en considération de l'environnement constitue une condition d'une recherche responsable, et donc une composante de l'éthique de la recherche.”

Christine Noiville, présidente du Comets

de l'éthique de la recherche », résume Christine Noiville. Le Comets recommande ainsi de mieux mesurer ces impacts et surtout d'ouvrir un large débat sur le sujet. Ce dialogue doit « prévenir toute stigmatisation et tout clivage » entre des communautés de recherche dont les impacts sur l'environnement sont par nature différents. Objectif : faire mieux sans entraver la liberté et la créativité du scientifique, ni le dynamisme de la recherche.

Au-delà des pratiques, il s'agit plus généralement de penser la façon dont l'activité de recherche peut, à travers les sujets abordés et les voies pour les mener, accroître autant que possible ses impacts positifs et réduire ses impacts négatifs, avérés ou potentiels, sur l'environnement. « Pour cela, il faut multiplier les programmes de recherche qui appuient cet objectif (énergies renouvelables, substituts aux substances chimiques, fiscalité environnementale...) mais aussi identifier des domaines ou disciplines délaissés qui pourraient produire des connaissances et solutions nouvelles, renforcer des ponts interdisciplinaires dans ce sens, puis transférer ces connaissances et technologies à des acteurs plus diversifiés », explique la présidente du Comets.

Renforcer l'interdisciplinarité

La Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (Miti) du CNRS a justement lancé à l'automne 2022 un nouvel appel à projet, avec l'IRD, sur le thème de la sobriété – l'utilisation de ressources avec modération – et de la frugalité,

soit l'utilisation d'un minimum de ressources. « Faire mieux avec moins, maximiser l'efficacité et rechercher l'optimum : cette réflexion a toujours été au cœur de la recherche », témoigne Martina Knoop, directrice de la Miti. L'appel concerne tout type de projets de recherche (instrumentation, méthodologie, algorithmes, protocole, modélisation, etc.), cherchant à optimiser toutes sortes de ressources, énergétiques bien sûr mais aussi numériques (partage de données), de fabrication (matières premières), spatiales, voire financières et humaines. Il doit donc amener les scientifiques à se poser des questions sur l'autonomie des dispositifs, leur robustesse, les perturbations qu'ils peuvent causer à l'environnement, etc. Et ce, sur le cycle de vie complet, de la conception au démantèlement et recyclage de l'expérience en fin de vie, en passant par la fabrication et la consommation et maintenance pendant la phase d'exploitation. Lors de l'appel précédent, lancé en 2021, avait par exemple été retenu un projet de boussole optique fabriquée à partir de matériaux à faible impact environnemental qui doit permettre de trouver son cap grâce à la lumière UV polarisée du ciel, sans GPS ni boussole magnétique, à l'image de la technique employée par les bien frugales fourmis du désert.

À travers cet appel et son plan de transition, le CNRS cherche à mobiliser au-delà de son périmètre strict, les laboratoires comptant de nombreux étudiants et personnels rattachés aux partenaires de l'organisme. « Nous comptons sur un effet de synergie, conclut Alain Schuhl. La sphère d'influence du CNRS, moteur au sein du monde de l'enseignement supérieur et de la recherche, doit être mise au service des enjeux de développement durable. » II

Radiateur du système de refroidissement du supercalculateur Jean Zay. Une convention entre le CNRS et l'EPA Paris-Saclay vise à récupérer la chaleur qu'il produit pour alimenter le réseau d'échange de chaleur et de froid du Campus urbain Paris-Saclay.



L'énergie

Les bâtiments du CNRS, qui ont consommé près de 300 GWh d'énergie finale en 2019 pour près d'un million de mètres carrés de surface, doivent diminuer leur consommation de 10 % en 2024, et atteindre -60 % en 2050, sans affecter la qualité de la recherche. Quantification fine, sensibilisation des personnels, aménagements et rénovations d'ampleurs variées, mutualisation d'équipements scientifiques énergivores, priorité aux énergies renouvelables... le CNRS s'est doté d'un plan de sobriété énergétique et lancera bientôt un appel à projets dédié.

-60%

de consommation en énergie finale pour les bâtiments du CNRS à l'horizon 2050.

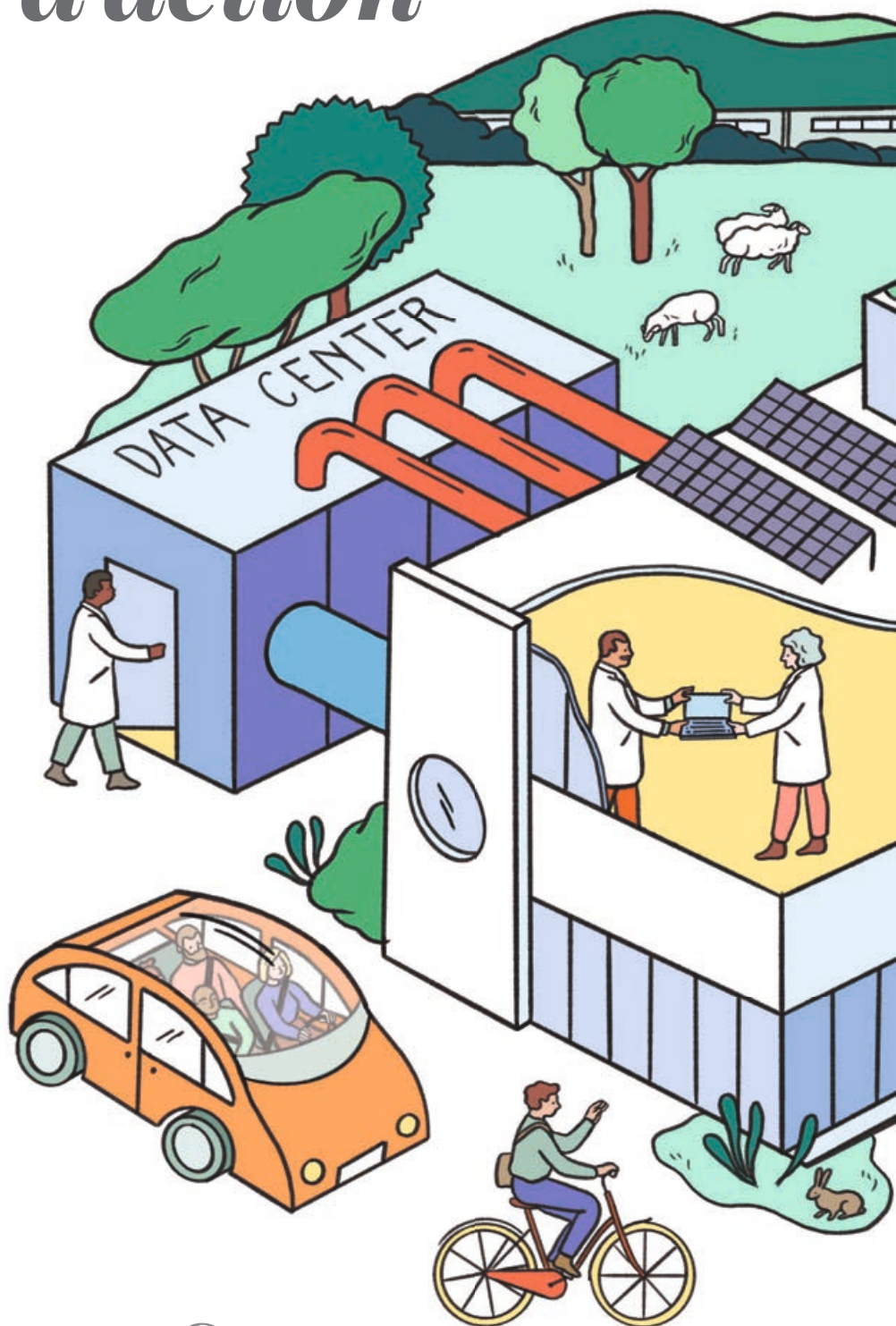
Les achats

Avec en moyenne 700 millions d'euros de dépenses annuelles, dont près de la moitié pour du matériel scientifique, les achats sont le premier poste d'émissions de GES. Deux leviers d'action existent : acheter mieux – en intégrant les dimensions environnementales et sociales dans toutes les étapes du processus d'achat – et acheter moins, notamment en développant l'économie circulaire. Le marché Matinfo pose déjà des exigences environnementales à l'achat de matériel informatique, et une bourse nationale au matériel facilite la cession ou le don d'équipement entre unités. Au sein des laboratoires, des initiatives en faveur de la mutualisation et du regroupement des achats (pour réduire les livraisons) sont également mises en place.

700 millions d'€

de dépenses annuelles, dont près de la moitié pour du matériel scientifique.

Quatre leviers d'action



12500 postes de travail

achetés chaque année par le CNRS.

Le numérique

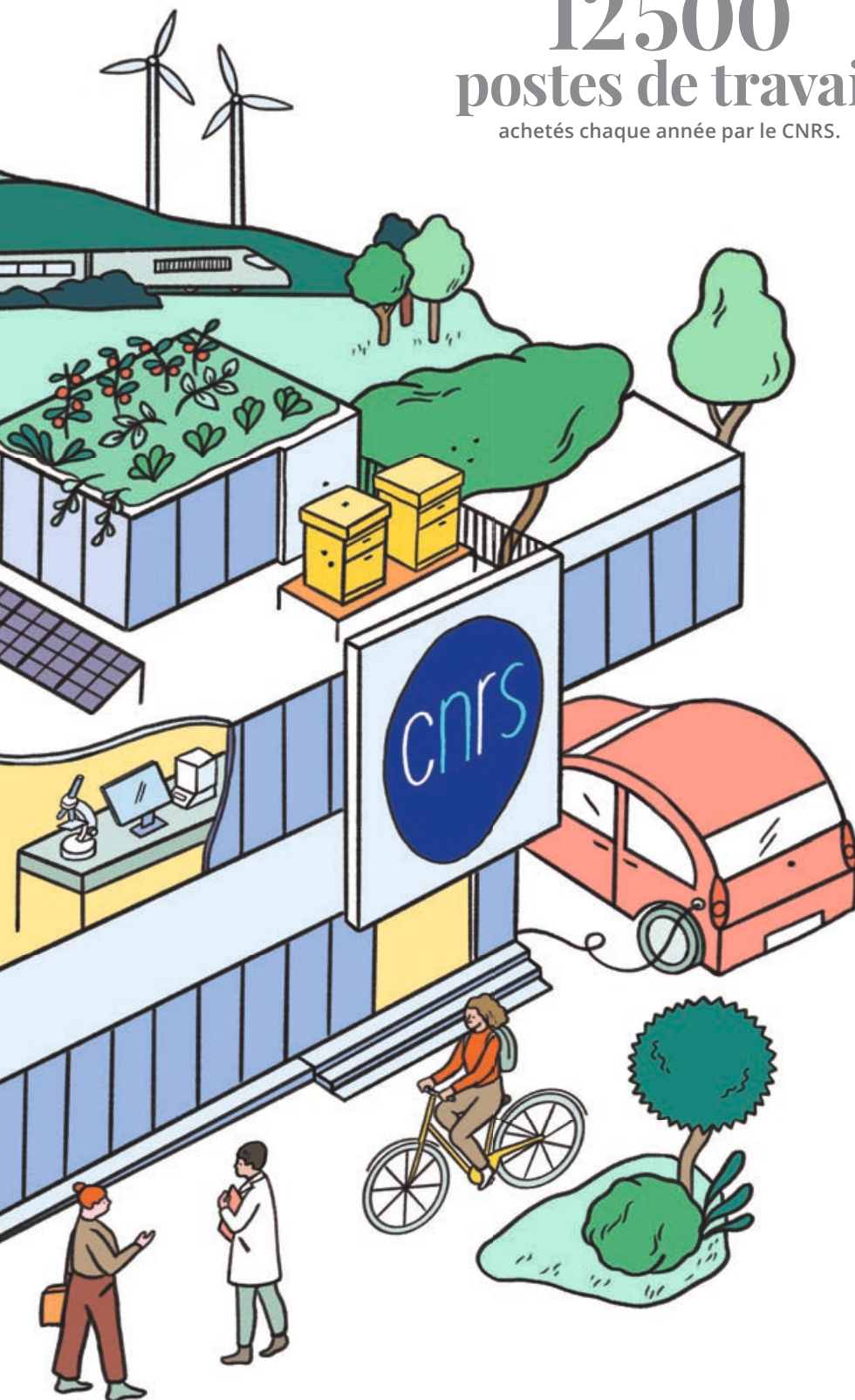
Outil de production, analyse et stockage de données, canal de communication et diffusion indispensable à la visibilité des résultats de recherche, le numérique a pourtant un impact environnemental fort : l'ensemble du cycle de vie d'un ordinateur portable émet ainsi en moyenne 162 kg équivalent CO₂. L'organisme achète l'équipement pour 12 500 postes de travail chaque année. Allonger la durée de vie du matériel, favoriser les logiciels peu consommateurs d'énergie, faciliter le réemploi et l'utilisation de matières recyclées, promouvoir des centres de données et des réseaux moins énergivores font partie des actions proposée par le Groupement de service Ecolinfo dans son guide de bonnes pratiques numérique responsable pour les organisations.

La mobilité

Cinq millions de kilomètres sont parcourus chaque semaine par les agents du CNRS entre leur domicile et leur lieu de travail. Pour réduire les émissions de GES, majoritairement dues à l'utilisation de la voiture, des actions en faveur du covoiturage, des mobilités douces et du télétravail existent et doivent être renforcées. Pour les missions professionnelles, plusieurs pistes sont avancées : localiser les événements dans des sites accessibles en train et en transport en commun, privilégier les visioconférences, etc. Prendre l'avion – source majoritaire de ces émissions – n'est déjà plus possible si un train permet d'effectuer le même trajet en moins de quatre heures. Un outil d'auto-évaluation des déplacements facilitera bientôt la prise de décision individuelle et collective, les objectifs de réduction devant tenir compte notamment des activités de recherche et du développement des carrières.

5 millions de km

parcours chaque semaine par les agents du CNRS entre leur domicile et leur lieu de travail.



Des muons en Islande



1. Islande, volcan Snæfellsjökull, face sud. C'est là que Jules Verne situe l'entrée de son célèbre *Voyage au centre de la Terre*, récit fictionnel publié en 1864. Mais aujourd'hui, pour les chercheurs, il s'agit surtout d'un site capital pour l'étude de la volcanologie et de la glaciologie.

MATIÈRE

TERRE

On vous emmène au pied du Snaefellsjökull, un volcan islandais cher à l'écrivain Jules Verne mais aussi aux chercheurs de l'Institut de physique des deux infinis (IP2I). Leur objectif ? Obtenir des images des entrailles du volcan. Et ainsi suivre en direct sa dynamique et l'évolution de l'épaisseur de son glacier. Embarquement avec le physicien Jacques Marteau, lauréat de la médaille de l'innovation 2022 du CNRS, qui utilise une technique innovante d'imagerie de l'intérieur des structures : la muographie.

TEXTES PAR JACQUES MARTEAU¹ ET LA RÉDACTION
PHOTOS © CAROL MÜLLER / CNRS PHOTOTHÈQUE



1. Jacques Marteau est physicien à l'IP2I (CNRS/Université Claude Bernard Lyon 1), à l'origine de la création de la start-up Muodim en 2021. Son équipe a réalisé plusieurs missions au dôme de la Soufrière, en Guadeloupe, et équipé de détecteurs plusieurs tunneliers du Grand Paris express pour aider leur avancement en phase de creusement.

2.

Avant de s'y rendre, les scientifiques de l'IP2I, à Lyon, mettent la dernière main à leur détecteur de muons. Ces particules sont produites naturellement dans l'atmosphère. Et la lumière qu'ils induisent en traversant les épaisseurs de matière permet d'obtenir des images de l'intérieur des structures, comme le font les rayons X en imagerie médicale. Le détecteur est ici dûment testé pour éviter toute perte de données lors de la mission.



3. Fin prêt, le détecteur a été expédié en Islande avec l'aide précieuse de scientifiques islandais. Avant sa mise en place, Jacques Marteau et Jean-Christophe Ianigro de l'IP2I assemblent ici les plans de détection du « trajectographe à muons » sur une structure métallique.

4.

Une fois monté, le détecteur doit encore être calibré. La procédure est ici effectuée sur la base Malarrið, au cœur du parc national du Snæfellsjökull. Pour cela, le détecteur est pointé au zénith afin de mesurer le flux de particules sans obstacle à leur propagation. Cette valeur de référence, spécifique à ce lieu – sa latitude, son altitude, ses conditions atmosphériques, etc. – permettra d'éviter de futures erreurs d'interprétation des données.

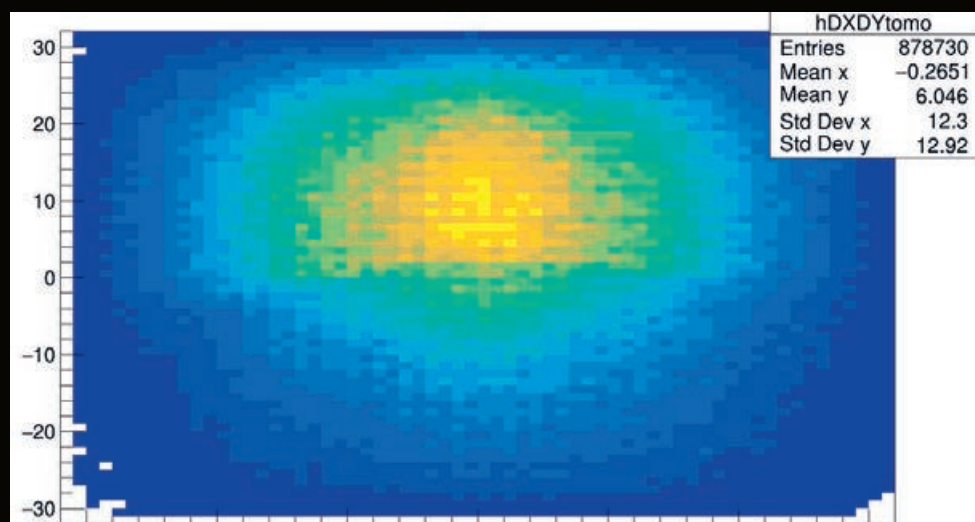
5.

Assemblé et calibré, le détecteur de muons est recouvert d'une bâche pour l'abriter des pluies et des vents intenses. Il est prêt pour commencer le suivi temporel de la dynamique du volcan et de l'évolution de l'épaisseur de son glacier. D'abord placé dans une position éloignée, pour réaliser une image test, il sera ensuite rapproché de la cible pour obtenir une meilleure résolution.





6. Le détecteur, solidement amarré, pointe vers le sommet du volcan Snaefellsjökull. La distance au sommet est d'environ 6 kilomètres, ce qui permet de visualiser à la fois les entrailles du volcan, son sommet et le ciel pour effectuer les corrections dynamiques des images.



7. Sur cette première « image » obtenue grâce au détecteur, la partie du bas correspond à l'ombre du volcan, tandis que, derrière celui-ci, la forme jaune donne une impression de soleil couchant. L'image montre l'acceptance du détecteur, c'est-à-dire l'ensemble des trajectoires de muons qui se trouvent dans son champ de visée. Elle est la « première brique » du travail de génération des nombreuses images à reconstruire.

8. Le glacier sommital du volcan, au point le plus élevé, dont l'épaisseur maximale ne dépasse plus 200 mètres, sera l'enjeu d'une deuxième phase de mesures. La fonte du glacier est en effet précipitée par le changement climatique, rendant son accès difficile, voire dangereux. Or, la muographie permet de localiser à distance la frontière glace-roche et d'en déduire l'épaisseur de glace résiduelle et son évolution en fonction du temps.



9.

Pour ces mesures sur le glacier sommital, il faudra acheminer le matériel en altitude sur un terrain réservant parfois des surprises, comme cette baraque de téléski désaffectée qui servira d'arrimage au détecteur. Peu de chance en revanche de tomber sur l'entrée du centre de la Terre décrite par Jules Verne dans son roman du XIX^e siècle !





Objectif Jupiter

UNIVERS

ASTROPHYSIQUE Juice, la première mission spatiale vers Jupiter menée par l'Europe, doit décoller en avril. Une mission d'ampleur pour explorer la géante gazeuse et ses lunes glacées.

PAR SOPHIE FÉLIX

Jupiter, monde de tous les superlatifs. L'engouement pour la planète la plus imposante de notre Système solaire, hôte des plus grandes tempêtes, entourée des plus grands satellites naturels, a été relancé en 2016 avec l'arrivée de la sonde Juno qui nous a livré depuis de nouvelles images spectaculaires, et de nouveaux résultats... qui posent de nouvelles questions. C'est pour tenter d'y répondre qu'une nouvelle sonde, Juice, pour « *Jupiter icy moons explorer* », sera lancée en avril.

Géante gazeuse et lunes humides

Menée par l'Agence spatiale européenne (ESA) avec la participation des agences américaine (Nasa) et japonaise (Jaxa), et impliquant plusieurs laboratoires du CNRS, Juice doit arriver dans le système de Jupiter vers juillet 2031, après plusieurs survols de la Terre et de Vénus, et la toute première manœuvre d'assistance gravitationnelle impliquant à la fois la Terre et la Lune. Pendant au moins trois ans, elle étudiera la géante gazeuse – son atmosphère turbulente, sa fameuse grande tache rouge, son champ magnétique, ses anneaux – et trois de ses principales lunes, dites « galiléennes », Europe, Callisto et surtout Ganymède.

L'un des cyclones circumpolaires nord de Jupiter (image en fausses couleurs créée à partir des données brutes fournies par Juno).

© NASA / SWRI / MSSS / NAVANEETH KRISHNAN 5 (CC BY)

« Une caractéristique originale des trois lunes glacées de Jupiter est la possible présence d'eau liquide, à quelques kilomètres sous la glace pour Europe, plus profondément pour les autres », s'enthousiasme déjà Olivier Grasset, du Laboratoire de planétologie et géosciences¹, qui a porté la proposition de mission auprès de l'ESA. Mais pas question de chercher de petits hommes gris ! Si Juice est équipée pour détecter la présence éventuelle de certaines molécules organiques, sa mission est plutôt de déterminer si les satellites joviens présentent des caractéristiques physiques propices à l'éventuelle apparition de la vie : confirmer la présence d'océans liquides, en calculer la profondeur, la dynamique, évaluer les champs magnétiques, les sources d'énergie, la stabilité des environnements.

Elle survolera vingt-et-une fois Callisto et deux fois Europe, qui sera étudiée en détail par la mission spatiale Europa Clipper, menée cette fois-ci par la Nasa. La cible principale restera cependant Ganymède, la plus grande – plus imposante que Mercure – et l'un des seuls corps solides du Système solaire à posséder son propre champ magnétique. Après douze survols, Juice se mettra en orbite autour de Ganymède en décembre 2034 et y restera pendant neuf mois. Une première pour un satellite autre que la Lune.

Comprendre la diversité jovienne

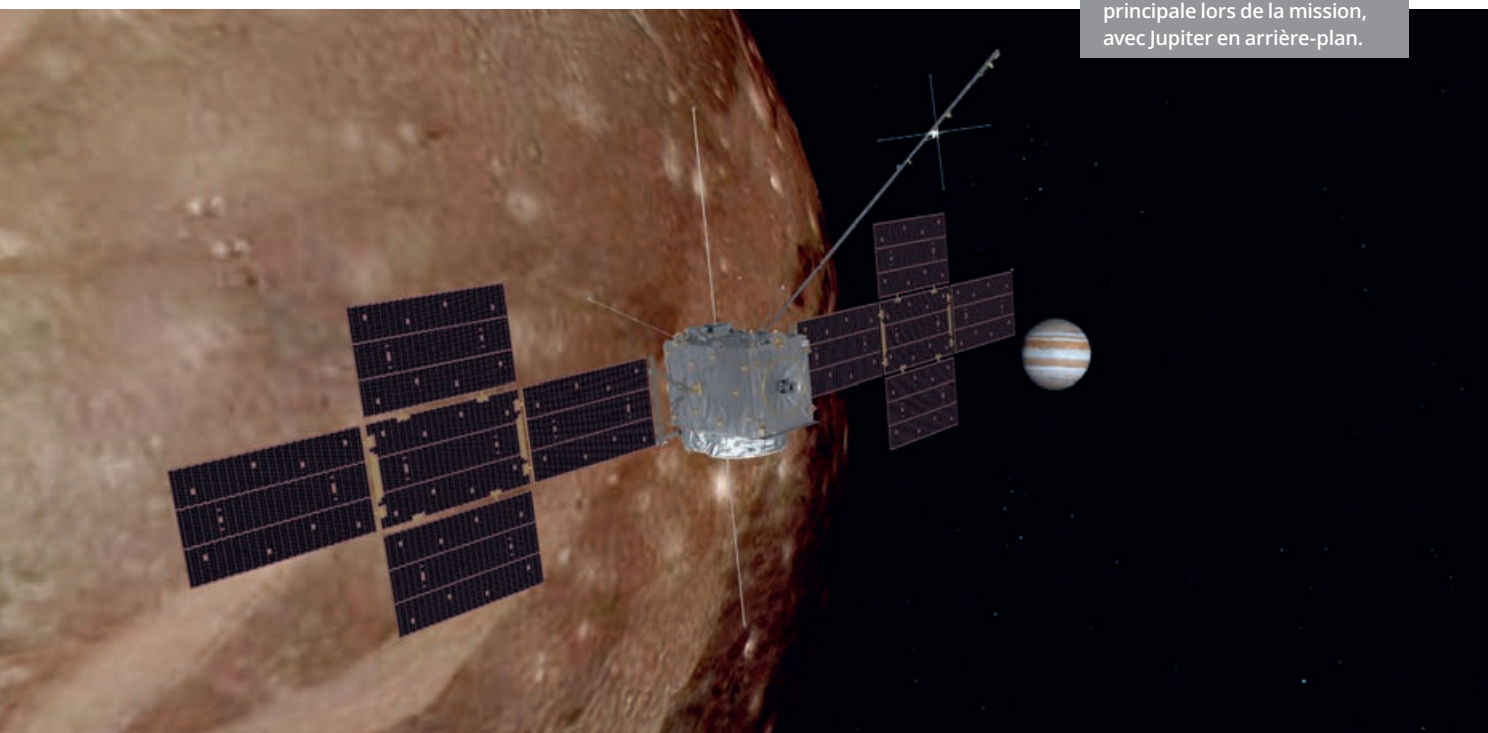
« C'est la diversité des objets qui nous intéresse », explique Olivier Grasset. Des jeunes surfaces d'Europe aux vieux cratères de Callisto – qui aurait la surface la plus vieille de notre Système solaire, témoin des premiers instants du système jovien –, en passant par le fort volcanisme rocheux de Io ou la surface lunaire de Ganymède, chaque lune est un monde à part.

Pourtant toutes sont nées dans un environnement similaire. Explorer cette diversité et découvrir comment la planète géante et ses satellites se sont formés et ont évolué donnera de précieux indices pour mieux comprendre les milliers d'exoplanètes découvertes en trente ans.

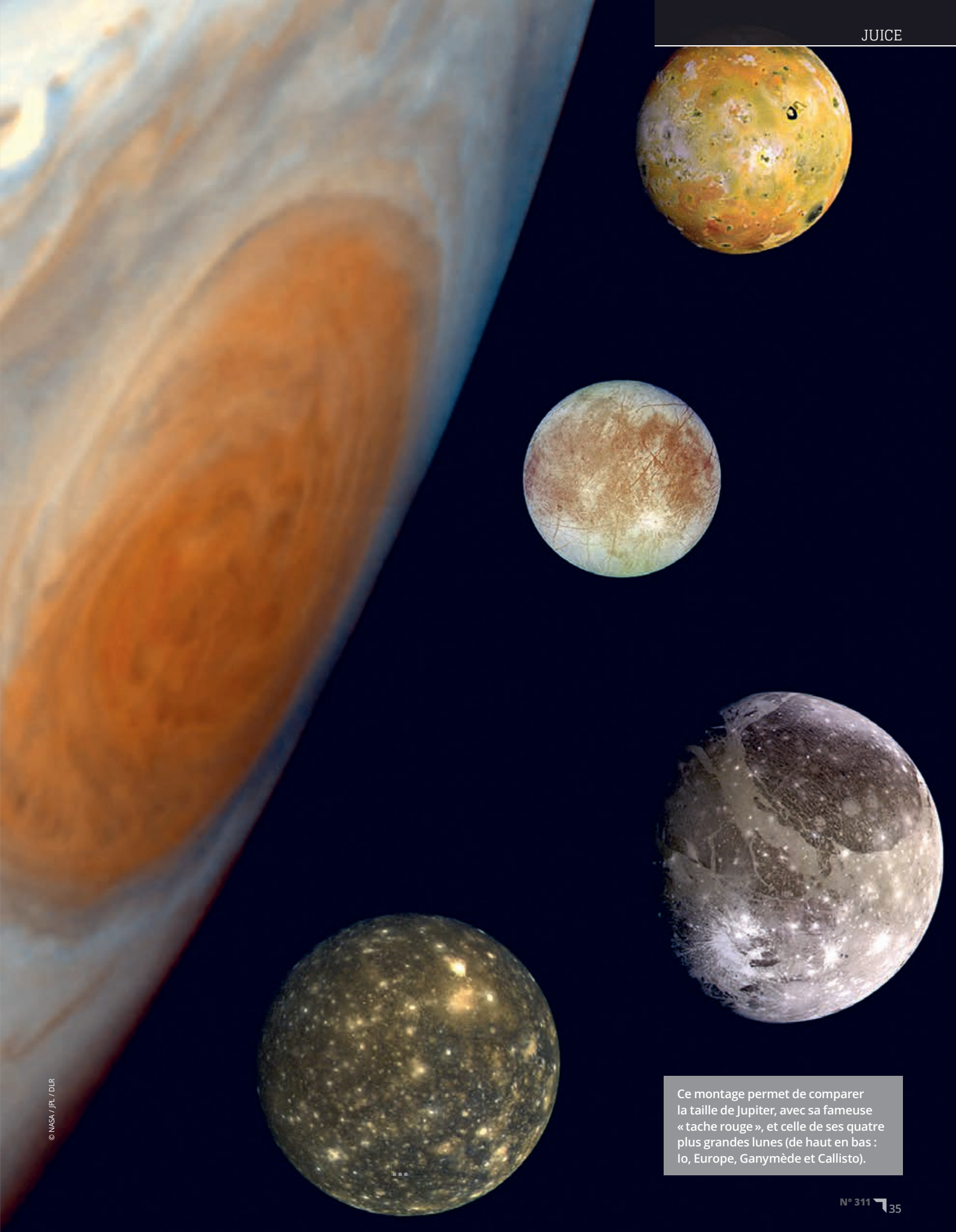
“Une caractéristique originale des trois lunes glacées de Jupiter est la possible présence d'eau liquide, à quelques kilomètres sous la glace pour Europe, plus profondément pour les autres.”

Pour cela, la sonde emporte dix instruments scientifiques. L'un d'eux est à responsabilité scientifique et technique française : le spectromètre-imageur Majis, pour « *Moons and Jupiter imaging spectrometer* », dont le Cnes a la maîtrise d'ouvrage et l'Institut d'astrophysique spatiale² (IAS) situé à Orsay la maîtrise d'œuvre, avec une forte contribution instrumentale de l'Italie. ...

Vue d'artiste de la sonde Juice devant Ganymède, sa cible principale lors de la mission, avec Jupiter en arrière-plan.



1. Unité CNRS/Nantes Université/Université d'Angers. 2. Unité CNRS/Université Paris-Saclay.



Ce montage permet de comparer la taille de Jupiter, avec sa fameuse « tache rouge », et celle de ses quatre plus grandes lunes (de haut en bas : Io, Europe, Ganymède et Callisto).

L'instrument analysera la lumière solaire réfléchie ou l'émission thermique propre des objets qu'il observera, cela dans 1 280 longueurs d'onde, du visible à l'infrarouge. Parmi ses objectifs : déterminer les caractéristiques physico-chimiques de la surface glacée des satellites visités. La composition chimique de cette surface dépend de deux paramètres principaux qu'il faut discriminer pour mieux les comprendre : la structure interne de la lune, en particulier l'éventuel océan d'eau liquide ; et l'interaction avec la ceinture de radiation de Jupiter qui, sur le temps long, peut altérer en profondeur la composition de la glace. « *L'idéal serait de trouver des terrains jeunes dont la composition serait peu modifiée, afin de caractériser l'océan souterrain sans ambiguïté* », rêve François Poulet, astronome à l'IAS et responsable scientifique de l'instrument.

Magnétosphères extraterrestres

Pour aider à cette caractérisation, d'autres instruments seront mis à contribution, notamment pour mesurer l'influence du champ magnétique de Jupiter sur les lunes et, réciproquement, le rôle des satellites galiléens sur l'activité de la magnétosphère de la planète géante. Par exemple, l'activité volcanique de Io injecte environ une tonne de particules ionisées par seconde dans la magnétosphère de

Jupiter : ces particules y sont accélérées et sont responsables d'une partie des aurores observées sur Jupiter. Ganymède présentant son propre champ interne lié aux caractéristiques de son océan, les interactions entre les deux champs seront aussi scrutées grâce aux mesures radio du *Radio and plasma wave instrument* (RPWI). « *Les capacités de mesure de notre instrument sont inédites dans le système de Jupiter, assure Baptiste Cecconi, astronome à l'Observatoire de Paris-PSL et responsable d'un sous-système de RPWI. C'est une nouvelle étape de l'exploration du système jovien.* »

Le champ magnétique interne de Jupiter est le plus intense de toutes les planètes : plus de vingt fois plus puissant que le champ terrestre. Il est fortement dissymétrique, s'étendant sur 5 millions de kilomètres en direction du Soleil et formant, de l'autre côté, une longue queue de 700 millions de kilomètres qui traverse l'orbite de Saturne. Expliquer son comportement permettrait d'entrevoir ce qu'il se passe à l'intérieur de la planète.

Percer les mystères de l'atmosphère de Jupiter

Plusieurs appareils sonderont aussi les différentes couches de l'atmosphère de Jupiter, pour en saisir la composition, la structure et la dynamique. Constituée principalement d'hydrogène et d'hélium, deux gaz très légers, cette atmos-

Image de Ganymède et de son aspect lunaire prise le 7 juin 2021 par la JunoCam de la sonde Juno.

© NASA / JPL-CALTECH / SWRI / MSSS / KALLEHEIKKI KANNISTO



phère est très étendue. Si l'on descendait vers le cœur de la planète, on s'enfoncerait dans un fluide de plus en plus épais sans rencontrer de surface solide, mais nous subirions peut-être des orages impressionnants avec des vents jusqu'à 150 m/s au niveau de la couche nuageuse et de la grêle d'ammoniaque plus en profondeur.

La circulation atmosphérique, très complexe et variable selon l'altitude, reste mal connue : comment la grande tache rouge – plus large que la Terre – se maintient-elle depuis trois cents ans ? pourquoi sa taille diminue-t-elle depuis un siècle ? mesure-t-on effectivement la grêle prévue par les modèles ? quel régime de vents au-dessus des nuages ? et qu'est-ce qui provoque des vents aussi extrêmes ? les mouvements observés en surface, notamment via les célèbres bandes colorées qui traduisent la présence de divers composés chimiques dans les nuages, se prolongent-ils à l'intérieur de la planète ?

Juice devrait apporter des éléments de réponse grâce à la précision inédite de ses instruments de télédétection. « Nos détecteurs parviennent à un rythme de 4 spectres par milliseconde, ce qui est 10 000 fois plus important que l'instrument équivalent sur la sonde Galileo dans les années 1990. Une vraie révolution ! » précise Yves Langevin, responsable scientifique de Majis de 2013 à 2019 et aujourd'hui directeur de recherche CNRS émérite à l'IAS. La résolution spatiale sera aussi impressionnante : de moins de 100 mètres à quelques kilomètres lors des survols des satellites et jusqu'à 125 km/pixel pour Jupiter.

Un défi d'ingénierie

Ces résultats sont le fruit du travail d'ingénierie mené à l'IAS où les scientifiques s'efforcent de reproduire toute la complexité des conditions de vol. « *Jupiter cumule les difficultés* », résume Cydalise Dumesnil, ingénieure au CNRS et responsable technique de Majis : les panneaux solaires, bien que d'une surface de 85 m², fournissent une puissance limitée,



La caméra de l'instrument Majis, en préparation à l'Institut d'astrophysique spatiale à Orsay.

© NASA / JPL-CALTECH / SWRI / UVS / STSCI / MODIS / WIC / IMAGE / BERTRAND BONFOND, UNIV. DE LIÈGE

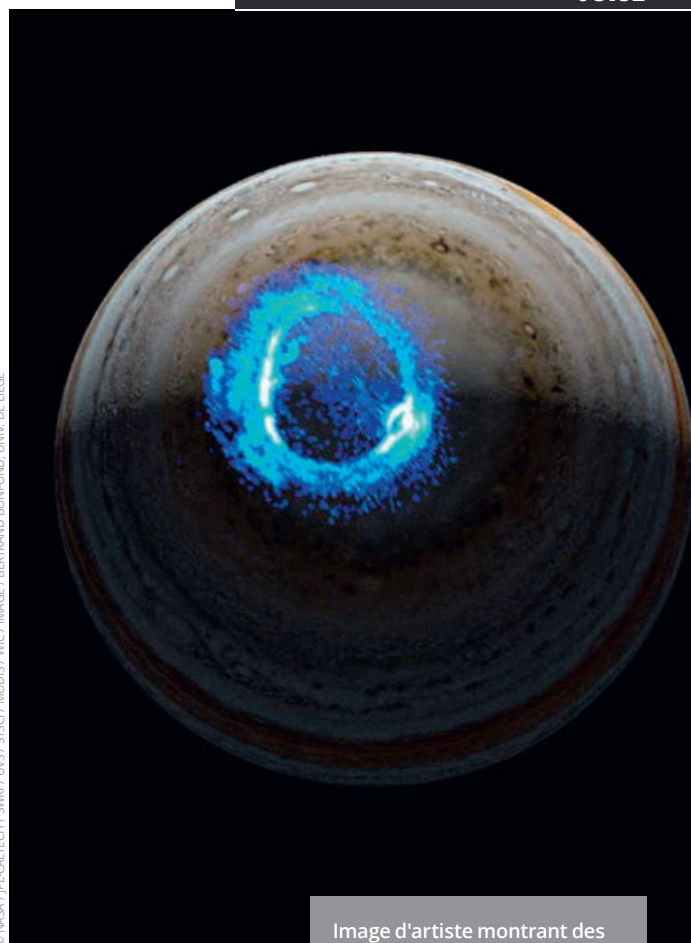


Image d'artiste montrant des aurores polaires sur Jupiter.

l'ensoleillement étant en moyenne 25 fois plus faible que sur Terre, et la ceinture de radiation de la planète peut endommager l'électronique, nécessitant un blindage optimisé.

Un imageur infrarouge a aussi besoin d'être refroidi pour ne pas perturber les mesures avec son propre rayonnement thermique : « *chaque degré de trop signifie une dégradation de la performance* ». Et tout cela doit tenir compte de la masse et du volume contraints pour chaque instrument de la sonde. « *Il faut trouver le meilleur compromis pour atteindre les résultats scientifiques souhaités* », explique l'ingénieure.

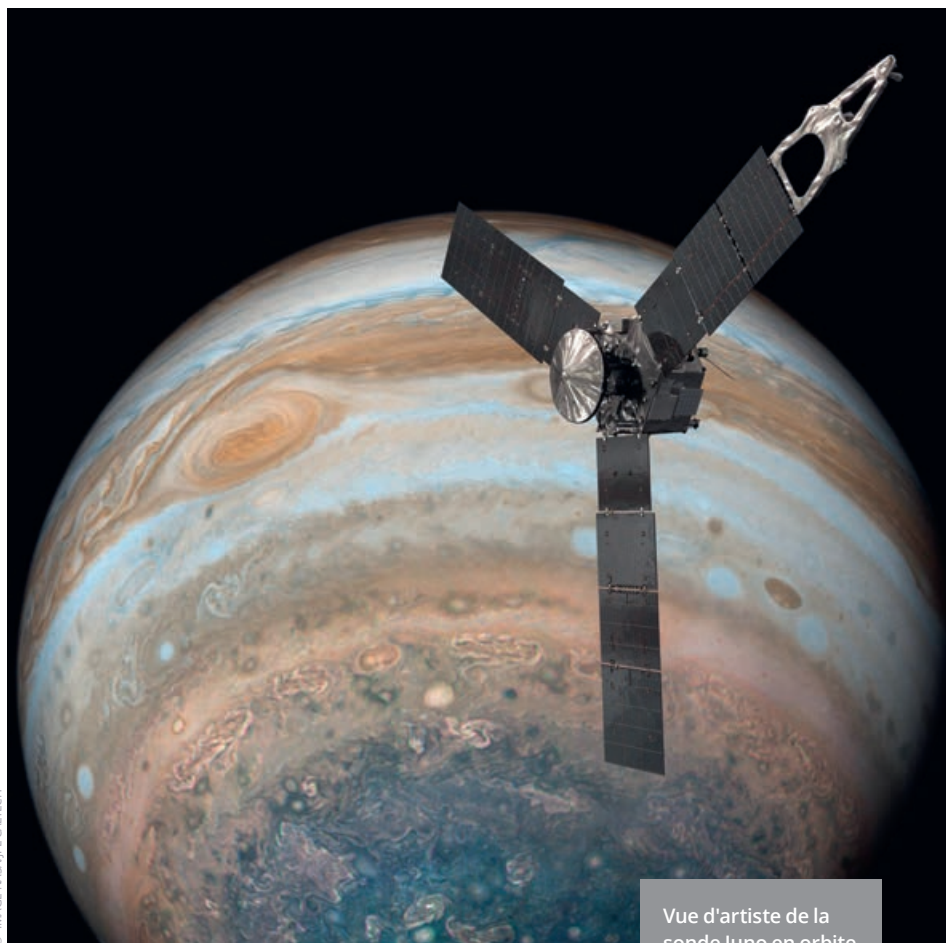
Première mission de grande envergure du programme Cosmic Vision 2015-2025 de l'ESA, Juice rassemble 18 institutions issues de 23 pays, ainsi que des dizaines d'industriels et fournisseurs. Sans compter ces derniers, elle représente le travail de plus de 2 000 personnes qui sont parvenues à respecter les délais sur plus de dix ans et malgré les difficultés posées par le Covid-19. Si les attentes sont aussi considérables que la cible de la mission, l'ESA prépare déjà la suite : elle a annoncé que la première mission du futur programme Voyage 2050 explorerait une lune de glace autour de Jupiter ou de Saturne. ■

Juno, une sonde prolifique

Développée par la Nasa avec une importante participation européenne, la sonde Juno a atteint Jupiter en juillet 2016. Elle s'est alors placée en orbite polaire autour de la géante gazeuse – une orbite « *extraordinaire et astucieuse* » qui « *frôle la haute atmosphère et évite les pires zones de radiations* », précise Philippe Louarn, membre de l'équipe scientifique de la mission et directeur de l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie¹.

Avec huit instruments scientifiques, Juno a déjà permis de nombreuses découvertes. Elle a par exemple montré « *la complexité et la puissance* » des aurores de Jupiter, caractérisant un processus de formation qui mobilise des énergies jusqu'à cent fois supérieures aux aurores polaires terrestres. Une « *bien meilleure* » cartographie du champ magnétique de la planète a révélé des anomalies magnétiques encore inexpliquées et une nouvelle ceinture de radiation au niveau de l'équateur a été découverte.

Juno a aussi permis d'établir la première carte tridimensionnelle d'une atmosphère « *plus dynamique que prévu* ». Les vents, qui créent en surface les bandes colorées et la grande tache rouge, s'étendraient ainsi jusqu'à une profondeur de plusieurs centaines de kilomètres. Les perturbations d'orbite subies par la sonde ont aidé à contraindre le champ de gravité, dévoilant une structure interne inattendue : un cœur dilué étendu à la place d'une « graine » centrale. La composition de l'atmosphère fait aussi partie des « *questions importantes pour contraindre les modèles de*



© IMAGE NAS/JPL/CALTECH

Vue d'artiste de la sonde Juno en orbite autour de Jupiter.

formation de Jupiter et plus généralement des planètes dans le Système solaire », explique Philippe Louarn. Enfin, Juno emporte une caméra, JunoCam, sans rôle scientifique direct mais qui fournit des photos de l'atmosphère et des lunes. « *La beauté de ces images est ce que je trouve le plus impressionnant* », assure le chercheur. Elles permettent d'observer de manière fine la dynamique de l'atmosphère et en particulier la structure hexagonale au pôle Sud, jusqu'alors inconnue et composée de six tempêtes entourant un cyclone central.

Une communauté de plusieurs centaines d'amateurs passionnés se charge d'une grande part du traitement de ces images « *formidablement esthétiques et riches en informations* ».

Prolongée jusqu'en septembre 2025, la mission étudie à présent les lunes de Jupiter – des données qui préparent aussi les investigations de Juice – et doit se terminer par le plongeon de la sonde au cœur de l'atmosphère de Jupiter, afin d'en étudier la composition plus en détails. II

1. CNRS/CNES/Université de Toulouse Paul Sabatier.

EN ACTION



*Les scientifiques explorent les
arcanes du cerveau et de notre santé
mentale, dépolluent les lagunes
et innovent contre le cancer.*

« Il n'y a pas de santé sans santé mentale »

SOCIÉTÉS



VIVANT



Pour des diagnostics plus précis et des traitements individualisés, la recherche française en psychiatrie se dote d'un vaste projet, ProPSY, financé sur cinq ans. Ses armes : une imagerie de pointe et la recherche de marqueurs biologiques. Ses cibles : les dépressions résistantes, les troubles bipolaires, les troubles du spectre autistique et les schizophrénies.

PAR PHILIPPE TESTARD-VAILLANT

Près d'un Français sur cinq a souffert ou souffrira de troubles psychiatriques, en particulier de dépressions. Les statistiques sur la santé mentale de notre pays évoquent en effet 10 à 13,5 millions de personnes. Cela fait de ces pathologies la première cause

de handicap, d'absentéisme au travail, de décès chez les jeunes adultes (avec dix mille suicides par an) et de mort prématurée¹, principalement en raison de comorbidités mal prises en charge. « Il n'y a pas de santé sans santé mentale », souligne Marion Leboyer, directrice du laboratoire

Neuropsychiatrie translationnelle de l'Institut Mondor de recherche biomédicale². C'est un enjeu de santé publique majeur. Au-delà des dépenses de santé et de soins, en partie financés par les individus, certains coûts sont indirects comme la moindre productivité des entreprises du fait d'une participation à l'emploi plus faible. Au total, les coûts liés aux troubles mentaux s'élèvent à 160 milliards d'euros », rappelle la psychiatre, Grand Prix de la recherche Inserm 2021.

Bien sûr, les vagues successives de Covid-19, la crise climatique, la guerre en Ukraine, l'inflation, etc. n'arrangent rien à la situation, d'autant que l'offre de soins en psychiatrie traverse une crise aiguë. Nombreux sont les observateurs, à commencer par les magistrats de la Cour des comptes³, à décrire un secteur à bout de souffle : perte d'attractivité, postes vacants conduisant à la fermeture de lits, épuisement des équipes hospi-

1. L'espérance de vie des malades est de quinze ans inférieure à la moyenne. 2. Unité Université Paris-Est Créteil/Inserm. 3. « Les parcours dans l'organisation des soins en psychiatrie », rapport public thématique, Cour des comptes, février 2021. 4. Le nombre de psychiatres pour 100 000 habitants varie du simple au triple selon les régions en France.

► Dix à treize millions de Français souffrent de troubles psychiatriques.

talières, diagnostics tardifs, manque d'outils à la disposition des généralistes pour détecter les signaux annonciateurs, inégalités territoriales⁴, parcours de soins éclatés en raison de la faiblesse des liens entre médecine psychiatrique et médecine somatique, etc. Quant aux personnes atteintes ne recevant aucun soin, impossible à dénombrer, leur existence rime avec souffrance, difficulté d'accès aux dispositifs d'insertion sociale, éloignement de l'emploi et stigmatisation.

Le retour sur investissement dans la recherche en psychiatrie se monte pourtant à 37 % : un euro investi sur ce créneau conduit à 1,37 euro de gain grâce à la diminution du nombre d'hospitalisations, d'arrêts de travail de longue durée, etc. Malgré ce « rendement », un des plus élevés dans le domaine de la santé, seuls 4 % du budget de la recherche biomédicale sont alloués à cette spécialité dans l'Hexagone, contre 7 % au Royaume-Uni et 16 % aux États-Unis par exemple. Des spécialistes du cerveau avaient déjà tiré la sonnette d'alarme en 2019 sur ce financement insuffisant (il s'élevait alors à 20 millions d'euros, tandis que la dépense totale dans le secteur de la santé mentale tournait autour de 50 milliards).

Quatre pathologies ciblées

« La psychiatrie reste le parent pauvre de la médecine, constate Marion Leboyer. La sous-dotation chronique dont elle fait l'objet freine les avancées en matière de compréhension des causes et des mécanismes physiopathologiques des maladies mentales, en matière de diagnostics et en matière de thérapies. Il est grand temps de mieux nous financer. »

Mais les temps commencent à changer. L'ambitieux projet ProPSY (Programme de recherche en psychiatrie de précision) s'est vu doté

DÉPRESSION RÉSISTANTE

Ensemble de symptômes associant perte de l'élan vital, idées de mort ou de suicide récurrentes, sentiment d'angoisse quasi permanent, ralentissement psychomoteur, fatigue, perte d'appétit, troubles du sommeil, troubles de l'attention, de la concentration et de la mémoire.

TROUBLES BIPOLAIRES

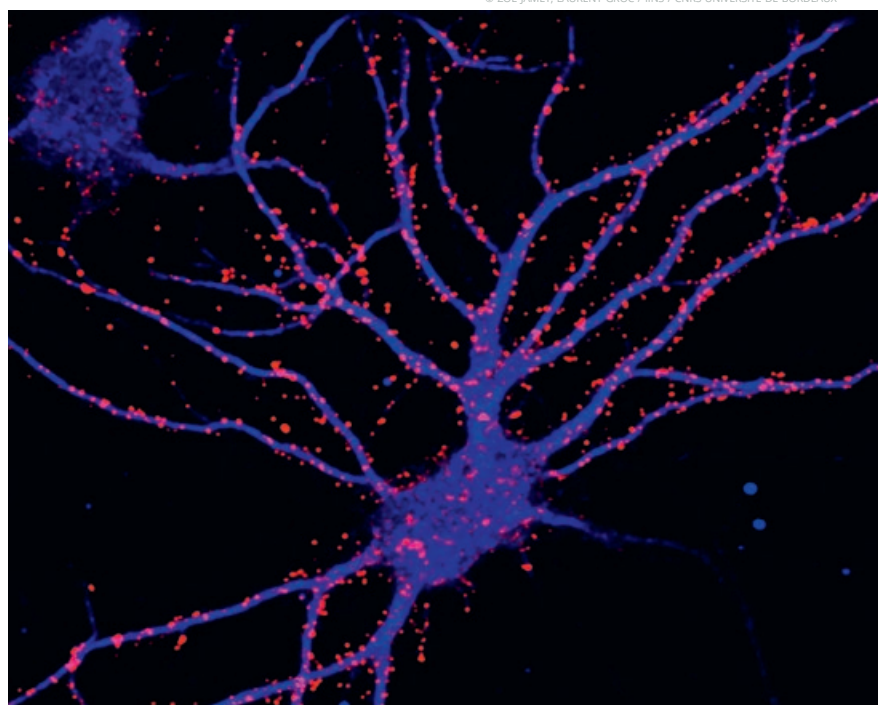
Dérèglement de l'humeur oscillant entre épisodes de dépression et phases d'exaltation (épisodes de manie).

TROUBLES DU SPECTRE AUTISTIQUE

Troubles neuro-développementaux caractérisés par des comportements répétitifs et des déficits persistants de la communication et des interactions sociales.

SCHIZOPHRÉNIE

Ensemble de symptômes altérant les fonctions cognitives (mémoire, perception, appréciation des choix) et troublant le cours de la pensée.



► Chez certains patients, des anticorps se dirigent vers les neurones (comme ceux-ci vus au microscope), en particulier au niveau des synapses (en rose), et génèrent hallucinations, idées délirantes, troubles cognitifs, etc.

l'an dernier d'un financement de 80 millions d'euros sur cinq ans⁵ dans le cadre des appels à projets France 2030. Copiloté par l'Inserm et le CNRS, en partenariat avec la fondation FondaMental, plusieurs universités et centres de recherche⁶, il cible quatre pathologies mentales classées parmi les plus invalidantes : la dépression résistante (qui affecte chaque année près de 3 millions de personnes), des troubles bipolaires (1,6 million), des troubles du spectre autistique (700 000) et des schizophrénies (600 000).

« Toutes sont des affections sévères, fréquentes, complexes, multifactorielles, débutant le plus souvent chez l'enfant ou le jeune adulte, et leur prévalence ne diminue pas, voire tend à augmenter », commente Pierre-Michel Llorca, professeur de psychiatrie à l'université Clermont-Auvergne et membre de l'Institut Pascal⁷.

Vers des traitements spécifiques

« Pour les maladies cardiovasculaires et le cancer, les progrès accomplis permettent désormais de définir les traitements de manière plus sélective et individualisée, avec une amélioration

notable du pronostic. Il est de la même façon urgent de déployer la "médecine de précision en psychiatrie" », argumente-t-il. « Actuellement, reprend-il, des groupes de patients très hétérogènes sont rassemblés sous l'appellation "dépression" ou "schizophrénie". Mais il existe des formes différentes de ces pathologies. Chacune présente des caractéristiques propres et nécessite une prise en charge particulière. Aujourd'hui, on a tendance à donner les mêmes médicaments à tout le monde. » Résultats : environ un tiers des malades répondent bien aux traitements, un tiers partiellement et un tiers pas du tout.

ProPSY ambitionne donc de « mieux classer les patients en créant des sous-familles distinctes des quatre maladies mentales retenues afin de proposer de meilleures stratégies de prévention, de dépistage, de diagnostic

5. Ce projet fait partie des Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR). Lire notre dossier dans *CNRS le Journal*, n° 310, p. 33. 6. Unité CEA/Sorbonne Université/Univ. de Bordeaux/Univ. de Lille/Univ. de Paris/Univ. Paris-Est Créteil. 7. Unité CNRS/Univ. Clermont-Auvergne.

et de suivi », explique Renaud Jardri, professeur de psychiatrie à l'université de Lille. « Il importe donc d'identifier des biomarqueurs spécifiques de chaque sous-groupe, qu'ils soient génétiques, moléculaires, de neuro-imagerie, de neuro-inflammation, chronobiologiques, cognitifs, psychologiques, électrophysiologiques... Cela permettra notamment de porter un diagnostic précoce et précis sans avoir à se fonder quasi exclusivement sur l'observation clinique, fondée sur des critères subjectifs, qualitatifs (essentiellement le comportement et la parole du patient, Ndlr), comme c'est actuellement le cas », insiste-t-il.

« Surtout, améliorer la détection, la compréhension et le traitement des troubles psychiques suppose de s'appuyer sur des études de cohortes de patients et de faire travailler ensemble psychiatres, spécialistes des neurosciences, d'imagerie, d'immunologie, de pharmacologie, d'intelligence artificielle, de modélisation, d'épidémiologie, et, bien sûr, de génétique », poursuit Renaud Jardri, également pédopsychiatre au CHU de Lille.

Des facteurs environnementaux

Plusieurs milliers de gènes ont en effet d'ores et déjà été associés à l'autisme et à d'autres troubles psychiques, et autant le seront sans doute bientôt. Pour autant, un nombre grandissant de travaux indique sans équivoque que « ces pathologies résultent d'interactions entre des facteurs génétiques et des facteurs environnementaux », explique Marion Leboyer, également pilote scientifique de ProPSY.

« Autrement dit, poursuit la chercheuse, tous les sujets porteurs de variants génétiques impliqués dans les troubles psychiatriques ne seront pas malades, mais tous présentent un risque accru de l'être quand ils sont confrontés à des facteurs exogènes comme le stress, les événements périnataux (infections maternelles, complications obstétricales), la maltraitance pendant l'enfance, la consommation de

“Comme pour les maladies cardiovasculaires et le cancer, il est urgent de déployer la médecine de précision en psychiatrie.”

cannabis à l'adolescence, les traumatismes crâniens, ou même l'urbanité (fait de vivre en ville) et la pollution ».

Les études prenant en compte les facteurs environnementaux ne cessent d'ailleurs de se multiplier. Il a ainsi été montré récemment qu'il y a deux fois plus de schizophrènes dans les grands centres urbains qu'en milieu rural, probablement en raison d'un surcroît de pollution, de stress et d'infections inhérent à une densité de population plus élevée⁸.

De même, une étude a révélé que les personnes migrantes ou appartenant à un groupe ethnique minoritaire présentent un sur-risque de

troubles psychiatriques, notamment de psychose, et ce jusqu'à la deuxième génération, par rapport aux non-migrants⁹, sans doute du fait de conditions de vie défavorables et instables, de l'isolement relationnel, etc. Tandis qu'une forte corrélation a été mise en évidence entre pics de pollution aux microparticules et consultations aux urgences pour trouble psychotique et dépression¹⁰.

Un dérèglement immunitaire

Autre volet de la psychiatrie de précision : l'immunopsychiatrie. Il s'agit de l'étude des liens entre l'apparition de symptômes neuropsychiatriques et

BIOMARQUEUR

Donnée objectivement mesurable et aisément accessible apportant une indication prédictive, diagnostique et/ou pronostique sur un processus pathologique et sa réponse à une stratégie thérapeutique.

STIMULATION MAGNÉTIQUE TRANSCRÂNIENNE

Technique indolore consistant à induire de faibles courants électriques dans des zones précises du cerveau pour les stimuler.

▲ Œuvre réalisée par un patient schizophrène lors d'un atelier de création à l'hôpital psychiatrique du centre hospitalier Les Murets, dans le Val-de-Marne.



© GIRAND / BSIP

8. « Le milieu urbain : un facteur de risque pour les troubles psychotiques ? », *Annales Médico-psychologiques revue psychiatrique*, février 2021. 9. "Treated incidence of psychotic disorders in the multinational EU-GEI study", *JAMA Psychiatry*, Janvier 2018. 10. "PM2.5 and PM10 air pollution peaks are associated with emergency department visits for psychotic and mood disorders", *Environmental Science and Pollution Research*, juillet 2022. 11. Unité CNRS/Université de Bordeaux. 12. En collaboration avec le PEPR Santé numérique.

les dérèglements du système immunitaire (ceux-ci étant responsables d'une inflammation chronique et imputables à des déséquilibres nutritionnels, à l'exposition à des polluants, à un vécu traumatique, etc.). Un dysfonctionnement, notamment, focalise l'attention : celui provoqué par les auto-anticorps.

« Ceux-ci s'attaquent à nos propres cellules et peuvent se diriger contre des récepteurs cérébraux indispensables au fonctionnement des synapses, explique Laurent Groc, de l'Institut interdisciplinaire de neurosciences à Bordeaux ¹¹. Ils y sèment la pagaille et génèrent des symptômes psychotiques : hallucinations, idées délirantes, troubles cognitifs... Nous avons montré avec Marion Leboyer qu'entre 10 et 20 % des patients diagnostiqués schizophrènes sont porteurs de ces auto-anticorps et souffrent, en réalité, de ce que nous avons appelé une "psychose auto-immune". »

Or, cette nouvelle entité clinique ne répond pas aux neuroleptiques. Pire, les médicaments aggravent la situation. D'où l'importance de « détecter, chez les sujets présentant des troubles psychotiques, la présence d'auto-anticorps qui modifient la dynamique des récepteurs cérébraux, et de proposer à ces patients, s'ils sont séropositifs, une immunothérapie, plaide Laurent Groc. Ce traitement, disponible et peu onéreux, permettrait une amélioration thérapeutique chez ces patients. Un essai clinique est en cours à l'échelle nationale ».

Prévoir les crises grâce l'imagerie

Les techniques d'imagerie, comme l'IRM anatomique, s'avèrent aussi cruciales. Celle-ci permet de repérer des modifications des structures cérébrales comme le cortex dont on peut calculer l'épaisseur. Tandis que « l'IRM de diffusion sert à mesurer des défauts de connectivité entre les régions du cerveau, ces connexions étant souvent altérées par un trouble psychiatrique », pointe Renaud Jardri.

« Quant à l'IRM fonctionnelle, couplée à des algorithmes d'intelligence artificielle, elle permet déjà de prédire la survenue d'hallucinations auditives chez les patients schizophrènes et

devrait bientôt permettre de savoir si un premier épisode psychotique va plutôt évoluer vers un trouble bipolaire, une schizophrénie ou rester un épisode isolé. Enfin, l'IRM à très haut champ magnétique vise entre autres à mieux comprendre le mode d'action des sels de lithium chez les patients bipolaires et apporte de précieuses informations sur les concentrations de certains métabolites (molécules produites par les bactéries) jouant un rôle clé dans la transmission d'information entre neurones », informe l'enseignant-chercheur.

Une cohorte de dix mille patients

L'ensemble de ces marqueurs (anatomiques, microstructuraux, fonctionnels, métaboliques) seront utilisés, avec d'autres, au sein de la cohorte « French Minds » de dix mille patients. « Ils seront évalués et suivis des années durant sur le plan clinique, comportemental, environnemental... Jamais une cohorte de cette taille n'avait bénéficié d'un tel suivi, se réjouit Marion Leboyer. Elle va nous permettre de faire de la "haute couture" plutôt que du "prêt-à-porter". »

« C'est un outil indispensable, il permettra de mieux cerner les facteurs de risque, suivre la trajectoire des patients et comprendre ce qui la modifie, pour notamment développer des stratégies ciblées », résume la chercheuse.

Autre atout de la démarche : les partenariats tissés avec des start-up. Ils devraient contribuer au développement de nouvelles molécules thérapeutiques, mais aussi à l'essor de la stimulation magnétique transcrânienne en cas de dépression sévère, ou encore au déploiement des thérapies numériques ¹². « Nos patients ont besoin d'innovations. Ils ont le droit à ce que l'on peut faire de mieux, conclut Marion Leboyer. Mais quelles que soient les avancées de la psychiatrie de précision qu'occasionnera ProPSY, la relation entre patients et soignants restera le fondement essentiel du traitement », rappelle la psychiatre. II



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

En bref

BIODIVERSITÉ

Le 30 janvier, le CNRS, l'Office français de la biodiversité (OFB), le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) et l'Institut de recherche pour le développement (IRD) ont signé une convention pour les cinq prochaines années. Celle-ci va renforcer la collaboration concrétisée par l'unité mixte de service PatriNat. Depuis 2017, ce centre composé de 150 scientifiques assure des missions nationales d'expertise scientifique et de gestion des connaissances sur le patrimoine naturel.

SCIENCE OUVERTE

En janvier ont été lancés les trois projets DIAMAS, CRAFT-OA et PALOMERA, auxquels contribue OpenEdition, une infrastructure nationale cogérée par le CNRS, Aix-Marseille Université, l'EHESS et Avignon Université. Financés par la Commission européenne, ils contribueront à structurer le paysage de l'édition en accès ouvert « diamant » qui permet aux chercheurs et chercheuses de diffuser leurs travaux en accès ouvert sans qu'ils n'aient à payer de frais de publication.

FRANCE 2030

Plusieurs programmes ont été lancés récemment dans le cadre de France 2030. Piloté par le CEA et le CNRS pour le compte de l'État, le programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) « Soutenir l'innovation pour développer les futures générations de batteries » a ainsi démarré le 10 janvier dernier. Doté de 45,6 millions d'euros sur 7 ans, ce PEPR, qui s'inscrit dans la stratégie nationale d'accélération sur les batteries, vise à accompagner la filière avec des activités transférables à court-moyen terme aux acteurs économiques et préparer le long terme.

Le lendemain, c'est le PEPR exploratoire Atlasea qui a été lancé. Copiloté par le CNRS et le CEA, et financé à hauteur de 41 millions d'euros sur 8 ans, Atlasea a pour but de séquencer le génome de 4 500 espèces marines de la zone économique exclusive française en ciblant en particulier les espèces ayant un intérêt scientifique ou économique, par exemple pour découvrir de nouveaux antibactériens biosourcés, ou de nouveaux procédés de dégradation du plastique par des organismes marins.

Les maths multiplient les innovations

NUMÉRIQUE

Les mathématiciens n'ont pas attendu que des défis de grande ampleur planent sur le XXI^e siècle pour interagir avec l'économie et la société. Énergie, santé, numérique... voici quelques remarquables exemples de valorisations réalisées au CNRS.

PAR ANAÏS CULOT

Cachées dans nos objets du quotidien, garantes de la fiabilité de nos examens médicaux ou guides indispensables des choix de société comme ceux liés à la transition énergétique... les maths sont partout. Si les Assises des mathématiques organisées l'an dernier par le CNRS ont montré le développement des interactions entre la recherche académique et le monde socio-économique, beaucoup reste à faire. Notamment pour faciliter les transferts une fois les liens entre mathématiques et applications identifiés. « *Le principal levier est de multiplier les voies d'accès de l'industrie à la recherche académique et inversement. Penser à des intermédiaires en mesure de repérer ce qui peut être utile aux entreprises dans la recherche. Et surtout, favoriser les moments et lieux d'échanges informels entre ces deux univers* », défend François James, directeur adjoint scientifique de l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (Insmi) du CNRS. Le CNRS propose ainsi plusieurs voies de valorisation dont voici quelques illustrations.

L'interdisciplinarité au service de la médecine

Au CHU de Poitiers s'active une équipe mêlant mathématiciens, médecins, physiciens, informaticiens et ingénieurs en résonance magnétique. Ce sont les contributeurs du laboratoire commun I3M entre le fabricant de l'imageur ultra-haut champ Siemens Healthineers et le Laboratoire de mathématiques et applications¹ et le XLIM². Ensemble, ils créent des méthodes d'intelligence artificielle (IA) pour le traitement et l'analyse automatique d'images de l'IRM qu'ils appliquent à différentes pathologies cérébrales (tumeurs, maladies neurodégénératives, etc.).

« *Nous construisons un jumeau numérique, c'est-à-dire une représentation virtuelle du cerveau du patient et de son fonctionnement, à partir des observations par imagerie et de nouvelles données extraites de ces clichés par des algorithmes d'IA* », explique Rémy Guillevin, directeur d'I3M. Parmi les révolutions pratiques visées par cet outil : la possibilité de réaliser une biopsie virtuelle non invasive d'un organe, de simuler un traitement ou une approche chirurgicale et donc d'identifier la solution la plus adaptée au malade. « *Notre solution a fait ses premiers pas en pratique clinique à Poitiers avec 10 à 15 % des tumeurs cérébrales désormais biopsiées de façon virtuelle* », précise Rémy Guillevin.

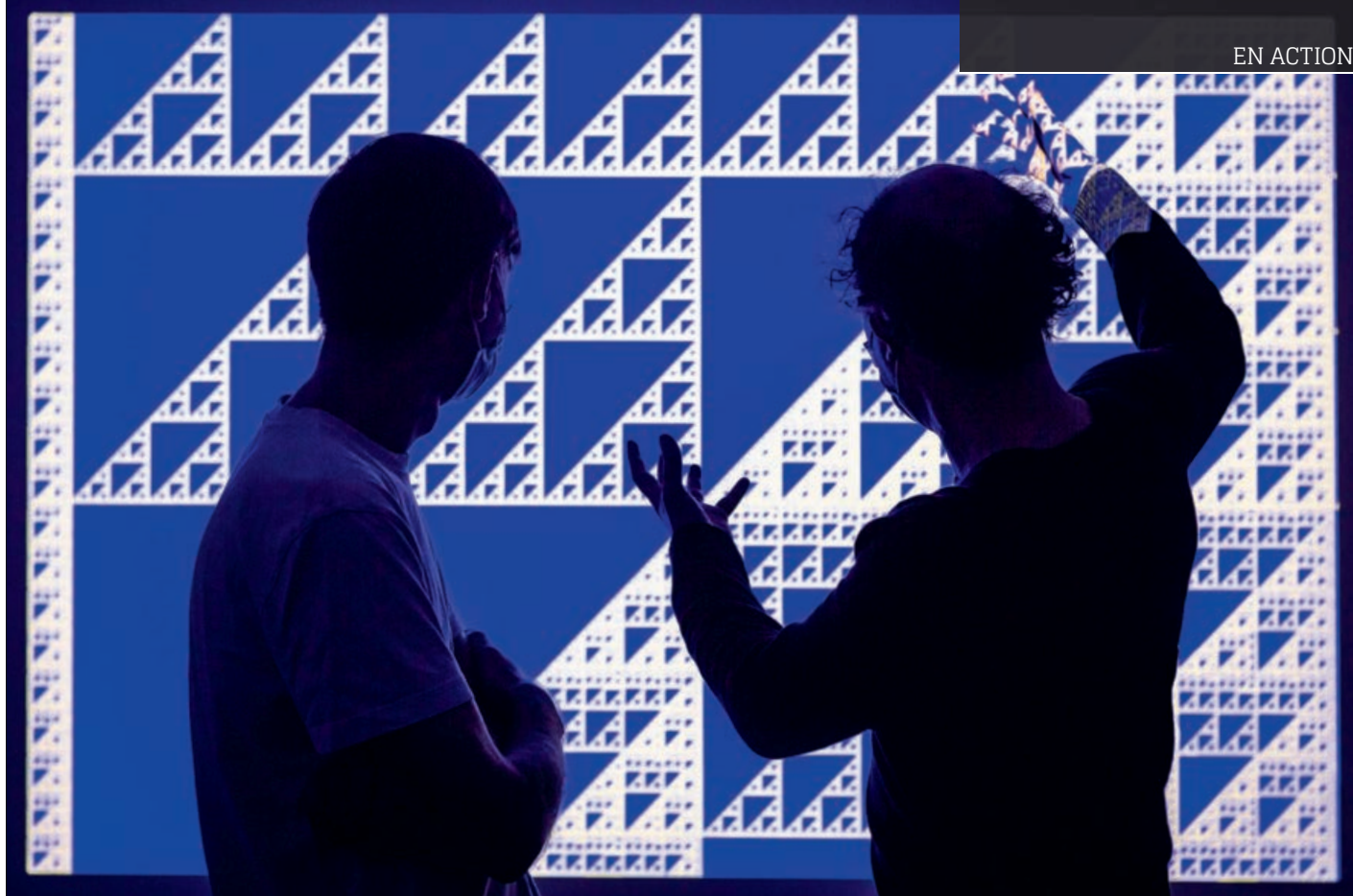
Des laboratoires communs peuvent aussi être créés avec des start-up, à l'image du Lopf (*Large-scale Optimization of Product Flows*) créé par le Laboratoire de probabilité, statistique et modélisation³ et la start-up Califrais, spécialisée dans l'optimisation des flux alimentaires à grande échelle.

Du laboratoire à l'entreprise

Autre dispositif : le programme de prématuration du CNRS permet d'accompagner des projets directement issus des équipes de recherche, à fort impact sociétal, pour amorcer leur transfert vers le marché. C'est notamment le cas du projet Ktirio, porté par Christophe Prud'homme : « *Le gouvernement français veut réduire l'impact énergétique des bâtiments – responsables de 45 % de la consommation actuelle – en rénovant près de 700 000 bâtiments par an, précise l'enseignant-chercheur à l'Institut de recherche mathématique avancée⁴. Nous répondons à ces besoins à l'aide d'un outil de simulation énergétique dynamique des bâtiments qui permet d'optimiser les consommations et de proposer des stratégies de rénovation qui améliorent le confort des usagers*. » La méthode mêle l'internet des objets – avec le déploiement de capteurs au sein des édifices – à des méthodes mathématiques d'assimilation de données, de réduction d'ordre et de calcul haute performance.

« *Il existe déjà de nombreux logiciels dans le domaine de la rénovation qui sont confrontés à deux limitations : le temps de calcul et la fiabilité des résultats* », pointe Christophe Prud'homme. Pour lever ces verrous, les chercheurs s'appuient sur deux partenariats majeurs : la PME alsacienne Synapse Concept, spécialisée dans la thermique des bâtiments et le fabricant américain de capteurs Cisco Meraki.

1. Unité CNRS/Université de Poitiers. 2. Unité CNRS/Université de Limoges. 3. Unité CNRS/Sorbonne Université/Université Paris Cité. 4. Unité CNRS/Université de Strasbourg.



© CHRISTIAN MOREL / IRF / CNRS PHOTO THÈQUE

Avec plus de 500 000 examens annuels en France, l'imagerie TEP consiste à injecter un radiotraceur dans le corps et à réaliser un cliché instantané de sa répartition après un délai d'attente. Une modélisation de sa distribution au cours du temps apporterait aux cliniciens des informations plus riches des tissus cibles : activité enzymatique, volume de distribution, etc. C'est l'objectif du projet Quantim, également accompagné en prématuration par le CNRS. Il développe des méthodes visant à calculer de nouvelles images 3D à partir des observations TEP 4D enregistrées en continu. « *Au départ, nos modèles permettaient de représenter la zone d'une tumeur, puis ses alentours, avant d'adapter nos méthodes à l'ensemble du thorax* », explique Sylvain Faure, ingénieur de recherche au Laboratoire de mathématiques d'Orsay⁵ et coporteur du projet.

« *Nous avons réduit à 11 secondes un traitement qui prenait au départ plusieurs heures sur des machines puissantes. Un temps de calcul désormais adapté aux applications cliniques* », décrit le chercheur. Pour faciliter l'intégration de cette solution, l'équipe de Quantim ambitionne de créer une entreprise. Le transfert aux médecins prendra la forme d'une extension à un logiciel qu'ils utilisent déjà.

Un vivier de start-up

La recherche fondamentale donne également naissance à un important vivier d'entreprises innovantes. Ainsi, Sonio, créée en 2020 par des chercheurs du Centre de mathématiques appliquées⁶, a pour objectif d'aider au dépistage prénatal de maladies. En effet, lorsqu'un médecin détecte une anomalie sur les images d'échographies

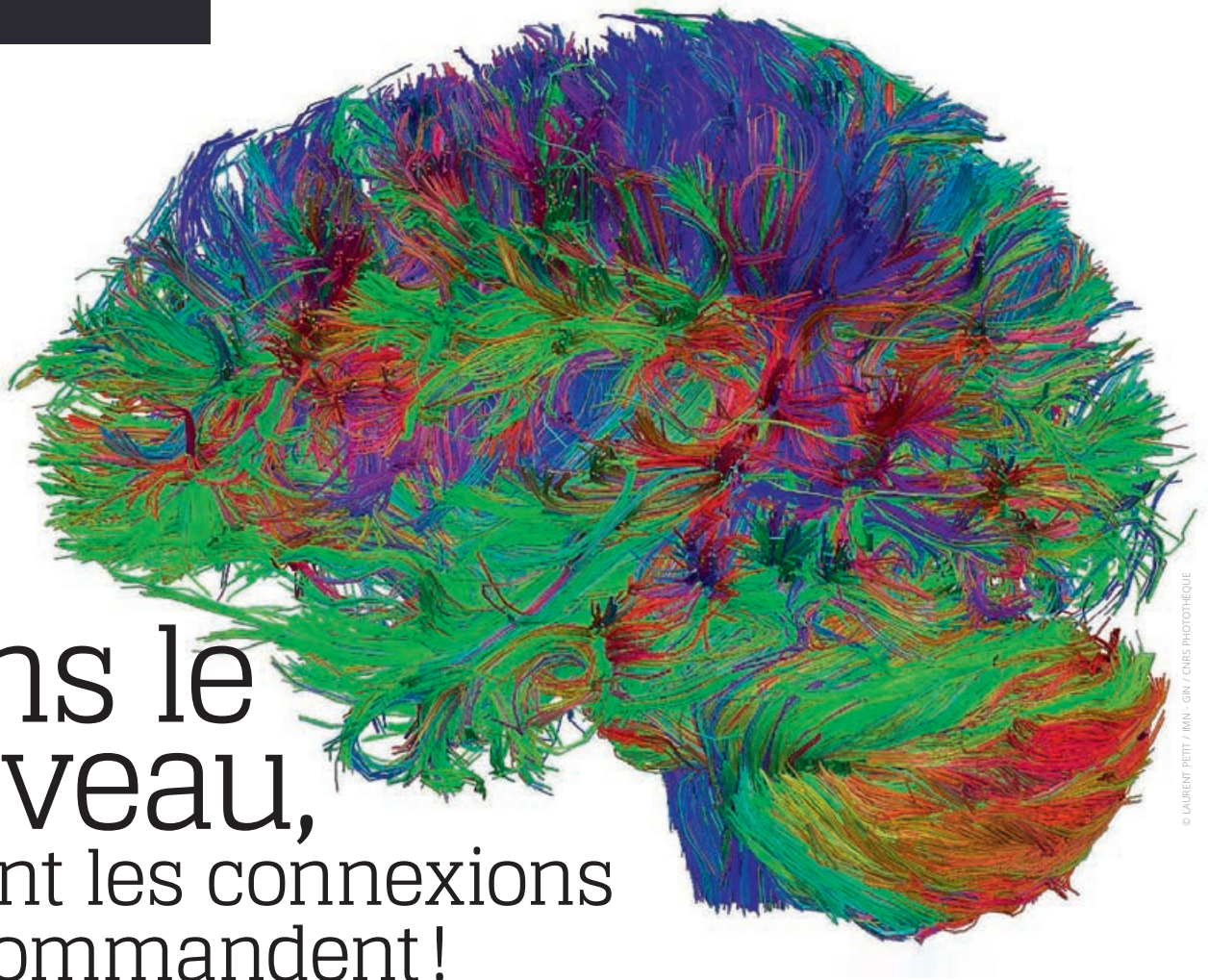
prénatales, il n'existe pas de marche à suivre pour l'aider à trouver le bon diagnostic. « *Cette problématique a été exprimée par des gynécologues-obstétriciens de l'hôpital Necker. Elle a fait l'objet de ma thèse avant de donner naissance à la start-up* », décrit Rémi Besson, associé fondateur chez Sonio. En pratique : le médecin présente ses observations au logiciel qui l'accompagne pas à pas vers un diagnostic grâce à un système de check-list de symptômes. Commercialisée depuis un an et demi avec une cinquantaine de centres experts en France, cette solution s'intègre peu à peu en Europe, au Brésil et en Inde.

De son côté, Mohammed Lemou – chercheur à l'Institut de recherche mathématique de Rennes⁷ – n'a pas créé de start-up mais contribue fortement au développement de Ravel Technologies, spécialisée dans la cryptographie homomorphe : une technique qui permet de protéger des données privées (de santé, bancaires, etc.) tout en les exploitant. Confrontée à des verrous limitant les applications concrètes de ses algorithmes, la start-up a misé sur son regard neuf pour y répondre : « *Grâce à cette opportunité, je poursuis mes recherches dans un nouveau domaine de façon plus interactive entre mathématiciens et développeurs, tout en suivant le fonctionnement et la politique générale de l'entreprise. Cette expérience modifie sans aucun doute ma façon de travailler et d'aborder les problèmes. Elle m'a donné envie de me rapprocher davantage des applications* », conclut Mohammed Lemou. ^{II}



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

5. Unité CNRS/Université Paris-Saclay. 6. Unité CNRS/École Polytechnique. 7. Unité CNRS/ENS Rennes/Université Rennes 1/Université Rennes 2.



© LAURENT PETIT / AN - GN / CHRIS PHOTO THÈQUE

Dans le cerveau, ce sont les connexions qui commandent !



© DÉLEGATION PHOTO THÈQUE

VIVANT

NEUROSCIENCES Entretien avec Michel Thiebaut de Schotten, qui propose un nouveau modèle du cerveau permettant une meilleure compréhension de son fonctionnement et une meilleure prise en charge des troubles neurologiques.

PAR KHEIRA BETTAYEB

Dans un article paru dans *Science*¹ en novembre 2022, vous proposez un nouveau modèle de fonctionnement du cerveau. Quelle conception prédominait jusque-là ?

Michel Thiebaut de Schotten². Nous nous efforçons de dépasser le modèle « localisationniste », qui attribue chaque fonction cognitive, comme le langage, la mémoire ou le raisonnement, à une région précise du cerveau. Ainsi, en 1861, le médecin français Paul Broca a observé que l'aire cérébrale

de la production du langage devait être située à l'avant de la boîte crânienne ; il lui a d'ailleurs laissé son nom : l'« aire de Broca ». Mais plusieurs travaux ont remis en cause cette vision réductionniste ces vingt dernières années.

Que suggère votre nouveau modèle ?

M. T. de S. À la différence du modèle classique susmentionné, nous proposons que les fonctions cérébrales

émergent non pas des seules aires cérébrales, mais de l'échange entre ces régions ; cela met les connexions au cœur du fonctionnement du cerveau. Localisées sous le cortex cérébral (*la couche externe du cerveau, appelée « substance grise », Ndlr*), et formant la matière blanche, ces connexions s'établissent via les prolongements des neurones, les axones, qui se regroupent en faisceaux reliant les régions cérébrales.

En quoi ce modèle connexionniste constitue-t-il un basculement conceptuel ?

M. T. de S. Dans ce concept, les connexions cérébrales ne sont plus considérées comme de simples canaux de transfert de signaux entre les régions du cerveau. Au contraire,

1. M. Thiebaut de Schotten et S. Forkel, *Science*, 4 novembre 2022. doi: 10.1126/science.abq2591. 2. Chercheur CNRS à l'Institut des maladies neurodégénératives (CNRS/Univ. de Bordeaux) dans le Groupe d'imagerie neurofonctionnelle et membre du groupe Brain Connectivity and Behaviour Laboratory à l'université Paris Sorbonne. 3. M. Thiebaut de Schotten et al., *Science*, 30 sept. 2005. doi: 10.1126/science.1116251. 4. M. Thiebaut de Schotten et al., *Cereb. Cortex*, décembre 2015. doi: 10.1093/cercor/bhv173. 5. et 6. www.bcblab.com

► Vue de profil d'un cerveau et de ses connexions observés par tractographie (technique d'imagerie dérivée de l'IRM).

elles apparaissent comme un chef d'orchestre, capable d'amplifier ou de réduire les signaux cérébraux et de favoriser le « dialogue » entre plusieurs régions cérébrales, en les interconnectant entre elles à un moment donné pendant une certaine durée. Ce faisant, elles permettent l'émergence de fonctions qui ne pourraient pas être exercées par les régions cérébrales prises isolément ; celles-ci pouvant être activées par des tâches très variées. Le cerveau apparaît alors comme un ensemble beaucoup plus dynamique dont peuvent émerger beaucoup plus de fonctions !

Quand avez-vous commencé à adhérer à ce modèle ?

M. T. de S. La contribution majeure des connexions cérébrales dans le fonctionnement du cerveau m'est apparue à la suite de travaux³ portant sur deux patients opérés par le neurochirurgien Hugues. Nous avons découvert que le syndrome d'héminégligence, où le patient ne détecte pas toute une moitié du champ visuel, était la conséquence non pas d'une lésion au niveau d'une aire corticale, mais d'une déconnexion des réseaux cérébraux entre l'avant et l'arrière du cerveau.

Depuis, nous avons publié plusieurs autres travaux appuyant ce premier résultat. Par exemple, lors d'une recherche parue en 2015⁴, nous avons montré que le dysfonctionnement des réseaux cérébraux est le dénominateur commun aux désordres du comportement et de la cognition rapportés chez trois patients historiques de la neurologie (*L'Américain Phineas Gage, au XIX^e siècle, qui a subi un profond changement de personnalité après un traumatisme crânien majeur ; le Français Louis Victor Leborgne, également au XIX^e siècle, qui a développé de graves troubles du langage après une crise d'épilepsie ; et l'Américain Henry Gustav Molaison, décédé en 2008, qui a perdu la faculté de se souvenir de nouvelles informations après une intervention neurochirurgicale, Ndlr*).

Comment étudiez-vous la connectivité cérébrale ?

M. T. de S. Notamment grâce à deux puissantes techniques d'imagerie cérébrale qui permettent de voir le cerveau en fonctionnement, sans ouvrir la boîte crânienne : l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), qui renseigne sur les réseaux neuronaux sollicités lors d'une tâche ; et l'IRM de diffusion (IRMd), qui donne des informations sur la structure des connexions (trajectoire, diamètre, etc.). Ceci dit, ces techniques sont difficiles d'accès, car onéreuses et en nombre limité en France.

Aussi, ces dernières années, nous avons développé deux applications – bcbtoolkit et Funtionnectome –, qui permettent de détecter et d'étudier de façon indirecte de possibles déconnexions cérébrales dès lors que le patient a réalisé au moins une fois dans sa vie un examen IRM. Disponibles gracieusement en ligne⁵, ces outils se basent sur divers algorithmes et sur un atlas cartographiant les principales connexions cérébrales humaines, développé par mon équipe.

Qu'a-t-on appris sur la connectivité cérébrale des personnes saines ?

M. T. de S. Il est désormais bien établi que l'architecture des réseaux neuronaux varie d'un individu à l'autre ; un peu comme l'information génétique, dont 0,1 % est différent d'une personne à l'autre. Cette « neurovariabilité » détermine qui nous sommes, puisque les différences de connectivité sont associées à des différences de performances dans certaines fonctions cognitives (mémoire, langage, motricité fine...). Mais point important, notre connectivité cérébrale peut beaucoup évoluer au fil de la vie, en fonction notamment des apprentissages. Lesquels peuvent entraîner l'apparition ou la disparition de certaines connexions, grâce au processus de plasticité cérébrale.

► Buste phrénologique en plâtre teinté, réalisé par James De Ville, daté de 1821.



Le modèle connexionniste peut-il révolutionner la recherche sur le cerveau ?

M. T. de S. Absolument ! Tout d'abord, il devrait aider à mieux comprendre le fonctionnement du cerveau et les différences entre individus au niveau de performances cognitives. Ensuite, l'étude de la connectivité cérébrale pourrait contribuer à en savoir plus sur l'évolution de notre encéphale : en comparant le profil des connexions cérébrales de notre cerveau et de celui de différentes espèces de primates proches (macaque, chimpanzé...), il est possible de remonter dans le temps et de modéliser la connectivité cérébrale de notre ancêtre commun.

Quid de l'importance de votre modèle en clinique ?

M. T. de S. Il pourrait améliorer la prise en charge de différents troubles neurologiques et psychiatriques. Et ce, de plusieurs façons. Par exemple, en amenant les médecins à explorer les connexions cérébrales du patient, on pourrait faire en sorte, en cas de détection de connexions coupées ou mal connectées, que les cliniciens reconnaissent plus rapidement que le patient est atteint d'un trouble réel.

Ensuite, ce nouveau modèle peut aussi aider à mieux prédire l'évolution des conséquences d'un accident vasculaire cérébral (AVC). On sait en effet que la connectivité cérébrale individuelle a un impact sur la capacité à se remettre plus ou moins rapidement d'un tel trouble. Ici, mon équipe a développé un outil qui peut, à partir de la carte de déconnexions du patient, estimer la probabilité que celui-ci remarche, reparle ou encore rebouge un bras paralysé, un an après l'AVC : l'application web interactive « Disconnectome Symptoms Discoverer », accessible elle aussi en ligne⁶. De quoi espérer personnaliser et ainsi optimiser le suivi et la prise en charge du patient. ■



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



Un robot plongeur pour nettoyer les zones côtières

© EU H2020 MAELSTROM PROJECT

NUMÉRIQUE

ROBOTIQUE Testée cette année à Venise, la plateforme du projet Maelstrom dispose d'un robot chargé de récupérer les déchets sous-marins. Contrôlé par un système de câbles, il peut opérer jusqu'à une profondeur maximale de vingt mètres.

PAR MARTIN KOPPE

Malgré ses deux tonnes, elle plonge à la recherche de déchets sous-marins qu'elle remonte ensuite à la surface. Elle, c'est la partie mobile d'une plateforme flottante et robotisée, dédiée au nettoyage des fonds marins. Conçu dans le cadre du projet européen Maelstrom¹ réunissant quatorze partenaires issus de huit pays, l'ensemble se présente sous la forme d'une barge flottante, vide en son centre afin de laisser un espace en

forme de piscine pour que le robot puisse plonger. Un relevé acoustique préalable repère les fortes concentrations de déchets et indique la zone à nettoyer.

Selon les estimations de l'équipe de Maelstrom, 83 millions de tonnes de déchets plastiques polluent les océans. Apportant sa pierre à la lutte contre ce fléau, la barge se veut une réponse plus particulièrement adaptée au nettoyage des environnements côtiers. Le robot peut ainsi

descendre jusqu'à 15 ou 20 mètres de profondeur et travailler sur une surface de 70 mètres carrés sans avoir à déplacer le reste de la barge.

Maniabilité et précision extrêmes

Le robot plongeur est contrôlé par un système de huit câbles, reliés à quatre poteaux, dont l'enroulement et le déroulement offrent une liberté et une précision surprenantes de mouvement. Le robot peut ainsi manipuler des charges plus lourdes que s'il était propulsé comme un robot sous-marin classique et assure sa stabilité en présence de courants. La précision de ce système permet également de contourner une difficulté majeure : les GPS ne fonctionnent pas dans l'eau et ne peuvent donc pas indiquer la position et l'orientation d'un robot sous-marin.

« À notre connaissance, c'est un mélange inédit entre un robot à câbles et un véhicule sous-marin téléopéré, deux grandes spécialités de notre laboratoire, explique Marc Gouttefarde, directeur de recherche CNRS au

1. Smart technology for marine litter sustainable removal and management, technologie intelligente pour l'enlèvement et la gestion durables des déchets marins. 2. Unité CNRS/Université de Montpellier. 3. TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA). 4. Istituto di scienze marine del Consiglio nazionale delle ricerche, Institut des sciences marines du Conseil national de la recherche.

► La barge et le robot câblé dans la lagune de Venise.

Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier² (Lirmm). *Nous avons travaillé sur les commandes et les capteurs du robot, avec un système de caméras et un capteur acoustique qui mesure la distance entre la partie mobile de la plateforme et le fond de la mer. Une centrale inertielle permet également de surveiller l'orientation du robot une fois qu'il est sous l'eau. Le reste de l'ingénierie a été réalisé par la fondation de recherche Tecnalia³.* »

Premiers tests en eaux troubles

La plateforme a été testée en septembre, dans la lagune de Venise, sous la coordination du laboratoire italien CNR-ISMAR⁴. Le robot était alors pourvu d'un aspirateur et d'un grappin pour attraper des déchets comme du plastique, des pneus ou des filets de pêche. *« Nous avons rencontré des difficultés lors de cette phase d'expérimentation, car, s'il faisait très beau hors de l'eau, la visibilité sous-marine était quasiment nulle, décrit Marc Gouttefarde. On ne pouvait identifier les déchets qu'une fois arrivé à seulement quelques centimètres d'eux. »*

En réponse, le Lirmm prévoit de mener des travaux près de Montpellier, où la clarté de l'eau devrait permettre d'établir une solide base de données de photographies et de vidéos sur les ordures sous-marines. *« Nous avons déjà mené des travaux similaires sur l'identification de poissons »,* précise le chercheur. La base de données permettra ensuite d'entraîner des intelligences artificielles afin qu'elles désignent d'elles-mêmes au robot les débris à enlever.

Les chercheurs travaillent aussi à la récupération automatique du déchet, c'est-à-dire la possibilité pour un opérateur humain de cliquer sur les débris qu'il reconnaît sur une vidéo afin que le système les récupère. D'autres pistes d'amélioration sont également suivies. *« Les systèmes de robots à câbles sont faciles à changer d'échelle afin de traiter une plus grande zone, mais cela coûte cher, regrette Marc Gouttefarde. Autre idée, la barge est actuellement tractée par bateau, mais on peut tout à fait imaginer une version motorisée et équipée d'un GPS de surface afin de l'emmener nettoyer des endroits précis. »*

La barge a d'ailleurs été conçue avec l'aide de Servizi Tecnici, une société vénitienne spécialisée dans la construction de surfaces flottantes pour l'événementiel, par exemple pour des feux d'artifice ou des concerts. L'équipe de Maelstrom réfléchit à démonter le système pour le tester dans d'autres conditions, mais les nouveaux lieux n'ont pas encore été choisis. Le projet comporte également un autre volet : un système de barrière à bulles qui a été testé dans la rivière Ave, au Portugal. Elle empêche les déchets de poursuivre leur chemin vers l'océan et les rabat sur les berges où ils peuvent être plus facilement récoltés. Le tout, sans gêner la vie aquatique.

En attendant de nouvelles expérimentations grandeur nature, les chercheurs du Lirmm continuent de travailler sur la partie intelligence artificielle du projet. La détection et la capture automatiques des déchets accéléreraient en effet le nettoyage des zones côtières. **II**



© EU H2020 MAELSTROM PROJECT

► Le robot remonte un pneu à l'aide du grappin.

En bref

INSTRUMENT

WEAVE, le nouveau spectrographe du télescope William Herschel, basé aux Canaries, vient de collecter avec succès ses premières lumières de galaxies. L'observation du Quintette de Stephan, un groupe de cinq galaxies, a permis de démontrer ses capacités inédites – des observations presque 100 fois plus rapides qu'avant ! – et promet à la communauté astronomique de nombreuses découvertes. En France, WEAVE a été soutenu par le CNRS, l'Observatoire de Paris-PSL et l'Observatoire de la Côte d'Azur.

EUROPE

Le 31 janvier, le Conseil européen de la recherche (ERC) a annoncé les nouveaux lauréats des bourses « Consolidator », qui soutiennent chaque année de nombreux projets de scientifiques en milieu de carrière. Institution hôte pour 17 bourses (sur les 31 attribuées à la France), le CNRS présente un taux de succès de 20 %, soit sa deuxième meilleure performance depuis 2014 (25 %). Une semaine auparavant, l'ERC avait dévoilé les projets retenus pour le dernier appel 2022 « Proof of concept ». Celui-ci s'adresse aux scientifiques qui ont déjà été lauréats d'une bourse ERC (Starting, Consolidator, Advanced ou Synergy) moins d'un an auparavant et qui souhaitent valoriser les résultats de leur recherche, développer leur potentiel d'innovation et se rapprocher d'un marché. Au total, le CNRS compte 11 projets lauréats en 2022 contre 7 en moyenne sur les trois dernières années.

PARTENARIAT

Le 20 janvier, Antoine Petit, président-directeur général du CNRS, et Pascal Leroux, président de Le Mans Université, ont signé une nouvelle convention partenariale. Cette convention engage, pour les cinq années à venir, les deux établissements à conduire ensemble une politique scientifique commune au sein de 11 structures partagées, notamment au sein des 6 laboratoires de recherche en cotutelles. L'acoustique, les matériaux et molécules, les sciences humaines et sociales, la géologie et les mathématiques font partie des grands sujets de collaboration au sein de ces unités.

Contre le cancer, des traitements ciblés en ligne de mire

VIVANT



MATIÈRE



SANTÉ Élaborées dans les laboratoires du CNRS et des start-up qui en sont issues, des molécules innovantes laissent entrevoir des traitements contre le cancer plus efficaces.

PAR MATHIEU GROUSSON

Toucher l'ennemi au cœur, avec force et sans dommage collatéral. C'est le credo des thérapies ciblées contre le cancer. Leur principe : un agent cytotoxique transporté par un vecteur capable de se fondre dans la circulation sanguine et de délivrer sa charge médicamenteuse une fois parvenu au sein des cellules tumorales ou dans leur environnement proche. L'idée, qui remonte aux années 1980, commence depuis une dizaine d'années à porter ses fruits, et une poignée de médicaments sont ainsi déjà disponibles.

Première stratégie :

les conjugués anticorps-médicaments (ADC)

La stratégie de vectorisation la plus avancée à ce jour est celle des conjugués anticorps-médicaments (ADC). Elle consiste à lier une molécule cytotoxique à une grosse molécule biologique – un anticorps monoclonal – capable de se fixer de manière spécifique sur un site de cellules cancéreuses. Une fois à destination, le lien chimique entre l'anticorps et le médicament est rompu, par exemple par des enzymes présentes dans l'environnement tumoral, rendant sa capacité d'action au toxique.

Le premier traitement fondé sur un conjugué, ciblant les lymphomes, a été autorisé en 2011. Aujourd'hui, une dizaine sont accessibles. Néanmoins, de par la spécificité de chaque tumeur, le développement de ces conjugués nécessite encore un large front de recherche et d'innovation. Ainsi, au laboratoire de Conception et application de molécules bioactives¹, Alain Wagner et son équipe se sont fait une spécialité de la chimie de précision qui permet de lier une molécule active à son « transporteur ». « *L'enjeu est de parvenir à maîtriser combien de molécules de médicaments on attache sur un anticorps, comment, et comment on relargue* », résume le chimiste. Ainsi, en 2013, ces chercheurs sont parvenus à mettre au point un protocole pour assurer la durabilité dans le temps d'un conjugué.

Comme l'explique Sasha Koniev, alors doctorant au laboratoire et désormais directeur de la start-up Syndivia, créée en 2014 afin d'exploiter cette découverte, « *les procédés chimiques classiques de bio-conjugaison conduisent à des liaisons dont la stabilité n'est pas durable. Or c'est pro-*

blématique pour traiter des tumeurs solides, plus difficiles d'accès, qui nécessitent que le conjugué demeure plusieurs jours dans la circulation sanguine pour avoir un effet ». Baptisé APN linker, le procédé a été breveté en 2014. En collaboration avec une société française, Syndivia le met à profit pour la réalisation de conjugués faisant depuis 2020 l'objet d'un essai clinique pour le traitement de cancers du sang et de la moelle osseuse. Par ailleurs, « *nous cherchons également à greffer deux agents actifs sur un seul anticorps dans le but de renforcer la toxicité du médicament* », détaille Alain Wagner.

De son côté, Mouad Alami, chercheur au laboratoire Biomolécules : conception, isolement et synthèse² (BioCIS), s'intéresse depuis une quinzaine d'années à une molécule naturelle, la combrétastatine, connue pour avoir un fort effet anti-tumoral et anti-vasculaire. Malheureusement, instable, elle se transforme rapidement en une autre molécule cent fois moins toxique. Des milliers d'analogues ont été proposés, mais sans résultat probant. Jusqu'à ce que le chimiste effectue en 2007 une modification, brevetée la même année, de la structure de la molécule. Bonne pioche : non seulement la molécule devient parfaitement stable, mais son pouvoir cytotoxique demeure intact. « *Cette très grande stabilité chimique, notamment en environnement très acide, tel que dans l'estomac, laisse entrevoir la possibilité d'une administration par voie orale, ce qui serait beaucoup moins lourd pour les patients qu'une administration intraveineuse* », explique le chercheur.

Seconde stratégie : les prodrogues synthétiques

En parallèle des ADC, une autre catégorie de traitements ciblés est en train de voir le jour : les prodrogues synthé-

1. Unité CNRS/Université de Strasbourg. 2. Unité CNRS/Université Paris-Saclay. 3. Unité CNRS/Université Paris-Saclay.



© SCIENCE PHOTO LIBRARY / ELLA MARU STUDIO

► Illustration de conjugués anticorps-médicaments (ADC). Les anticorps (en orange) sont liés à des molécules cytotoxiques.

tiques. L'idée : vectoriser l'agent cytotoxique non pas à l'aide de grosses molécules biologiques, mais grâce à des molécules de synthèse. À l'Institut Galien Paris-Saclay³, Patrick Couvreur, lauréat de la médaille de l'innovation du CNRS en 2012, est un pionnier des prodrogues. Dès le début des années 2000, il s'intéresse en particulier au squalène, un lipide naturel présent notamment dans l'huile de foie de requin. Après couplage du squalène à des molécules médicamenteuses, la prodrogue qui en résulte forme spontanément des nanoparticules en milieu aqueux pouvant incorporer jusqu'à 50 % en masse de médicament. En 2017, son équipe démontre qu'une fois dans la circulation sanguine, ces assemblages interagissent avec des lipoprotéines qui sont les transporteurs naturels du cholestérol, dont le squalène est un précurseur. Résultat : elles sont préférentiellement vectorisées vers des cellules tumorales qui se gavent de lipoprotéines pour leur croissance.

Julien Nicolas, directeur de recherche CNRS et aujourd'hui à la tête de cette équipe, propose désormais des nanoparticules de prodrogues formées à partir de polymères synthétiques biocompatibles. Avec un procédé de synthèse simple, consistant à faire croître le polymère de manière contrôlée, directement à partir du principe actif. Une fois ces nanoparticules sur site, une réaction chimique permise par l'environnement tumoral clive le lien entre le polymère transporteur et le médicament qui

retrouve alors son pouvoir cytotoxique. Ainsi, les chercheurs ont formé différentes prodrogues qui ont montré une efficacité anticancéreuse importante chez la souris. Certaines versions permettent même de véhiculer plusieurs principes actifs simultanément.

Dernièrement, le chimiste a développé une version hydrophile de ces prodrogues qui se trouvent alors complètement solubilisées dans le plasma sanguin. « Notre idée est d'une part la possibilité d'une injection sous-cutanée, facile à pratiquer et plus confortable pour le patient, et d'autre part l'obtention d'un effet réservoir du fait d'une libération lente du principe actif dans l'organisme en jouant sur la nature de la liaison chimique entre le médicament et le polymère. Cette prodrogue peut en effet demeurer plusieurs jours dans la circulation sanguine avant son excrétion », explique le chercheur.

Pour pousser plus loin ces nouveaux concepts, Julien Nicolas a contribué à créer en 2019 la start-up Imescia : « une première levée de fonds a permis de réaliser une série d'essais précliniques sur des modèles animaux, et nous espérons démarrer des essais cliniques d'ici un à deux ans ». Un exemple parmi d'autres des efforts produits par les chimistes du CNRS pour renforcer l'arsenal thérapeutique contre le cancer, qui demeure la première cause de mortalité en France. ▮



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

Un algorithme pour éviter les débris spatiaux

UNIVERS

NUMÉRIQUE

Depuis 1957 et le lancement du premier satellite Spoutnik, la conquête spatiale a révolutionné nos modes de vie. Mais elle a dans le même temps transformé la banlieue de la Terre en un immense dépotoir de débris de toutes sortes et de toutes tailles : satellites inactifs, étages de fusée, boulons, outils perdus par des astronautes... Ces débris, relâchés pendant les missions ou issus de fragmentations provoquées par une explosion ou une collision, encombrant essentiellement deux régions autour de notre planète : les orbites basses – entre 200 et 2 000 km d'altitude – et l'orbite géostationnaire, à 36 000 km d'altitude. On estime à 36 000 le nombre d'objets de plus de 10 cm – parmi lesquels quelques milliers seulement de satellites encore actifs –, 1 million mesurant entre 1 et 10 cm et 130 millions moins de 1 cm. Pour les satellites en activité et les missions habitées, la menace est bien réelle, à l'image du satellite américain Iridium 33 qui s'est totalement désintégré après être entré en collision en 2009 avec un vieux satellite russe, Kosmos 2251, qui l'a percuté à 42 000 km/h !

Aujourd'hui, le danger est pris très au sérieux par les agences spatiales et les opérateurs privés qui surveillent en permanence les satellites et modifient la trajectoire de leurs engins en cas de risque trop important. La Station spatiale internationale par exemple, doit être manœuvrée plusieurs fois par an pour éviter une collision potentielle.

Modéliser des trajectoires incertaines

« Dans ce contexte, il est devenu crucial d'évaluer le plus finement possible le risque de collision de manière à prévenir de tels rapprochements, tout en évitant au maximum les fausses alertes car les manœuvres d'évitement sont des opérations longues et coûteuses », note Florent Deleflie de l'Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides¹. Dans ce sens, des équipes du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (Laas-CNRS), en collaboration avec le Laboratoire de l'informatique du parallélisme², ont développé un algorithme désormais utilisé par le Centre national d'études spatiales (Cnes) pour évaluer le risque sur ses satellites, et qui a fait preuve d'une grande efficacité.

Mais comment s'y prend-on exactement pour mesurer un risque d'impact ? À partir d'un catalogue, constitué essentiellement par le réseau de surveillance spatiale des États-Unis, repérant la position des débris de plus de 10 cm

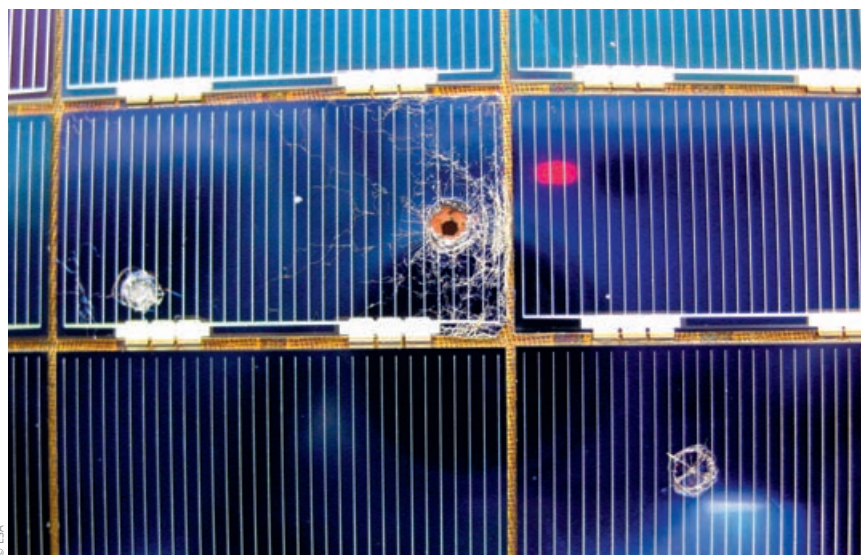
INFORMATIQUE Une équipe de recherche du CNRS développe un programme informatique pour calculer en temps réel le risque de collision entre un satellite et un débris en orbite.

PAR JULIEN BOURDET

– les plus dangereux –, on peut prolonger leurs orbites et prédire où ils se situeront dans le futur. « Les trajectoires des débris comme des satellites ne peuvent pas être connues avec exactitude longtemps à l'avance du fait des erreurs de mesure par les radars et les télescopes au sol, et aussi à cause de la difficulté de bien modéliser toutes les perturbations qui affectent l'environnement spatial, tel le frottement atmosphérique pour les orbites basses », explique Denis Arzelier, du Laas, coauteur de l'algorithme.

Dit autrement, la trajectoire d'un objet spatial est comprise dans un tube, qui est d'autant plus large que ces incertitudes sont grandes. Évaluer un risque de collision revient alors à calculer la probabilité que les deux tubes se croisent à un moment donné. « Mathématiquement parlant, cette probabilité est ainsi définie comme une intégrale en deux dimensions d'une distribution gaussienne ».

Les cellules solaires, comme ici celles du télescope spatial Hubble, subissent de nombreuses dégradations dont de violents impacts de météorites.



1. Unité CNRS/Observatoire de Paris-PSL. 2. Unité CNRS/ENS Lyon/Université Claude Bernard.



© FRAMESTOCK / STOCK.ADOBE.COM

sienne – la fameuse courbe en cloche représentant un jeu de données aléatoires – sur un disque », précise Mioara Joldes, du Laas, coauteure des travaux. Les acteurs du spatial se sont tous entendus sur cette définition et ont établi un seuil pour cette probabilité au-delà duquel il convient d'effectuer une manœuvre d'évitement : 1 sur 10 000.

Un algorithme plus fiable, plus rapide et plus précis

Dès que le risque franchit cette valeur pour un satellite donné, le réseau de surveillance américain lance le premier une alerte à l'opérateur du satellite en question. La plupart du temps, au fur et à mesure que les trajectoires des deux objets sont mises à jour, l'alerte est levée. Mais si le risque reste important, les équipes d'analystes calculent plus en détail la probabilité de collision. « *Il faut que le calcul de cette probabilité, c'est-à-dire de cette intégrale, soit le meilleur possible pour ne pas introduire d'erreur supplémentaire. Et c'est là que nous avons apporté une contribution majeure : notre algorithme améliore nettement la précision du calcul et qui plus est, il nécessite moins de temps de calcul que la plupart des autres méthodes* », se félicite Mioara Joldes. Les tests menés au Cnes sur une base de données d'un très grand nombre de cas réels ont pu le démontrer.

Pour mettre au point leur algorithme, les chercheurs ont utilisé des techniques mathématiques de calcul dit symbolique-numérique, un domaine qui vise à améliorer l'efficacité et la fiabilité des calculs numériques sur ordinateur. Contrairement aux autres méthodes utilisées jusqu'ici, l'algorithme consiste à effectuer une série d'opérations simples sur une suite de nombres. Résultat : le calcul offre une meilleure garantie de précision – au sens du nombre de chiffres corrects – et il est plus facile à implémenter sur une machine.

▼ On estime le nombre d'objets en orbite à plus de 131 millions, dont 36 000 mesurent plus de 10 cm – parmi lesquels quelques milliers seulement de satellites encore actifs.

Depuis 2021, l'algorithme est d'ailleurs intégré au logiciel de vol Astéria développé par le Cnes, à bord du mini-satellite expérimental de l'Agence spatiale européenne, OPS-SAT. Les tests, menés sur des cas simulés de collisions potentielles, ont là encore prouvé la fiabilité du programme informatique. Cette démonstration pourrait ainsi ouvrir la voie à une plus grande autonomie en vol des satellites dans le futur.

Le défi des constellations de satellites

À terme, en effet, les satellites pourraient eux-mêmes évaluer de manière automatique le risque de collision à chaque alerte et calculer si besoin la manœuvre d'évitement. Un gain de temps considérable, un impératif même devant l'augmentation sans précédent du nombre de lancements de satellites, principalement en orbite basse. Et la situation va aller en empirant avec le déploiement progressif de gigantesques constellations de satellites par des acteurs privés, tels les projets Starlink ou OneWeb, principalement destinées à assurer une couverture mondiale de l'Internet haut débit. « *Nous ne savons pas encore modéliser le problème dans le cas d'un débris pouvant potentiellement entrer en collision avec une constellation d'un millier de satellites. C'est la question sur laquelle se focalisent actuellement toutes les recherches* », avoue Mioara Joldes. Après le succès de leur premier algorithme, nos chercheurs réfléchissent déjà à de nouveaux outils pour trouver une solution au problème posé par ces embouteillages d'un nouveau genre. II



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

Le CNRS, moteur d'innovation

En janvier, Sylvie Retailleau, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, a annoncé les résultats de l'appel à propositions « maturation-prématuration » de France 2030. Dix consortia impliquant le CNRS sont lauréats.

PAR LAURENCE STENVOT

Lancé dans le cadre du plan d'investissement France 2030¹ en décembre 2021, l'appel à propositions « maturation-prématuration » soutient le cycle de l'innovation dans les stratégies nationales d'accélération. Dans ce cadre, l'État va allouer 275 millions d'euros à 17 consortia lauréats. Quatre consortia coordonnés par le CNRS ont été retenus : Batteries ; Décarbonation de l'industrie ; Recyclabilité, recyclage et réincorporation des matériaux ; Technologies quantiques. L'organisme est également partenaire de six consortia lauréats : Maladies infectieuses émergentes et menaces ; Biothérapies et bio-production des thérapies innovantes ; Santé numérique ; Produits biosourcés et carburants durables ; Hydrogène décarboné ; Industries culturelles et créatives.

Des programmes ambitieux

« Prématuration et maturation des projets issus des laboratoires publics de recherche sont les deux éléments indispensables à la croissance du nombre de projets deeptech menant à la création de nouvelles start-up et à la régénération de notre tissu industriel dans les domaines à fort potentiel de développement. Nous sommes donc parfaitement alignés avec la stratégie définie par le CNRS dans son contrat d'objectifs et de performance », rapporte Jean-Luc Moullet, directeur général délégué à l'innovation du CNRS.

L'objectif de ces programmes est de lever des verrous d'ordre technico-économique pour valoriser des résul-

tats de recherche issus de la recherche publique et aller vers une preuve de concept, puis vers un prototype. « Le CNRS propose un programme de prématuration depuis 2014, piloté par CNRS Innovation, sa structure nationale de transfert de technologie. Il possède donc une expertise dans ce domaine avec plus de 300 projets financés pour un montant engagé supérieur à 34 M€ », souligne Feriel Hamdi, responsable du pôle partenariats et financements prématuration à CNRS Innovation. Quant à la maturation, elle se fait « en complémentarité et en interaction » avec les Sociétés d'accélération du transfert de technologies (Satt).

L'organisme s'est positionné sur des thématiques liées aux Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR), dont il est pilote ou copilote et où il dispose d'une réelle expertise. « Le consortium Batmat, qui concerne la stratégie d'accélération Bat-

teries, et dont le CNRS est leader, est par exemple composé de seize partenaires tels que le CEA, l'université Grenoble-Alpes, l'université Paris-Saclay ou encore la SATT Linksium ».

Une coordination renforcée

« Pour répondre à cet appel à propositions, les universités, les écoles d'ingénieurs et les organismes nationaux de recherche ont réalisé un travail remarquable d'harmonisation et de coordination, souligne Jean-Luc Moullet. Nous avons cherché des solutions simples afin de respecter les contraintes des uns et des autres, tout en offrant aux personnels de recherche un point d'entrée et une méthodologie unique pour accompagner la mise en œuvre et le financement de leurs projets. »

Les partenaires des consortia doivent « attester d'un engagement et d'une expérience significative » d'investissement et d'accompagnement en prématuration et maturation de projets, et démontrer leur « capacité à poursuivre leur intervention dans ces mêmes champs ». Sur l'ensemble de ces points, le CNRS est un acteur fort : « Les services de partenariat et valorisation du CNRS font le lien avec l'écosystème local et assurent l'identification des projets. Les experts PEPR en lien avec les instituts scientifiques du CNRS apportent leur expertise thématique et l'analyse scientifique des projets. CNRS Innovation analyse l'aspect valorisation des projets tout en pilotant et articulant les programmes de prématuration, et les Satt assurent le montage d'un projet de maturation de long terme pouvant conduire à une création de start-up ou à un transfert vers un industriel », analyse Feriel Hamdi.

▲ Le Laboratoire de physique de l'ENS héberge la start-up C12 Quantum Electronics, qui développe des processeurs quantiques de haute fidélité.



© H. RAGUET / C12 QUANTUM ELECTRONICS / L'EPHE / CNRS PHOTOTHÈQUE



Lire l'intégralité de l'article sur [cnrs Info](#)

1. Avec 54 Md€, ce plan doit permettre de rattraper le retard industriel français, d'investir massivement dans les technologies innovantes ou encore de soutenir la transition écologique.

Ce que les nanoparticules font à nos cellules

► Billes de dioxyde de titane (TiO_2) observées au microscope électronique à balayage (MEB, grossissement x 2000, fausses couleurs).

Depuis la fin des années 1990, les nanoparticules manufacturées se sont largement répandues dans notre environnement quotidien. Fabriquées à partir notamment de métaux (titane, argent...) mais aussi de carbone, de polymères ou encore de molécules organiques (lipides, peptides...), ces substances ont, par définition, des dimensions comprises entre 1 et 100 nanomètres¹, et sont donc plus de 10 000 fois plus petites qu'un grain de sel fin.

Cette taille réduite fait que leur surface d'échange est importante par rapport à leur volume, ce qui leur confère des caractéristiques spéciales en termes de résistivité, de conductivité électrique, de solubilité ou de réactivité chimique. D'où le fort intérêt des industriels pour les nanoparticules et leur succès depuis leur déploiement. Revers de la médaille, la petite taille de ces substances est aussi à l'origine de fortes inquiétudes concernant leurs possibles effets sur la santé.

Plusieurs troubles et maladies suspectés

« En raison de leurs petites dimensions, les nanoparticules peuvent traverser différentes barrières physiologiques, comme celle séparant le cerveau de la circulation sanguine (barrière hémato-encéphalique), la peau ou le placenta qui protège le fœtus, et ainsi se répartir dans l'organisme », éclaire Aurélie Niaudet, ingénieure chimiste à la Direction

VIVANT



MATIÈRE



CHIMIE Depuis quelques années, les nanoparticules ont envahi notre environnement quotidien... Pour mieux appréhender leur impact sanitaire, plusieurs études se sont intéressées à leurs effets sur notre organisme et nos cellules.

PAR KHEIRA BETTAYE

d'évaluation des risques de l'Anses, une agence nationale chargée de s'assurer de la sécurité sanitaire de l'alimentation, et qui a publié en 2020 un rapport² consacré aux « Nanomatériaux dans les produits destinés à l'alimentation ». Mais que sait-on à ce jour des potentiels dangers sanitaires ?

« Plusieurs études chez l'animal indiquent que certaines nanoparticules peuvent s'accumuler dans différents organes et avoir plusieurs conséquences, dont notamment des retards de croissance, des anomalies dans le développement, des allergies, des effets délétères sur le système nerveux ou encore des cancers », synthétise Aurélie Niaudet. Par exemple concernant le dioxyde de titane (additif E171), destiné à donner une couleur blanche aux viennoiseries et confiseries, une étude sur le rat³ publiée en 2017 par des

1. 1 nm = 10^{-9} m = 0,000000001 m 2. <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2016SA0226Ra.pdf> 3. S. Bettini et al., *Scientific Report*, jan. 2017. DOI : 10.1038/srep40373.



chercheurs franco-luxembourgeois a montré qu'une exposition orale chronique à ce composé a pu induire des lésions précancéreuses dans le côlon, chez 40 % des animaux exposés. Cela a conduit à son interdiction en France dès 2020, puis en Europe depuis janvier 2022.

Une analyse sur les nanoparticules métalliques

Au laboratoire Matière et systèmes complexes⁴, l'équipe de Florence Gazeau, physicienne, travaille justement sur cet axe de recherche. « Afin de comprendre les possibles méfaits des nanoparticules métalliques sur les cellules vivantes, il faut au préalable mieux appréhender leur devenir dans ces mêmes cellules », souligne-t-elle. Lors de travaux⁵ publiés en 2019 – auxquels Alice Balfourier, désormais chercheuse au Laboratoire de biomolécules⁶, a participé dans le cadre de sa thèse – les chercheurs sont arrivés à un résultat surprenant. Ils ont suivi, six mois durant, les biotransformations de nanoparticules d'or capturées par des fibroblastes (les cellules du tissu conjonctif). Cela en combinant l'imagerie par microscopie électronique à transmission (une technique de microscopie dont la résolution peut atteindre 0,08 nanomètre) et l'étude de l'expression de plus de 18 000 gènes au cours du temps.

Alors que jusque-là, il était communément admis que les nanoparticules d'or restaient indéfiniment intactes dans le lysosome (une structure qui fait office de déchetterie dans la cellule), il est apparu que ces substances subissent en fait, en quelques semaines, une dégradation puis une recristallisation de l'or en une structure en nano-feuillets... Un phénomène qui avait déjà été observé pour les ions d'or. Ce qui indique, point important, que l'impact des nanoparticules d'or sur les cellules dépend plus de la

nature du métal les constituant que de leur nature nanoparticulaire. Des travaux parus en septembre dernier⁷ ont prolongé cette première étude : « Nous voulions savoir si notre découverte surprenante concernant l'or, à savoir que les cellules répondent de façon similaire à ce métal qu'il soit sous forme d'ions ou de nanoparticules, pouvait concerner d'autres métaux », explique Florence Gazeau.

Cette fois, les chercheurs ont étudié la réponse moléculaire de cellules humaines à des nanoparticules issues de huit métaux différents : or mais aussi cadmium, cuivre, fer, platine, argent, titane et zinc. « Notre but précis était de comparer la réponse des cellules humaines à ces différents éléments, en termes d'expression des gènes et donc de production de protéines. Cela, afin de voir si cette réponse cellulaire était similaire ou variait selon la nature des métaux et leur formulation », précise Alice Balfourier. Les chercheurs ont réalisé une méta-analyse de 56 études. Lesquelles concernaient le niveau d'expression de plusieurs milliers de gènes (14 912 au total) dans différents types de cellules (de peau, de foie, de muscles...) exposées à des ions ou des particules métalliques pendant 1 à 24 heures.

► Microsphère de silicium d'une crème solaire vue au microscope électronique à balayage (MEB, grossissement x16000 et fausses couleurs).

Une conclusion généralisée aux huit métaux étudiés

Il en est ressorti que pour tous les métaux susmentionnés, les gènes surexprimés après exposition des cellules étaient toujours plus ou moins les mêmes, que les cellules aient été mises en présence d'ions ou de nanoparticules dérivant de ces métaux. « Ce résultat généralise à tous les métaux étudiés ce que l'on a découvert pour l'or en 2019 : les cellules sont plus sensibles aux ions métalliques libérés par les nanoparticules qu'aux propriétés structurales intrinsèques de ces nanoparticules, comme leur taille ou leur forme », développe Alice Balfourier.

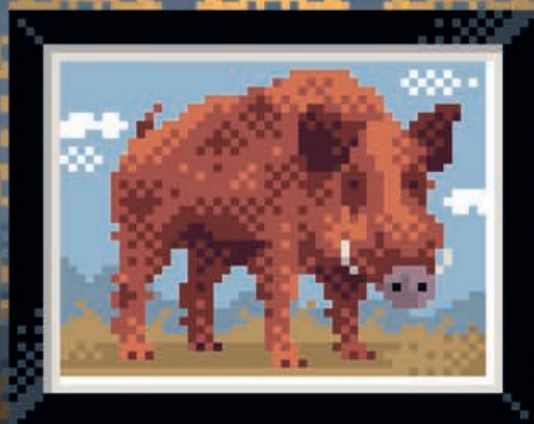
Mais ce n'est pas tout ! L'équipe a aussi observé que pour cinq des huit métaux étudiés (cadmium, cuivre, or, argent et zinc), les nanoparticules déclenchent des réactions biochimiques similaires au niveau des cellules. En effet, « pour les nanoparticules à base de ces cinq métaux, nous avons noté une surexpression d'un même ensemble de gènes, codant pour les protéines métallothionéines ; lesquelles jouent un rôle primordial dans la régulation des teneurs des cellules en métaux essentiels (cuivre, zinc...) et la détoxification des cellules des métaux non essentiels (argent, cadmium, or...) », détaille la biochimiste.

Pris ensemble, ces résultats indiquent, d'une part, que l'impact des nanoparticules métalliques au niveau cellulaire pourrait être prédit à partir de l'impact de leurs ions constitutifs, souvent mieux élucidé ; et d'autre part, que les métaux constituant les nanoparticules peuvent activer des gènes identiques. De quoi faciliter l'exploration de la toxicité des nanoparticules à l'avenir... II

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

4. Unité CNRS/université Paris Cité. 5. A. Balfourier et al., *PNAS*, 7 jan. 2020. DOI : 10.1073/pnas.1911734116. 6. Unité CNRS/ENS/Sorbonne Université. 7. A. Balfourier, A.-P. Marty et F. Gazeau, *ACS Nanosci*, 30 sept. 2022. doi.org/10.1021/acsnanosci.2c00035.

LES IDÉES



*Où l'on réfléchit aux rapports entre
les humains et les espèces animales,
et à l'importance de nommer
un crime pour le combattre.*

« L'humain a créé les conditions de la surpopulation de sangliers »



© COLL. PERS.

VIVANT



SOCIÉTÉS



ÉCOLOGIE Autrefois rare dans nos campagnes, le sanglier est aujourd'hui considéré comme un nuisible qu'on pourchasse sans relâche. Raphaël Mathevet explique comment les populations de sangliers ont été développées à partir des années 1970, et s'interroge : qu'avons-nous fait de cet animal sauvage ?

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURE CAILLOCE

Vous êtes écologue et géographe au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive¹. Vous avez publié avec Roméo Bondon l'ouvrage *Sangliers, géographies d'un animal politique*. Pourquoi vous êtes-vous intéressés à cet animal mal-aimé ?

Raphaël Mathevet. Il y a cinquante ans encore, le sanglier était un animal difficile à voir, qui représentait l'espèce sauvage par excellence et fascinait les naturalistes autant que les chasseurs. Ces derniers mesuraient volontiers leur bravoure en s'affrontant à cet animal farouche, dangereux, qui n'hésitait pas à attaquer leurs chiens ; dans la mythologie grecque, combattre un sanglier était d'ailleurs l'un des douze travaux d'Hercule ! Aujourd'hui, le sanglier semble omniprésent, au bord des routes, dans nos villes même. Partout où nos travaux en écologie nous mènent, du massif des Écrins aux Cévennes, en passant par la Camargue, on ne nous parle que de lui et des dégâts qu'il occasionne.

Nous voyons également fleurir les contentieux entre fédérations de chasseurs et aires protégées : les



À lire :
Sangliers, géographies d'un animal politique, Raphaël Mathevet et Roméo Bondon, Actes Sud, coll. « Mondes sauvages », oct. 2022, 208 p., 22 €. Version numérique 16,99 €.

premiers accusant les secondes d'être un refuge pour les sangliers. On ne le voit plus comme une espèce sauvage, mais comme une masse animale indistincte qu'il faut réguler, en intensifiant les battues et les actes de chasse. Plus personne ne semble s'intéresser à l'animal, ni ne prend sa défense comme on peut le voir pour l'ours ou pour le loup – pas même les naturalistes. Nous avons voulu comprendre comment il avait pu changer de statut aussi vite et ce qu'il dit de notre rapport à la nature.

Sait-on combien il y a de sangliers en France, aujourd'hui ?

R. M. Les comptages de populations animales sauvages sont toujours difficiles à effectuer, aussi le seul moyen d'appréhender la taille des

populations de sangliers est de se référer aux tableaux de chasse. À l'échelle nationale, on décompte un peu plus de 800 000 individus abattus en 2021, contre 35 000 environ au début des années 1970 – soit 20 fois plus. Sur cette base, on estime que la population de sangliers pourrait compter aujourd'hui environ 2 millions d'individus.

Autrefois, le sanglier était surtout présent dans l'espace forestier, mais aujourd'hui, on le retrouve dans tous les milieux : en bord de mer, en plaine, en montagne jusqu'à 3 500 mètres d'altitude, et bien sûr en milieu urbain, notamment en période de sécheresse, où il profite des parcs et jardins arrosés. Le sanglier est un animal omnivore qui possède une très grande capacité d'adaptation.

1. Unité CNRS/EPHE/IRD/Université de Montpellier.



Pourquoi cette explosion ?

R. M. Plusieurs facteurs se combinent. La disparition des prédateurs comme le loup et le lynx dans la première moitié du XX^e siècle est une partie de l'explication. Le recul des espaces agricoles dans les milieux les moins propices à la culture, en moyenne montagne par exemple, et l'augmentation de la surface forestière qui en résulte en sont une autre – les forêts qui couvrent aujourd'hui 30 % de la surface de l'Hexagone offrent en effet des refuges et des ressources alimentaires prisés des sangliers, comme les champignons, les glands, les faines (*le fruit du hêtre*, ndlr)...

Le changement climatique, avec ses hivers plus doux, entraîne également moins de mortalité naturelle chez ce mammifère. Mais l'événement majeur, c'est la modernisation de l'agriculture. L'arrachage des haies, l'utilisation d'insecticides et la mécanisation ont entraîné la quasi-disparition du petit gibier dans l'espace agricole, comme les lièvres, lapins, perdrix, faisans...

En quoi la disparition du petit gibier peut-elle expliquer la propagation du sanglier ?

R. M. À la fin des années 1960, la chasse était devenue une véritable activité de loisirs et ne comptait pas moins de 2 millions de pratiquants, un record. Mais la disparition du petit gibier, cible de prédilection des chasseurs, menaçait la pérennité de l'activité. L'idée est alors apparue de développer les populations de grand gibier, tout particulièrement de sangliers, afin de proposer de nouvelles proies aux chasseurs.

Pour ce faire, plusieurs mesures ont été mises en place. Tout d'abord l'élevage, qui a permis de faire des lâchers d'individus dans des milieux où le sanglier n'était pas ou plus présent, mais aussi le nourrissage des animaux : du grain et des légumes abîmés ont été mis à leur disposition, ainsi que de l'eau pour s'abreuver. Une chasse dite « conservatrice » s'est aussi mise en place, qui évitait de tuer les mâles reproducteurs et les laies dominantes,

► On estime à environ 2 millions le nombre de sangliers en France.

garantes de la cohésion des compagnies (groupes) de sangliers.

Dans le livre, vous évoquez également l'hybridation volontaire de sangliers avec des cochons domestiques...

R. M. En effet. Pour augmenter la capacité reproductive des populations de sangliers, on a encouragé l'hybridation de sangliers mâles avec des porcs domestiques femelles – produisant ce qu'on appelle communément des « cochongliers ». La truie, la femelle du porc domestique, met en effet bas de 8 à 10 petits, contre 4 à 6 seulement pour la laie... À travers toutes ces pratiques, le sanglier a été pour ainsi dire « cynégétisé » : on a fait de lui, non plus une espèce sauvage, mais une espèce-gibier transformée par la chasse et pour la chasse.

Quand est-ce que la situation est devenue hors de contrôle ?

R. M. Il faut savoir qu'en France, ce sont les chasseurs qui dans chaque département ont la charge de la



© SYLVAIN CORDIER / BIOSPHOTO

► Des sangliers suivent leur éleveur dans un pré de Franche-Comté, en 2009.

gestion des populations de sangliers – les agriculteurs ont en effet perdu dans les années 1960 le droit d'affût qui les autorisait à tirer sur l'animal en cas de dégâts sur les cultures. En contrepartie, les fédérations de chasse se sont engagées à indemniser les agriculteurs. Le système a commencé à souffrir dès les années 1990, lorsque les dégâts agricoles causés par les sangliers ont commencé à sensiblement augmenter, mais à l'époque les chasseurs étaient encore suffisamment nombreux pour dédommager les agriculteurs. Dans les années 2000, cependant, les dégâts sont passés de quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'euros, et les trésoreries des fédérations se sont retrouvées très fragilisées...

Et aujourd'hui, à combien se montent les dégâts causés par le sanglier ?

R. M. Les dégâts agricoles totalisent 35 millions d'euros par an. Les cultures les plus touchées sont les champs de maïs ou de céréales. Les sangliers posent aussi problème aux éleveurs car ils retournent la terre des prairies où pâturent les bovins. Sans oublier les jardins saccagés en milieu périurbain... Il faut ajouter à cela près de 30 000 collisions routières, un chiffre qui s'explique par la hausse du nombre de sangliers, mais aussi par l'extension du réseau routier en France – nous avons aujourd'hui plus

d'1 million de kilomètres de routes ! Il ne faut pas perdre de vue que les dégâts causés par les sangliers s'expliquent aussi par l'omniprésence des infrastructures humaines sur le territoire.

Un plan national de maîtrise du sanglier a été mis en place en 2009. En quoi consiste-t-il ?

R. M. Depuis 2009, le nourrissage des sangliers est théoriquement interdit, de même que l'élevage à des fins de lâchers dans la nature. Mais dans les faits, ces pratiques n'ont pas disparu et il y a encore beaucoup de tolérance dans certaines régions... J'en ai été encore le témoin très récemment. En parallèle, on a énormément augmenté la pression de chasse sur cet animal désormais considéré comme un nuisible. Il faut savoir que la période légale de chasse – du 15 septembre au 31 mars – ne s'applique pas au sanglier.

De nombreuses dérogations sont accordées, qui permettent de le traquer jusqu'à 10 mois sur 12 dans les départements les plus problématiques. C'en est fini également de la sélection du gibier abattu : désormais, on demande aux chasseurs de « réguler », c'est-à-dire de prélever un maximum d'animaux, vieux, jeunes, mâles, femelles... Comme s'il s'agissait d'une masse indistincte à contrôler, et pas d'individus, des animaux ayant des modes d'existence et une sensibilité propres.

On parle également de battues administratives de plus en plus nombreuses...

R. M. Les battues dites « administratives » sont des battues organisées sur décision du préfet, et dirigées par un corps spécial, le corps des lieutenants de louveterie. De plus en plus nombreuses, ces battues sont depuis quelques années organisées jusque dans les réserves naturelles, accusées d'offrir un refuge aux sangliers, ce qui n'est pas sans poser des questions d'éthique : c'est quoi, un espace protégé qui ne protège que certains animaux et pas d'autres ? Comment gérer le dérangement de la chasse dans un espace censé assurer la quiétude des espèces menacées ? Les tensions dans les territoires sont aujourd'hui palpables. Même les chasseurs, dont l'effectif vieillissant est en diminution, sont divisés sur la question : certains ont l'impression d'être devenus des agents de destruction massive et disent ne pas se retrouver dans cette gestion de masse.

Dans le livre, chaque chapitre s'ouvre sur un court texte écrit à hauteur d'animal : on le retrouve dans son milieu, cherchant de la nourriture, poursuivi par les chasseurs... Pourquoi ce choix ?

R. M. Le perspectivisme animal est de plus en plus mobilisé par les philosophes, et « parle » aux naturalistes



© PHILIPPE AINASSAN / PHOTOPIRE / NICE MATIN / MAXPPP

que nous sommes, Roméo Bondon et moi-même : pour pouvoir observer un animal et en tirer des connaissances, le naturaliste essaie de penser comme lui, afin d'anticiper comment il va se comporter, où il va aller... Se placer du point de vue de l'animal, c'est peut-être ce qui a été oublié et manque dans la gestion du sanglier.

“On demande aux chasseurs de «réguler», c'est-à-dire de prélever un maximum d'animaux, vieux, jeunes, mâles, femelles...”

Aujourd'hui, on entend principalement le discours cynégétique, celui des chasseurs donc, celui des agriculteurs victimes des dégâts, et le discours vétérinaire préoccupé exclusivement des maladies que peut

transmettre le sanglier, la peste porcine par exemple. C'est pourquoi nous avons voulu, en plus de faire une analyse objective des faits, subjectiver le discours et nous mettre à hauteur d'animal : qu'est-ce que ça lui fait, à lui, de buter sur les humains et leurs infrastructures dans tous les espaces qu'il fréquente, d'être traqué quasiment partout et en tout temps par les chasseurs ?

À travers l'exemple du sanglier, n'est-ce pas notre rapport à la nature qui est aussi en question ?

R. M. Depuis longtemps, l'humain s'est inscrit dans une démarche gestionnaire de la nature : on veut lutter contre l'incertitude, contrôler les choses. Résultat, on est tout le temps en train d'intervenir, même lorsque l'on prétend vouloir redonner sa place à la nature autonome et spontanée. Et le moins qu'on puisse dire, c'est que ces interventions ne sont pas toujours heureuses.

Le sanglier permet de faire dialoguer des gens très différents autour de la place du sauvage dans nos territoires. Avec Roméo Bondon, nous nous posons la question : comment sortir du contrôle permanent et recréer un lien plus sensible et respectueux à la nature ? Quelle cohabitation peut-on imaginer avec les animaux sauvages et le reste du vivant ? Les réponses apportées aux problèmes locaux liés aux sangliers doivent aussi en passer par ces questionnements. Il s'agit de revisiter nos difficiles rapports à la nature comme à la mort animale. ■

► Sur un rond-point à Saint-Raphaël, dans le Var. On enregistre chaque année en France 30 000 collisions routières avec des sangliers.



À voir, à lire

Semaine du cerveau

En mars, la semaine du cerveau est de retour dans une centaine de pays, pour sa 25^e édition ! Cordonnée en France par la Société des neurosciences, cet événement dont le CNRS est partenaire a pour but de sensibiliser le grand public à l'importance de la recherche sur le cerveau. De nombreuses rencontres sont ainsi organisées dans plus de 120 villes en France, pour partager les dernières avancées sur la mémoire, les émotions, l'apprentissage, ou encore le sommeil.

Semaine du cerveau, du 13 au 19 mars, partout en France. Programme sur <https://www.semaineducerveau.fr>

Neurosciences



Il est l'un des plus grands scientifiques français contemporains, et figure parmi les fondateurs des neurosciences. Jean-Pierre Changeux, lauréat – entre autres ! – de la médaille d'or du CNRS, nous livre ses réflexions sur son parcours, ses travaux et sa

discipline dans cet ouvrage composé d'entretiens avec le philosophe François L'Yvonnet. Un livre passionnant, qui conjugue l'intime avec les théories scientifiques et qui dessine en creux l'évolution de nos connaissances sur le cerveau.

Le beau et la splendeur du vrai, Jean-Pierre Changeux. Entretiens avec François L'Yvonnet, Odile Jacob/Albin Michel, janvier 2023, 351 p., 22,90 €.

Microbes

Trois ans après l'émergence du Covid-19, le biologiste Éric Baptiste réhabilite pour les enfants le monde des microbes, acteur central du vivant. Virus, bactéries et archées présentent en effet d'étonnants (et parfois sympathiques) pouvoirs allant de la nage à la communication en passant pour certains par une



quasi-immortalité. Et comme souvent, les adultes en apprendront beaucoup au passage.

Le monde surprenant des microbes, Éric Baptiste, illustrations de Thomas Tessier, Ed. Circonflexe, nov. 2022, 48 p., 16,50 €.



Féminicide : nommer le crime pour pouvoir le combattre

© MARTIN ZABALA/XINHUA/RÉA

SOCIÉTÉS



Chaque année commence un nouveau décompte. Celui, macabre, du nombre de féminicides perpétrés dans un pays. En France en 2021, 122 femmes ont ainsi perdu la vie¹. Pour nommer l'innomable, le terme « féminicide » est aujourd'hui majoritairement employé dans notre société. Comment s'est-il imposé à nous ? Pour y répondre, l'historienne Christelle Tarau², qui a dirigé l'ouvrage *Féminicides. Une histoire mondiale*, retrace sa généalogie : « Il faut revenir aux années 1970, quand un peu partout, dans le monde occidental, naissent des mouvements de libération de femmes. Dans ce contexte, la chercheuse états-unienne d'origine sud-africaine Diana H. Russell explique que les meurtres de femmes parce qu'elles sont des femmes, en particulier par des partenaires intimes, n'existent pas d'un point de vue criminologique – ils sont associés à une catégorie plus

HISTOIRE De tout temps, sur tous les continents, des femmes ont été tuées parce qu'elles étaient des femmes. Pour étudier la spécificité de ces violences et pouvoir analyser leurs causes, les scientifiques estiment qu'il est crucial de disposer d'un terme permettant de les désigner.

PAR SALOMÉ TISSOLONG



À lire :
Féminicides. Une histoire mondiale,
Christelle Tarau (dir.),
La Découverte, 2022,
928 p., 39 €.

large, celle des homicides. Elle déclare cependant que quand un crime n'est pas nommé, il n'existe pas. Il faut donc forger un concept qui exprime le crime sexo-spécifique. Elle invente alors le terme "féminicide". » Une première phase majeure.

Féminicide et féminicide

« Une nouvelle étape est franchie au début des années 1990, lorsqu'on déterre des centaines de corps de femmes assassinées dans la ville mexicaine de Ciudad

Juárez – située à la frontière des États-Unis », poursuit l'historienne. Ces femmes ont fait l'objet de violences et de mutilations sexuelles, d'actes de barbarie tels que des brûlures à l'acide, des démembrements pré ou post-mortem...

Face à ce désastre, des féministes et des chercheuses latino-américaines se réunissent et Marcela Lagarde y de los Ríos, intellectuelle et femme politique mexicaine, forge un nouveau concept pour dire la spécificité de ce

1. <https://www.vie-publique.fr/en-bref/286154-augmentation-des-feminicides-en-2021>. 2. Enseignante dans les programmes parisiens de Columbia University et de New York University, membre associée du Centre d'histoire du XIX^e siècle (université Paris I Panthéon-Sorbonne et Sorbonne Université).

► L'installation *Zapatos rojos* (chaussures rouges) de l'artiste mexicaine Elina Chauvet, qui l'a conçue en 2009 après que sa sœur a été victime de violences (ici exposée à San Isidro, Argentine, août 2016).

qui est en train de se passer au Mexique : le féminicide. « *C'est une extension du fémicide. Ici il ne s'agit plus du meurtre d'une femme en tant qu'individu, mais d'un crime de masse, d'un crime d'État*, explique Christelle Taraud. *Il s'agit de tuer les femmes en tant qu'identité, en tant que monde, en tant que peuple.* »

Les concepts de fémicide et de féminicide coexistent alors pendant plusieurs années sur le continent américain. Mais quand ils se diffusent en Europe, particulièrement après le mouvement #MeToo, les choses se corsent... « *En fonction des pays, on n'utilise pas le même terme*, précise la chercheuse. *En Norvège par exemple, on parle uniquement de "fémicide". En France, a contrario, on n'emploie que le concept de "féminicide" mais dans une version très réductionniste : on prend le féminicide pour le fémicide. C'est problématique car cela se passe sans compréhension réelle de la généalogie de ces mots et des contextes dans lesquels ils sont nés. De plus, le concept de féminicide a été forgé pour parler d'un crime de masse et d'un crime d'État, et cela disparaît totalement dans la*

réinterprétation que nous faisons du terme... » Si la société française fait consensus autour de ce terme, ce que la chercheuse salue malgré tout, la réalité est plus complexe et porteuse de débats entre spécialistes.

Un continuum de violences

Selon Christelle Taraud, les termes « fémicide » et « féminicide » ne sont cependant pas complètement adaptés pour décrire la réalité : « *Il faut comprendre que les violences faites aux femmes font partie d'un continuum. Il s'agit d'un système d'écrasement, de contrôle et de domination des femmes qui conduit finalement au fémicide et au féminicide. Dans la société, le meurtre physique est préparé par toute une série de discours, de dispositifs et d'institutions...* »

C'est pourquoi le continuum féminicide articule, de la naissance à la mort, toutes les violences faites aux femmes, prenant des formes plus ou moins subtiles et variant selon les sociétés. On peut citer entre autres les traitements différenciés dans les langues – « le masculin l'emporte sur le féminin » –, dans l'éducation, dans les systèmes politiques et religieux, les discriminations économiques, l'humour sexiste, le harcèlement sexuel dans les espaces publics, les insultes, les coups, les mutilations corporelles et sexuelles, les mariages précoces ou forcés, les maternités obligatoires, les avortements et stérilisations forcées, les foeticides et

infanticides au féminin, la contrainte à l'hétérosexualité et la lesbophobie, l'esclavage sexuel, les abus et crimes sexuels, les viols, les assassinats... En s'inspirant des concepts de « continuum de violences sexuelles » et de « continuum de violences de genre » forgés par la sociologue britannique Liz Kelly à la fin des années 1980, Christelle Taraud propose donc le terme de « continuum féminicide » pour décrire cette réalité.

« *Ce continuum a pour but d'assurer sur le très long terme le maintien des systèmes patriarcaux, qui reposent sur un système binaire : la supériorité des uns, l'infériorité des autres. Ils se sont installés très tôt mais n'ont pas toujours eu le même visage* », explique-t-elle. La domination masculine apparaît dès le Néolithique, lors de la sédentarisation des groupes et la domestication de l'ensemble du vivant. Selon l'anthropologue argentine Rita Laura Segato, on observe d'abord des systèmes patriarcaux de basse intensité qui reposent sur une matrice duale, où le féminin et le masculin sont complémentaires – bien que ce dernier ait des privilèges.

« *Puis vont se constituer des patriarcats de haute intensité, à tendance hégémonique*, explique Christelle Taraud. *Ils sont fondés sur une matrice binaire et délégitime tout ce qui est associé au féminin. Ce phénomène émerge essentiellement dans le monde occidental, à partir de la constitution de l'Empire romain, et ne cesse de s'accroître. Plus on approche de la modernité, plus ces systèmes patriarcaux se radicalisent...* » À partir du XV^e siècle en Europe, cette haine des femmes se traduit par des épisodes de violence individuelle, mais aussi collective. Elle évoque le cas des chasses aux « sorcières », dont le but était d'éradiquer une partie importante de la population féminine européenne, et de soumettre le reste des femmes.



À lire :
La Paix des ménages. Histoire des violences conjugales XIX^e - XXI^e siècle, Victoria Vanneau, Anamosa, 2016, 376 p., 23 €.



► Erica Fischer, Lily Boeykens, Diana E. H. Russell et Nicole Van de Ven lors d'une conférence du Tribunal international des crimes contre les femmes à Bruxelles, le 8 mars 1976.

Quid de la justice française ?

En France, les termes désignant les violences de genre, telles que le « féminicide », n'apparaissent pas dans le Code pénal. « *Ils permettent d'identifier socialement un fait, mais n'ont pas de valeur juridique* », explique



▲ Exécution de sorcières, extrait de *La terrible histoire des trois sorcières de Derneburg dans le fief de Reystein am Harz au mois d'octobre 1555*.

Victoria Vanneau ³, historienne du droit. Selon elle, cette absence n'empêche pas pour autant la justice de sanctionner les violences faites aux femmes. Victoria Vanneau explique même que l'institution judiciaire s'est emparée de ces questions dès le XIX^e siècle – même si elles n'étaient pas nommées comme telles.

« Quand j'ai dépouillé les archives judiciaires pour le XIX^e siècle, je n'ai pas trouvé de "violences conjugales". En revanche, j'ai trouvé des meurtres, des assassinats, des coups et blessures. J'ai en fait été confrontée à toute la taxinomie des infractions pénales, qui étaient reconnues et appliquées à l'égard d'un mari qui avait tué ou frappé sa femme, et vice versa, raconte-t-elle. Au moment de la codification du Code pénal, en 1800-1801, les rédacteurs débattaient à propos de l'introduction de la formule du "conjugicide" comme circonstance aggravante. »

Elle ne sera finalement pas retenue, mais la chercheuse relève pourtant une évolution dans la prise en compte de ces violences au fil des ans, attestant d'une prise de conscience de la justice. « Les magistrats ont observé avec de plus en plus d'attention les violences pour pouvoir les qualifier. Ils ont su interpréter et adapter la loi en fonction des faits. Ils ont repéré des habitus, des continuités dans les violences. »

Victoria Vanneau rappelle aussi qu'au XIX^e siècle, le jury était masculin, bourgeois, et peu enclin à ce que la justice se mêle de la vie des couples... « Dans ce contexte, il n'était pas évident d'arriver à faire condamner en majorité les maris qui avaient commis des exactions sur leur femme. Alors, les magistrats ont souvent pratiqué ce qu'on appelle la "correctionnalisation". En diminuant les intentions, ils sont parvenus à faire condamner des coupables qui auraient sans doute été acquittés dans le cas d'une qualification de meurtre. »

“Porté par plusieurs militantes féministes, le projet d'introduction du terme « féminicide » dans la loi fait l'objet de nombreux débats depuis plusieurs années.”

Porté par plusieurs militantes féministes, le projet d'introduction du terme « féminicide » dans la loi fait l'objet de nombreux débats depuis plusieurs années. Victoria Vanneau n'y est pas favorable : « Le Code pénal est très bien fait, il prévoit toutes ces circonstances aggravantes. Faire entrer le féminicide dans le Code pénal serait contre-productif. Juridiquement, c'est inemployable. Il n'y a pas d'unification sur le sens même de ce que "féminicide" veut dire... Faire entrer cette terminologie-là risquerait d'entraîner des interprétations sans fin et aboutirait à des disparités en fonction du lieu et du temps. »

Pour un changement de paradigme

À rebours, Christelle Taraud voit la reconnaissance du féminicide par la loi comme une évidence : « Certes, on peut traiter le féminicide comme un homicide. Mais il faut reconnaître sa spécificité. Si la justice ne reconnaît pas le féminicide comme tel, cela veut dire, d'une certaine manière, qu'elle euphémise le crime. Cela envoie un signe sociétal très mauvais. Je ne comprends pas qu'on ait encore ce débat alors que nombre d'États ont déjà légiféré en ce sens sans que cela ne leur pose de problème particulier. En Amérique latine par exemple, dix-huit États, notamment le Brésil, le Costa Rica, le Chili, le Guatemala, le Mexique et la Colombie ont intégré dans la loi le féminicide⁴. Malgré ces désaccords, je pense qu'on y arrivera en France, c'est le sens de l'histoire », conclut-elle.

Outre la mise en place de systèmes répressifs, quelles solutions existe-t-il pour mettre fin à ces violences ? « La première, c'est le savoir, répond Christelle Taraud. Ce qui est présenté comme un savoir objectif ne l'est pas du tout : il n'y a ni neutralité ni objectivité dans la manière dont l'histoire

3. Docteure en droit et ingénieure de recherche au CNRS, à l'Institut des sciences sociale et du politique (CNRS/ENS Paris-Saclay/Univ. Paris Nanterre), membre de l'Institut des études et de la recherche sur le droit et la justice. 4. <https://tinyurl.com/2tc5ybt2>

humaine a été racontée. Il faut donc prendre conscience que nous nous trouvons devant un véritable désastre planétaire. »

Elle rappelle en effet que le phénomène ne s'arrête pas aux centaines de féminicides par partenaire intime comptabilisés dans les pays européens : pensons par exemple aux 200 millions de femmes mutilées sexuellement dans le monde, ou encore aux 200 millions de femmes qui ne sont pas nées ou sont mortes à la naissance sur le continent asiatique depuis les années 1950, ayant subi des fœticides de masse en Inde ou encore des politiques d'infanticide de filles en Chine...

Les deux chercheuses appellent à un véritable changement de paradigme. Christelle Taraud dénonce la violence sur laquelle sont basés les systèmes patriarcaux. « Il faut révolutionner notre rapport aux régimes de pouvoir, aux régimes de force. Une société véritablement humaine est une société non-violente », précise-t-elle. Victoria Vanneau complète : « Quand on regarde la constitution de notre société, les valeurs prônées par les gouvernements, les valeurs même sportives qui sont des valeurs de performance... Tout ça, ce sont des valeurs masculines. C'est tout un système qu'il faut changer. »

Les deux spécialistes mettent aussi l'accent sur la prévention et l'éducation : « Quand on apprend la haine des uns et des autres dès la petite enfance, quelle que soit la forme que cela prend, on a de fortes chances de reproduire cela plus tard... », développe Christelle Taraud. « Il y a des formes d'éducation des rapports femmes-hommes qui sont à travailler dans tous les niveaux sociaux des classes populaires aux plus aisées », ajoute Victoria Vanneau.

La sororité renforcée, décrite par Rita Laura Segato et Aminata Traoré dans l'ouvrage dirigé par Christelle Taraud, serait aussi un riche outil. Il s'agit de travailler non plus à partir de structures hiérarchiques incarnées par des individus, mais plutôt dans des structures horizontales, collégiales, pouvant constituer des réseaux – locaux, régionaux, continentaux, et pourquoi pas planétaires. ■

► Des milliers d'Iraniennes et Iraniens se dirigent vers la tombe de Mahsa Amini pour lui rendre hommage, 40 jours après son assassinat par la « police de la moralité » (cimetière Aichi à Saqqez, Kurdistan iranien, le 26 oct. 2022).



© UGC/AFP

À lire

Biographie

Théoricien de la pensée complexe, défenseur de l'interdisciplinarité, penseur des mass-média, inventeur des yé-yés... L'œuvre d'Edgar Morin, sociologue au parcours atypique et intriqué à la grande Histoire des dernières décennies, aurait de quoi intimider nombre de biographes. Notre collaborateur Francis Lecompte, qui avait déjà signé dans nos colonnes un dossier sur l'auteur de La Méthode à l'occasion de son centenaire en 2021, réussit pourtant le tour de force de dessiner en quelque 300 pages un portrait



inédit, vivant et accessible, de « celui qui sans plan de carrière prémédité ni objectif préconçu, s'est donné pour mission de mieux penser et de penser autrement, parce que changer la pensée est la condition indispensable pour sauver le monde ». **Edgar Morin, en suivant la voie**, Francis Lecompte, Ed. l'Archipel, février 2023, 303 p., 21 €.

Interdisciplinarité



Comment la robotique peut-elle aider à gérer nos ressources en eau ? En quoi la recherche médicale peut-elle être utile aux archéologues ? Les violences urbaines peuvent-elles être modélisées et prédites ?

Qu'ont les mathématiques à nous apprendre sur la structure de l'ADN ? Autant de questions qui figurent parmi les très nombreux exemples de ce que permet l'interdisciplinarité dans la recherche, présentés dans ce bel ouvrage collectif qui a réuni plus de 150 scientifiques de tous horizons. Un nombre qui est aussi celui des projets soutenus chaque année par la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (Miti) du CNRS, organisme pionnier en la matière.

L'Interdisciplinarité. Voyages au-delà des disciplines, Stéphane Blanc, Mokrane Bouzeghoub et Martina Knoop (dir.), CNRS Éditions, janvier 2023, 313 p., 29 €.



de Denis Guthleben,
historien au CNRS

Quand la physique fait société

2023 sera physique ou ne sera pas ! Alors que les préparatifs de l'année qui lui sera bientôt consacrée vont bon train, plusieurs événements organisés par la Société française de physique en donnent déjà un agréable avant-goût. C'est que la SFP fête ses 150 ans... un anniversaire inauguré le 16 janvier 2023 en Sorbonne, en présence de la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et dont le CNRS ne peut que se réjouir, tant ses liens avec la SFP sont anciens et fertiles.

Stimuler, Fédérer...

Dans SFP, il y a d'abord un « S », comme « Stimuler l'essor des connaissances nouvelles ». Telle est l'ambition originelle de la Société, portée par ses pères fondateurs – le masculin est, à l'époque, encore exclusif... – Joseph-Charles d'Almeida, Alfred Cornu et quelques autres, qui souhaitent stimuler les échanges autour de leur discipline. Les débuts sont modestes : quelques savants se réunissent tantôt entre les murs de l'École normale supérieure à Paris, tantôt à leurs domiciles... mais la mayonnaise prend vite : de 70 adhérents en 1873, la Société passe à 200 l'année suivante et à plus d'un millier au soir du XIX^e siècle. Pour donner plus d'écho à leurs réflexions, la SFP publie un *Bulletin* promis lui aussi à un bel avenir : devenu en 2006 les *Reflets de la physique*, coédité depuis 2013 avec le CNRS qui en connaît lui aussi un rayon quand il s'agit de connaissances nouvelles, il poursuit sa belle aventure...

“Les débuts sont modestes : quelques savants se réunissent tantôt entre les murs de l'ENS à Paris, tantôt à leurs domiciles... mais la mayonnaise prend vite.”

Dans SFP, il y a ensuite un « F », comme « Fédérer la communauté ». Et elle en avait bien besoin, cette communauté, en 1873, alors que la France venait d'essuyer une terrible défaite face à la Prusse, et que la science était vue comme l'un des principaux leviers du redressement national !

Comme le note alors d'Almeida en observant ses collègues physiciens qui se réunissent et s'unissent, « *s'ils ont été conduits à se rechercher par l'amour de la Science, un autre sentiment vient encore fortifier leur union : l'amour du pays* ». Ces deux amours-là vont conduire la SFP, au fil des décennies, à se mobiliser en faveur d'une foule de projets. On la retrouve ainsi en ordre de marche derrière Jean Perrin, dans les années 1930, lorsqu'il propose de réorganiser notre paysage scientifique en créant un organisme ambitieux, comme derrière le physicien Pierre Jacquinot, dans les années 1960, quand il suggère que ce même organisme – le CNRS, pour celles et ceux qui n'auraient pas suivi ! – mette en place des laboratoires mixtes avec les universités et les autres établissements pour fédérer, là encore, les forces scientifiques du pays.

... et Promouvoir

Dans SFP, il y a enfin un « P », comme « promouvoir la physique », de la même manière que le CNRS s'emploie à le faire pour la science dans son ensemble. L'une et l'autre n'ont jamais cessé de se rencontrer autour de cet enjeu majeur, et qui le devient chaque jour davantage. Rien d'étonnant : les mêmes personnalités ont souvent été à l'œuvre de part et d'autre, et lorsqu'à la Libération Frédéric Joliot-Curie a incité avec vigueur les pouvoirs publics à ne pas oublier la recherche scientifique dans la reconstruction du pays, il l'a fait au double titre de directeur du CNRS et de président de la SFP. Mais c'est surtout vers le public le plus large, et notamment en direction des plus jeunes, que les actions communes se sont multipliées au fil des années, dans des périmètres bien établis – depuis la fin des années 1930, le Palais de la Découverte, un lieu aussi symbolique pour les personnels du CNRS que pour les membres de la SFP, a souvent été le repère de cette collaboration – ou à travers le territoire – à l'image de cette manifestation originale et plus récente, « La nuit des temps ».

La SFP en 1873, comme le CNRS en 1939, ont vu le jour dans un pays confronté à d'immenses défis qui, s'ils sont différents aujourd'hui, ne sont assurément pas moindres. Leurs parcours croisés permettent de rappeler quelques principes évidents, que l'on perd parfois de vue hélas dans la frénésie du quotidien. Le premier est que, dans la recherche comme ailleurs, l'union fait toujours la force ! ■

SOUTENEZ LA RECHERCHE

FAITES UN DON À LA FONDATION CNRS



© Frédérique Plas/CNRS Photothèque

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

fondation-cnrs.org 

COMME MOI, REJOIGNEZ LA CASDEN, LA BANQUE DE LA FONCTION PUBLIQUE !

Jenny, Enseignante chercheuse



PARTENAIRE PREMIUM

casden.fr



Retrouvez-nous chez

**BANQUE
POPULAIRE** 