

Trimestriel n° 312
JUIN 2023

CNRS

LE JOURNAL



Univers

Trouble dans la
cosmologie

DOSSIER

La recherche met
le cap sur l'**océan**

Des pistes pour
contrer la résistance
aux antibiotiques

Course

Les femmes
récupèrent-elles mieux ?



La banque coopérative
de la Fonction publique

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

Jenny, Enseignante chercheuse

CASDEN Banque Populaire - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable - Siège social : 1 bis rue Jean Wiener 75020 Champs-sur-Marne - Siren n° 764 253 778 - RCS Meaux - Immatriculation OJUS n° 02 027 138 - RCS Paris - Immatriculation OJUS n° 08 045
Siège social : 130 avenue Pierre Mendès France - 75017 Paris Cedex 13 - Siren n° 493 452 042 - RCS Paris - Immatriculation OJUS n° 08 045
100 - Crédit photo : © Roman Jelliano - Conception : Insigni 2020 - Réf. AP - Groupe 2020 - Merci à Jenny, enseignante chercheuse d'avoir prêté son visage à notre campagne de communication.



cascden.fr



Retrouvez-nous chez

BANQUE POPULAIRE **+X**

Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

Téléphone : 01 44 96 40 00**E-mail :** lejourn@cnrs.fr**Le site Internet :** <https://lejourn.cnr.fr>**Anciens numéros :**<https://lejourn.cnr.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 :

Julien Bourdet, Sebastián Escalón, Grégory Fléchet,

Cyril Frésillon, Denis Guthleben, Mathieu Grousson,

Martin Koppe, Émilie Martin

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 :

Tonwen Jones / Colagene paris

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-mediathèque@cnrs.fr

<https://images.cnr.fr>

La reproduction intégrale ou partielle des textes et des illustrations doit faire obligatoirement l'objet d'une demande auprès de la rédaction.

En couverture :Pont avant du *Pourquoi pas ?*, un des navires de la flotte

océanographique opérée par l'Ifremer.

© CYRIL FRÉSILLON / MIO / IFREMER / CNRS IMAGES

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

Abonnez-vous gratuitement sur :

» lejourn.cnr.fr/abojournal

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



L'océan joue un rôle majeur dans la régulation du climat. C'est un réservoir de ressources biologiques, énergétiques et minières. C'est aussi une voie de communication entre les peuples et de transport des biens. Sa transformation actuelle est visible et rapide. La montée des eaux, la survenue d'événements extrêmes, l'émergence d'un continent de plastique, la perte de biodiversité ou encore la croissance exponentielle de l'économie bleue en font un sujet d'attention majeur.

L'océan, qui recouvre 70 % de la surface de notre planète, reste encore un monde mal connu, et plus que jamais nous avons besoin de développer des recherches à son sujet. Initiée par les Nations unies, la Décennie pour les sciences océaniques au service du développement durable (2021-2030) a été un élément déclencheur. L'océan est au cœur de la mission Santé des océans, des mers et des eaux côtières et continentales (Starfish), du programme Horizon Europe. En France, après le Programme prioritaire de recherche Océan, lancé le 8 juin 2021 dans le cadre du troisième Programme d'investissement d'avenir (PIA3), on compte aujourd'hui cinq Programmes et équipements prioritaires de recherche du PIA4 en lien direct avec les sciences océaniques.

Il est urgent d'organiser la communauté scientifique mondiale autour de la défense d'un océan durable. Par la qualité et la diversité incomparable de ses recherches sur ce sujet, notre organisme est appelé à jouer les premiers rôles dans ce nouveau paysage. Ainsi, le CNRS s'engage aujourd'hui naturellement au sein du

Panel international pour la durabilité de l'océan (Ipos). Le CNRS a répondu présent à la conférence des Nations unies sur l'océan (Unoc) à Lisbonne en juin 2022, puis quelques mois après à la COP27 au travers de sa participation à un pavillon dédié à l'océan, et enfin lors de la négociation de l'accord sur le traité international pour la protection de la haute mer. Finalement, le CNRS a organisé à Bruxelles en avril dernier un atelier avec une trentaine d'institu-

*“Défendre la durabilité
de l'océan est devenu
aujourd'hui un enjeu
crucial pour l'avenir
de l'humanité.”*

tions de recherche issues de plusieurs continents, afin de créer une coalition scientifique au sein de l'Ipos. Cette coalition nous permettra de porter la parole scientifique auprès des décideurs, en particulier en élaborant des recommandations pour la prochaine conférence Unoc qui se tiendra à Nice en juin 2025, et ainsi de défendre la durabilité de l'océan, devenue aujourd'hui un enjeu crucial pour l'avenir de l'humanité.

Alain Schuhl,

directeur général délégué à la science du CNRS



© F. PLUS/CNRS IMAGES



© ANTHONY LAGANT / CRODIE / CNRS IMAGES

GRAND FORMAT

11

La recherche met le cap sur l'océan	12
Les femmes récupèrent-elles mieux ?	26
CNRS Rise Up, une nouvelle offre pour les entreprises	32



© FRÉDÉRIQUE PLAS

06

Wanda Diaz-Merced, l'astronome
qui écoute les étoiles

EN PERSONNE 5

Wanda Diaz-Merced, l'astronome qui écoute les étoiles	6
Les grands esprits se rencontrent	8
Brèves	10



© JARNOVERDONK / STOCK-ADOBIE.COM

44

La forêt au défi du
changement climatique

EN ACTION 37

Climat : l'implacable état des lieux du Giec	38
Cryptoactifs : vers des alternatives éco-compatibles ?	40
Quand la recherche s'intéresse au droit et à la justice	42
La forêt au défi du changement climatique	44
Trouble dans la cosmologie	46
Une association au service des anciens et des amis du CNRS	50
« La transition écologique ne pourra se faire qu'avec des réseaux intelligents »	52
Contrer l'antibiorésistance	54



© T. SARNET

L'ethnomimétisme :
comprendre
et reproduire
des objets rituels

58

LES IDÉES 57

L'ethnomimétisme : comprendre et reproduire des objets rituels	58
À lire, à voir	60
Contre les violences sexuelles, les neurosciences en renfort	62

LA CHRONIQUE

Les oubliées de la science	66
----------------------------------	----

EN PERSONNE



*Rencontre avec une scientifique
à l'écoute de l'Univers,
et de brillants esprits accueillis dans
les laboratoires du CNRS.*

Wanda Diaz-Merced l'astronome qui écoute les étoiles

UNIVERS



PORTRAIT Aveugle depuis l'adolescence, Wanda Diaz-Merced a mis au point une technique dite de « sonification » pour convertir les signaux astrophysiques en sons. Mettant en avant ce formidable outil de recherche et d'inclusion, elle plaide pour une science ouverte à tous les profils.

PAR MATHIEU GROUSSON

S'excusant pour un retard fictif, Wanda Diaz-Merced, large sourire, invite à entrer dans son bureau du laboratoire Astroparticule et cosmologie (APC)¹. Pareils à deux étoiles, ses yeux gris-bleu captent immédiatement le regard. Un regard que pourtant elle ne renvoie pas, Wanda Diaz-Merced est aveugle. Les planètes, les étoiles, les galaxies... elle ne les voit pas. Néanmoins, du spectacle du ciel, l'astronome ne manque rien, grâce à la technique qu'elle a mise au point pour convertir en sons audibles les signaux en provenance du cosmos. Un outil qui permet à la scientifique une autre approche des données avant une analyse plus poussée. Et qui par la force des choses est également un formidable outil d'inclusion. Après une année passée à l'European gravitational laboratory (EGO), près de Pise, Wanda Diaz-Merced vient d'arriver à Paris pour un an. Elle y poursuivra son entreprise unique de rendre accessibles à toutes et tous les signaux du ciel.

Native de Porto Rico, Wanda Diaz-Merced explique avoir toujours été intéressée par les sciences. Même si en démarrant ses études supérieures, elle pense d'abord à la médecine. Mais son avenir est très vite compromis. Commenant à perdre la vue durant l'adolescence, elle devient complètement aveugle l'année de son baccalauréat. « Je ne pouvais même pas lire ce que le professeur notait sur le tableau et je n'avais évidemment plus accès aux livres »,

se souvient-elle, parlant d'une période critique de son existence où elle a bien failli tout arrêter.

Un camarade la sort de la nuit dans laquelle son handicap l'a plongée. Astronome amateur, il participe au projet de science participative Radio Jove, de la Nasa, qui consiste à enregistrer et analyser des émissions radio en provenance de Jupiter, du Soleil ou de la galaxie en utilisant une petite antenne à construire soi-même. Et il fait écouter à la jeune étudiante la transposition, à des fréquences audibles, du signal radio d'une éruption solaire. « J'ai eu l'impression d'entendre le Soleil en temps réel, puis, après l'éruption, le bruit de fond de la galaxie », se souvient avec émotion la scientifique. Elle ajoute : « J'ai ressenti profondément qu'une possibilité se présentait ».

L'oreille de l'astronome

Concrètement, Wanda Diaz-Merced se rapproche du projet Radio Jove. « J'ai participé à des téléconférences et fait tout ce que je pouvais pour apprendre », raconte-t-elle. Jusqu'à être sélectionnée en 2005 pour un stage d'été au Goddard Spaceflight Center, aux États-Unis, où elle fait la connaissance de l'astrophysicien Robert Candey, qu'elle appelle toujours son mentor près de vingt ans plus tard. Avec lui, elle commence à travailler au développement du programme xSonify, qui permet de traduire en variations de fréquence et d'intensité sonores des signaux en provenance d'objets astrophysiques. « J'ai alors pu analyser mes premières données provenant d'un radiotélescope », explique-t-elle. L'année suivante, elle travaille sur les enregistrements faits par le satellite Swift de sursauts gamma, soit des bouffées de photons ultra-énergétiques émises par la fusion d'étoiles à neutrons ou l'explosion d'étoiles géantes. « J'ai alors pris conscience que l'astronomie était une science que j'étais capable de faire. »

En 2013, Wanda Diaz-Merced soutient sa thèse de doctorat à l'université de Glasgow. Puis elle enchaîne les séjours postdoctoraux au Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, au South African Astronomical Observatory,

1. Unité CNRS/Université Paris Cité.

► Wanda Diaz-Merced au laboratoire Astroparticule et cosmologie, à Paris, en mai 2023.

pas une rigoureuse analyse mathématique, mais permet un accès aux données grâce auxquelles détecter des signaux potentiellement intéressants à étudier ensuite plus avant». Mieux, via une série d'expériences perceptives, la chercheuse montre que le son, y compris pour des astronomes valides dans le cadre d'une pratique professionnelle, augmente la capacité à accéder à des signaux très faibles qui par nature sont invisibles à l'œil humain.

Explorer les signaux de l'Univers

En parallèle, Wanda Diaz-Merced participe à différents projets inclusifs de science participative. Par exemple, en 2016, elle donne une conférence TED où elle plaide pour une science accessible à toutes et tous. Puis, en 2019, elle codirige la conférence *Astronomy for Equity, Diversity and Inclusion*, organisée à l'Observatoire astronomique national du Japon.

À Paris, la chercheuse a entamé des discussions avec ses nouveaux collègues afin de préciser la manière dont elle va interagir avec eux sur les thématiques du laboratoire. Comme l'explique Antoine Kouchner, son directeur, « rayonnement électromagnétique, rayons cosmiques, neutrinos, ondes gravitationnelles, la particularité de l'APC est de regrouper des équipes qui travaillent sur l'ensemble des messagers grâce auxquels observer l'Univers. De ce point de vue, l'approche de Wanda pour-

rait être très intéressante pour explorer ces signaux et contribuer à la mission d'ouverture du laboratoire à toutes et tous. »

Sur un plan strictement scientifique, la sonification des données pourrait par exemple trouver une application pour la préparation des observations du satellite franco-chinois Svom, dont le lancement est prévu pour mars 2024. Sa mission : déterminer les caractéristiques et la localisation de sursauts gamma, permettant ensuite notamment leur suivi par des observatoires terrestres. De quoi faire des découvertes que des approches plus classiques ne permettraient pas ? Pour l'heure, ce n'est encore qu'une hypothèse. Une chose est certaine, les oreilles plus que jamais tournées vers le ciel, Wanda Diaz-Merced entend bien montrer que l'astronomie, sans retard, aurait tout à gagner à s'ouvrir à toutes les approches et tous les profils. ■

“J’ai eu l’impression d’entendre le Soleil en temps réel, puis, après l’éruption, le bruit de fond de la galaxie.”

au Japon, puis à EGO. Au fil des années, elle affine son approche de sonification des données astrophysiques qu'elle applique au vent solaire, aux éjections de masse coronale, aux rayons cosmiques ou encore à la coalescence de trous noirs. Comme elle le détaille, « la sonification ne remplace

Les grands esprits se rencontrent

RECHERCHE D'illustres personnalités de la recherche mondiale vont rejoindre le CNRS en tant que « fellows-ambassadors ». Un dispositif inédit qui favorisera les échanges avec les chercheuses et chercheurs français.

PAR SOPHIE FÉLIX

Prix Nobel de physique en 2011 pour sa découverte¹ du phénomène d'accélération de l'expansion de l'Univers, Saul Perlmutter fait partie des dix premiers scientifiques de très haut niveau invités à devenir « CNRS fellows-ambassadors ». « *Je suis honoré et ravi d'avoir cette nouvelle opportunité de poursuivre et de développer davantage mes collaborations de longue date très fructueuses avec mes nombreux collègues du CNRS* », affirme le cosmologue américain.

Ancré dans la tradition des éminents « visiting professors » au sein du milieu académique, ce dispositif inédit pour le CNRS poursuit deux objectifs complémentaires. D'une part, « *la qualité des scientifiques de niveau mondial que nous parvenons à attirer démontre l'attractivité du CNRS, au-delà du simple discours* », assure Alain Schuhl, directeur général délégué à la science de l'organisme. D'autre part, le programme vise à dynamiser la recherche française : « *Nous pouvons bénéficier du rayonnement et de la notoriété du CNRS pour faire venir les meilleurs scientifiques mondiaux*. » Ces chercheurs et chercheuses prestigieux, invités sur proposition des instituts du CNRS, s'engagent ainsi à passer au moins un mois par an, pendant trois ans, dans un ou plusieurs laboratoires en France.

« *En étant présent durablement au sein d'un laboratoire, un ou une fellow-ambassador devient plus accessible et est disponible pour interagir avec les chercheuses et chercheurs français sur des questions scientifiques et plus globalement sur la manière de penser la recherche* », détaille Reynald Pain, directeur de l'Institut national de physique nucléaire et de

physique des particules (IN2P3) du CNRS, qui a invité Saul Perlmutter. En particulier, ces personnalités de haut vol pourront prendre un rôle d'accompagnement, « *de manière plus spontanée, pour les jeunes scientifiques et doctorants qui n'auraient peut-être pas eu l'occasion de les rencontrer en colloque* ». « *De nombreux scientifiques étrangers admirent le CNRS, son activité scientifique et l'excellence de ses chercheurs et chercheuses* », ajoute le directeur.

Tous les ambassadeurs et ambassadrices de cette première promotion sont ainsi en poste permanent à l'étranger et ont des relations scientifiques importantes avec des scientifiques français. Saul Perlmutter est par exemple co-directeur du Centre Pierre Binétruy, un *International Research Laboratory* (IRL) établi entre le CNRS et l'University of California, à Berkeley, grâce à son action. Le mathématicien Alejandro Maass a quant à lui joué un rôle décisif dans le développement, avec l'Universidad de Chile, du premier IRL au Chili, le Centre de modélisation mathématique. Et l'astrophysicienne italienne Marica Branchesi, inscrite en 2018 sur la liste du magazine *Time* des cent personnalités les plus influentes du monde, est très impliquée dans la collaboration Virgo et notamment l'instrument Advanced Virgo, principalement cofinancé par le CNRS en France et l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare en Italie.

Directrice du Centre of Heritage and Museum Studies de l'Australian National University, Laurajane Smith est pour sa part spécialisée dans l'étude de la politisation des patrimoines, un sujet majeur pour l'anthropologie qui est une priorité scientifique de l'Institut des sciences humaines et sociales (INSHS) du CNRS. « *La politique inter-*

1. Avec Brian P. Schmidt et Adam Riess.

▲ De gauche à droite:
Saul Perlmutter,
Laurajane Smith,
Marica Branchesi et
Alejandro Maass font
partie des dix fellows-
ambassadors de 2023.



ILLUSTRATION D'APRÈS PHOTOS : © THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LBNL ; DR/COLL. PERLS ; GSSI ; CNRS / U. DE CHILE

Les 10 fellows-ambassadors de 2023

La *nationalité du CNRS est un élément majeur pour l'identité de l'organisme*», rappelle la directrice de l'institut, Marie Gaille. Les recherches menées au CNRS sont ainsi « *très internationalisées* » – les deux tiers des copublications issues du CNRS sont en partenariat avec un laboratoire à l'étranger – et de nombreux scientifiques ont « *des liens forts, structurants pour leurs recherches et de longue haleine avec des collègues à l'étranger* ». « *Dans le sillage des collègues étrangers qui ont témoigné leur attachement à l'institution lors des 80 ans du CNRS en 2019, ce dispositif plus durable de mise en lien à l'échelle internationale permet d'insister sur l'importance de ce type de relations* », décrypte Marie Gaille.

Sélectif, ce dispositif doit ainsi permettre au CNRS d'avoir accès chaque année, une fois les premières promotions cumulées, à trente scientifiques reconnus au niveau international, au service de sa communauté scientifique et de sa notoriété. ■

Marica Branchesi,
astrophysicienne, Gran Sasso
Science Institute, Italie

Francesco dell'Isola,
chercheur en mécanique
théorique, Università degli
Studi dell'Aquila, Italie

Maurice Herlihy,
informaticien, Brown University,
États-Unis

Anne L'Huillier,
physicienne atomique,
Lund University, Suède

Alejandro Maass,
mathématicien,
Universidad de Chile, Chili

Krzysztof Matyjaszewski,
chimiste des polymères,
Carnegie Mellon University,
États-Unis

Leonid Alex Mirny,
biophysicien,
Harvard, États-Unis

Jeffrey F. Morris,
professeur en ingénierie
chimique, City College
of New York, États-Unis

Saul Perlmutter,
physicien, University of
California, Berkeley, États-Unis

Laurajane Smith,
chercheuse en études
du patrimoine et des musées,
Australian National University,
Australie



© COLLÈGE DE FRANCE

Valérie Lallemand-Breitenbach en mission pour l'expertise

Valérie Lallemand-Breitenbach est la nouvelle directrice de la Mission pour l'expertise scientifique (MPES) du CNRS, qui a pour objectifs le partage de connaissances et l'apport d'un éclairage scientifique indépendant sur des questions précises, dans une optique d'appui à la décision publique. Elle avait rejoint l'Inserm en 2002 et pilotait depuis 2015 une équipe au Centre interdisciplinaire de recherche en biologie sur le site du Collège de France. Ses travaux initiaux sur la combinaison de molécules pour le traitement d'un modèle murin d'une leucémie aiguë ont permis le développement du premier exemple de guérison par thérapie ciblée d'un cancer. Si elle a placé l'interdisciplinarité au centre de ses activités, elle s'est également impliquée dans le champ de la médiation scientifique, en accompagnant notamment une association de scientifiques, l'Arbre des connaissances. Elle succède à la tête de la MPES à Adeline Nazarenko, qui a pris la direction en février de l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INS2I).

Les Talents 2023

Le CNRS a commencé à dévoiler les noms de ses médaillés 2023. Sont ainsi connus les lauréats et lauréates des médailles d'argent, qui distinguent des scientifiques pour l'originalité, la qualité et l'importance de leurs travaux, reconnus sur le plan national et international ; des médailles de bronze, qui récompensent des premières recherches fécondes, consacrant des spécialistes de leur domaine ; et des médailles de cristal qui distinguent des personnels d'appui à la recherche, pour leur créativité, leur maîtrise technique et leur sens de l'innovation. Le palmarès est à retrouver sur le site du CNRS, rubrique Talents.

La recherche française brille en Europe

Le 13 avril dernier, le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MESR) a organisé un événement à Paris pour célébrer le cap dépassé des 1 500 projets de recherche exploratoires financés depuis 2007 par le Conseil européen de la recherche (ERC), et accueillis dans une institution française. Le CNRS est la principale institution hôte française, hébergeant près de la moitié des 1 700 lauréats et lauréates français à ce jour... ce qu'ont confirmé les résultats récents de deux appels.

Le 30 mars, l'ERC a annoncé les résultats de l'appel « ERC Advanced Grants 2022 » qui vise des chercheurs confirmés. Avec 12 bourses, le CNRS est l'institution qui en cumule le plus à l'échelle européenne, devant le Weizmann Institute of Science (7 projets), les universités d'Oxford et de Cambridge (4 projets) ou encore l'Institut Max Planck (4 projets).

Un mois plus tard, le 5 mai, l'ERC a dévoilé les lauréats de la première vague de l'appel « Proof of concept 2023 » qui s'adresse aux scientifiques 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. Le CNRS est l'institution hôte de 3 projets sur les 6 retenus en France (sur 66 lauréats au total).

Les nouvelles recrues du CNRS

Le 21 mars 2023, le CNRS a organisé une journée nationale pour les nouveaux entrants et entrantes, l'occasion d'accueillir en particulier les lauréats des concours externes de 2022. Près de 600 personnes étaient ainsi rassemblées au Beffroi de Montrouge, en région parisienne.



© CNRS

GRAND FORMAT



*Naviguant sur les flots
de la connaissance, les scientifiques
explorent l'océan, sondent nos muscles
et innovent à tout-va.*

ILLUSTRATION : TONWEN JONES / COLAGENE PARIS, POUR CNRS LE JOURNAL

La recherche met le cap sur l'océan

Pont avant du *Pourquoi pas ?*, un des navires de la flotte océanographique opérée par l'Ifremer.

TERRE

Couvrant 70 % de la planète, la machine océan est aujourd'hui en péril. Pour l'étudier et venir à sa rescousse, la recherche mondiale se mobilise. Avec plus d'un millier de scientifiques et une cinquantaine de laboratoires impliqués, le CNRS est en première ligne. Tour d'horizon des actions en cours et des grands défis à relever, du littoral aux grands fonds marins.

DOSSIER RÉALISÉ PAR LAURENCE STENVOT ET SEBASTIÁN ESCALÓN

Si jusqu'à présent pouvait régner la vision d'un océan indestructible, sa transformation actuelle visible et rapide en fait désormais un sujet de préoccupation majeur. La fonte des glaces continentales et des calottes polaires, la survenue d'événements extrêmes, l'émergence d'un continent de plastique ou encore la croissance exponentielle des usages humains en mer sont autant de marqueurs qui illustrent ce traumatisme et inquiètent. « *L'océan a besoin de science, de toutes les sciences. Il est par essence un objet interdisciplinaire et un enjeu majeur pour la durabilité de notre planète. Le CNRS encourage toutes les recherches sur l'océan, pour assurer ainsi sa pérennité* », affirme Antoine Petit, président-directeur général du CNRS.

Le CNRS à la pointe des recherches sur l'océan

Face à ce constat établi, le CNRS, fort d'une interdisciplinarité exceptionnelle en sciences océaniques, intensifie sa mobilisation avec aujourd'hui plus de 1 000 chercheuses et chercheurs dans une cinquantaine de laboratoires. « *C'est tout simplement l'un des tout premiers organismes de recherche sur les mers et l'océan au monde. Une vraie richesse. Peu de pays ont autant de chercheurs travaillant sur le sujet* », souligne Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS. Car le CNRS a les moyens d'étudier l'océan dans toutes ses dimensions, de la molécule à la mécanique globale, des grands fonds à l'atmosphère, du littoral à la haute mer, jusqu'aux liens ténus avec les professionnels, les usagers, l'économie et les politiques. Parmi les grands enjeux : sa contribution aux phénomènes climatiques, l'acquisition de nouvelles connaissances sur son fonctionnement, la protection des écosystèmes et de la biodiversité, l'exploitation durable des milieux marins ainsi qu'une gouvernance adaptée.



Un plongeur photographie un récif corallien à Tongatapu (Tonga), dans l'océan Pacifique, pour en réaliser une représentation 3D.

Depuis 2018, l'organisme dispose d'une « Task force océan » regroupant ses dix instituts. Celle-ci diffuse les informations sur les programmes et les financements de recherche et a pour vocation de renforcer l'interface entre scientifiques et décideurs ainsi que contribuer à créer des programmes de recherche au carrefour des disciplines. « La Task force océan intervient sur différentes questions scientifiques et stratégiques où une vision partagée du CNRS et une coordination entre les disciplines sont nécessaires. Il peut s'agir de construire l'observation et la modélisation intégrées de demain, de parler d'une seule voix dans les arènes nationales ou internationales d'interface science-politique, ou contribuer à la programmation scientifique », explique Joachim Claudet, conseiller océan du CNRS. Le copilotage avec l'Ifremer du Programme prioritaire de recherche (PPR)¹ Océan et Climat depuis 2021, ou encore la participation de l'organisme aux grandes instances internationales telles que la COP27, sont des exemples de décisions prises par cette Task force. « La spécificité du CNRS – et sa

force – vient de son interdisciplinarité, que nous voulons coordonner au mieux au sein de la Task force », rapporte Stéphanie Vermeersch, directrice adjointe scientifique à l'Institut des sciences humaines et sociales (INSHS) du CNRS et représentante de l'institut à la Task force océan. Aujourd'hui une centaine de chercheuses et chercheurs en SHS travaillent sur l'océan. « Ce sont des géographes ou des économistes sur l'interface terre-mer, des juristes ou des politistes sur les statuts des grands fonds marins, des archéologues qui fouillent des épaves dans les profondeurs, des anthropologues ou des linguistes attachés aux populations et langues des territoires insulaires menacés par la montée des eaux... Nous sommes particulièrement présents dans le Groupement de recherche Omer sur les mers et océans », ajoute-t-elle.

Omer : la multidisciplinarité comme paradigme

Lancé en 2021 sous l'impulsion de la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (Miti) du CNRS pour une durée de cinq ans, la particularité du GDR Omer – initié par le CNRS mais qui fédère des scientifiques de tous bords – est son envergure. « Nous avons fait de la multidisciplinarité un paradigme et abordé l'océan aussi bien par la philosophie, le climat, la sociologie, le droit maritime, la biodiversité ou encore le traitement du signal de capteurs nouveaux et bien plus encore », confie Fabrizio d'Ortenzio, directeur du GDR Omer. Il regroupe aujourd'hui 1 300 profils, allant du scientifique à l'industriel, du journaliste au personnel d'ONG. À ce jour, douze groupes de travail sont nés, et d'autres peuvent encore éclore. Ces groupes, de nature complètement multidisciplinaire, sont axés sur des thématiques d'intérêt majeur pour la communauté française des sciences de la mer. « Chaque groupe de travail intègre des scientifiques venant des toutes les disciplines, des plus fondamentales (chimie, mathématiques...), à celles qui s'intéressent aux interactions de l'homme avec son environnement (philosophie, géographie, sociologie...), en passant par les sciences environnementales (géologie, océanographie...) et de la vie (écologie) », rapporte Fabrizio d'Ortenzio.

Trois axes transversaux, toujours en cours de montage, devront implémenter les recherches. Ils portent sur la participation citoyenne, l'art et la science, et le soutien aux pouvoirs publics. « Quelles sont les différences entre les recherches actuelles en mer et les priorités de la société ? Comment demander aux citoyens de nous rejoindre dans cet effort ? » interroge le directeur.

La France, deuxième zone exclusive marine au monde

Si le CNRS répond présent pour relever les défis de l'océan, il s'implique également en accord avec la stratégie de l'État mise en place au travers du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MESR), du ministère des Outre-mer, ou du récent Secrétariat général de la mer (organisme interministériel placé sous l'autorité du Premier ministre, chargé de coordonner les actions de l'État en mer). Car la France a des forces de recherche puissantes sur l'océan. Avec ses 11 millions de km² (dont 97 % situés en outre-mer, territoires pour lesquels le CNRS est

1. Les programmes prioritaires de recherche s'inscrivent dans le cadre du programme d'investissement d'avenir du gouvernement.

“La survie de l’océan réside aussi dans nos capacités à relier la science et le milieu politique.”

en train de finaliser une feuille de route), le pays est présent dans la plupart des mers du globe. La France est le deuxième domaine en termes de zone économique exclusive marine, juste derrière les États-Unis.

Sous la houlette du MESR et du Secrétariat général pour l’investissement, le PPR Océan et Climat s’étend sur une période de six ans avec un budget de 40 millions d’euros. Trois zones présentant des enjeux spécifiques ont été ciblées : les territoires d’outre-mer, l’océan profond et les océans polaires. Une attention particulière est aussi portée aux espaces littoraux et côtiers. Le PPR est structuré autour de grandes priorités telles que la prévision de la réponse de l’océan au changement climatique et les scénarios d’adaptation, l’exploitation durable de l’océan et la préservation de sa biodiversité et de ses services écosystémiques, ou encore la réduction de la pollution océanique. « Trois objectifs qui abordent de front les dangers auxquels fait face l’océan pour apporter des réponses

concrètes », précise Catherine Jeandel, chercheuse CNRS en géochimie marine et co-pilote du PPR Océan et climat, dont le premier appel à projets a dévoilé ses six premiers lauréats.

Les atouts de la recherche française

Pour maintenir la France au plus haut niveau de la compétition mondiale, le gouvernement a lancé en 2021 la création de Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR), dont six (sur les trente-sept que le CNRS pilote ou copilote) sont en lien avec l’étude de l’océan. Par exemple le PEPR Atlasea, avec le CEA, qui porte sur le génome de 4 500 espèces de la zone économique exclusive française, ou encore Solu-BioD, avec Inrae, qui se penche sur le développement de solutions basées sur la nature en réponse à la crise environnementale, et dont l’un des projets concerne la restauration et la gestion de la biodiversité et des services écosystémiques côtiers. « Ces programmes vont nous permettre de développer des recherches ciblées thématiquement et géographiquement avec les meilleurs partenaires sur l’océan, mais également de développer des outils et infrastructures au niveau national », commente Joachim Claudet, qui copilote le PEPR Bridges avec l’Ifremer et l’Institut de recherche pour le développement (IRD)

Une tortue nage au milieu de déchets plastiques, faciles à confondre avec les méduses dont elle se nourrit... Les avaler pourrait provoquer chez l’animal une grave occlusion intestinale.



© RICHARD CAREY / ISTOCK/ADOBESTOCK.COM



Pose de micros enregistreurs en plongée sous-marine à Moorea, en Polynésie française, dans le but d'étudier l'évolution de la communication acoustique au sein de la famille très diversifiée des *Holocentridae*, un groupe de poissons marins.

sur la gestion durable des ressources marines dans le sud-ouest de l'océan Indien, en vue de réduire les risques de conflit dans la région.

Le pays dispose également d'un outil, jaloué par beaucoup à l'international : la Flotte océanographique française (FOF), qui compte parmi les trois plus grandes flottes européennes aux côtés de l'Allemagne et de l'Angleterre, et peut naviguer dans tous les océans (la seule avec l'Allemagne). Opérée par l'Ifremer, elle inclut navires de haute mer, navires côtiers, navires de stations (opérés par le CNRS) et engins sous-marins ou de prélèvement. Chaque année, la flotte embarque plus de 1 000 scientifiques, ingénieurs et techniciens et réalise 40 missions sur les navires hauturiers, 140 missions sur les navires côtiers et 300 sur les navires de stations.

“ Il est urgent aujourd'hui d'organiser la communauté scientifique mondiale autour de la défense d'un océan durable. ”

« La flotte océanographique française est l'un des meilleurs outils scientifiques que l'on peut avoir en France. Il faut à tout prix la préserver et la consolider. Des alternatives existent – souvent provenant d'initiatives privées – qui seront critiques dans le futur pour élargir le spectre d'intervention des équipes françaises. Mais, cela toujours en complément, et pas en alternative, de la flotte. Car si nos recherches océanographiques ont un impact fort de par le monde c'est aussi grâce à elle », se réjouit Fabrizio d'Ortenzio.

Porter les connaissances vers le monde politique

Mais la survie de l'océan réside aussi dans nos capacités à relier la science et le milieu politique. C'est pourquoi le CNRS devient un partenaire de plus en plus impliqué au sein des grandes instances de décision mondiales ; il est déjà l'un des plus gros contributeurs des rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec). « La crise du Covid-19 a rappelé le besoin essentiel de porter les connaissances vers le monde politique. Il est nécessaire de redonner à la science le rôle qu'elle doit avoir dans la cité », analyse Antoine Petit. Et quoi de mieux que de profiter du paysage favorable dont bénéficie l'océan ?

La Décennie pour les sciences océaniques au service du développement durable (2021-2030), initiée par les Nations unies, s'attaque notamment à l'objectif de développement durable 14 (ODD14) de l'Agenda 2030 sur la conservation de la vie aquatique. Un effort mondial qui implique scientifiques, décideurs politiques, ONG et autres parties prenantes. « La Task force océan réalise actuellement un document stratégique provenant des dix instituts du CNRS sur la thématique de la durabilité, qui pourrait inspirer des pistes de réponses à la Décennie des Nations unies dont l'objectif est notamment de proposer des solutions aux enjeux auxquels fait face l'océan », confie Joachim Claudet.

La Décennie a été l'élément déclencheur de nombreuses démarches, notamment la mission Santé des océans, des mers et des eaux côtières et continentales (Starfish), une des cinq missions du nouveau programme Horizon Europe (2021-2027). Son objectif ? Régénérer les écosystèmes marins et d'eau douce européens d'ici à 2030. *« Certains défis identifiés dans le PPR Océan sont des défis que l'on retrouve au sein de la mission Starfish 2030 ou de la Décennie des Nations unies pour les sciences océaniques, et c'est normal : les défis scientifiques sont partagés par toute la communauté »,* précise Catherine Jeandel.

Mettre l'océan à la table des négociations

Le CNRS a également répondu présent lors de la COP27, en Égypte, au travers d'un pavillon dédié à l'océan, imaginé avec des partenaires scientifiques internationaux, ou, en mars dernier, lors de l'Accord sur le traité international pour la protection de la haute mer (BBNJ), également initié par l'ONU. *« Nous avons été fortement impliqués dans les négociations et beaucoup de positions poussées par la France ont été retenues, notamment en termes de définition des aires marines protégées »,* indique Joachim Claudet.

C'est également au sein d'un futur Panel international pour la durabilité de l'océan (Ipos), qui vise à intégrer les connaissances scientifiques pour modéliser le comportement de l'évolution de l'océan et esquisser les actions à mener pour un océan durable, que le CNRS s'engage pour la science-décision aux côtés de nombreux partenaires scientifiques internationaux tels que la Woods Hole Oceanographic Institution aux États-Unis ou encore Geomar en Allemagne. *« Il est urgent aujourd'hui d'organiser la communauté scientifique mondiale autour de la défense d'un océan durable. Le CNRS a pris ses responsabilités en travaillant à établir, ensemble, les principes de fonctionnement et le rôle de la coalition scientifique au sein de l'Ipos. Maintenant, nous allons participer activement à la coalition afin qu'elle soit à même de porter des recommandations à la conférence des Nations unies sur l'océan en juin 2025 à Nice »,* confie Alain Schuhl. L'Union européenne a quant à elle déjà intégré l'Ipos dans sa stratégie Océan. *« L'Ipos est le point de départ d'une grande aventure pour l'océan et le rôle de la connaissance dans son devenir, et en particulier dans la stratégie des Nations unies pour le développement durable et pour la Décennie des Nations unies pour les sciences océaniques au service du développement durable »,* souligne Françoise Gaill, conseillère scientifique au CNRS et vice-présidente de la Plateforme Océan & Climat, à l'initiative de cette proposition.

Qui de mieux pour porter ce projet et les autres que le CNRS, aujourd'hui devenu acteur majeur des océans... *« Nous connaissons l'importance du rôle de l'océan pour les enjeux climatiques et souhaitons qu'il soit à la table des négociations. Aujourd'hui, les scientifiques ont atteint un niveau de connaissance précis et peuvent proposer des pistes d'actions concrètes vers des solutions qui existent en termes d'atténuation et d'adaptation basées sur l'océan »,* conclut Antoine Petit. ■ **L.S**

Les océans au cœur des actions de la Fondation CNRS

Après deux premières fondations sous égide sur la thématique de l'océan déjà actives – la Fondation 1 Ocean et Ocean Sustainability Foundation –, deux nouvelles fondations – la Fondation Science4Reefs et la Fondation Albédo – sont en construction au sein de la Fondation CNRS.

→ La Fondation 1 Ocean a pour mission de soutenir le projet « 1 Ocean, le grand témoignage sur l'Océan », projet d'exploration mené avec l'Unesco à l'occasion de la Décennie des Nations unies pour les océans (2021-2030).

→ Ocean Sustainability Foundation – portée par la biologiste marine Françoise Gaill, conseillère scientifique au CNRS – a pour mission de soutenir les actions liées à la protection des milieux marins et océaniques, et en particulier l'initiative Ipos, le Panel international pour la durabilité de l'océan.

→ La Fondation Science4Reefs a pour mission de soutenir les travaux de recherche sur les récifs coralliens et de favoriser les interactions entre les scientifiques concernés et des acteurs issus du monde politique, industriel, social et culturel.

→ La Fondation Albédo a pour mission de soutenir des programmes scientifiques français, tant au niveau national qu'au niveau international, ayant trait aux régions polaires Nord et Sud ou aux zones de très haute altitude, communément rassemblées sous l'appellation de cryosphère.

Pour en savoir plus : fondation-cnrs.org/



Retrouvez l'article « Le droit international peut-il sauver les océans ? » ainsi que tous les contenus de notre dossier consacré à l'océan sur lejournald.cnrs.fr

Découvrez le site du CNRS dédié à l'océan : cnrs.fr/fr/ocean



UN SUIVI POUR LES ÉOLIENNES

Des scientifiques du Laboratoire des sciences du numérique de Nantes développent actuellement un réseau acoustique sous-marin de capteurs permettant le suivi continu des paramètres environnementaux et opérationnels d'un champ éolien offshore.

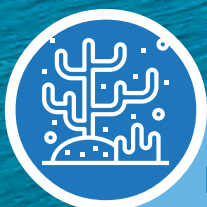


CONNAÎTRE LE CYCLE DE L'EAU

Lancé le 16 décembre dernier, le satellite franco-américain Swot a pour but de dresser un inventaire global et dynamique des eaux de surface, et d'étudier leur hauteur, leur débit et leur vitesse. De quoi faire des pas de géant dans la compréhension fine du cycle de l'eau !

Des projets tous azimuts

De l'océanographie à la sociologie en passant par la robotique ou la physique des particules, toutes les disciplines sont mobilisées par les équipes du CNRS pour des recherches sur et dans les océans. Voici un échantillon de projets et campagnes en cours.



LA VIE PROFONDE

Mieux connaître les récifs coralliens « froids », situés de 30 à 200 m de profondeur, et leur étonnante biodiversité afin de mieux les protéger : tel est l'objectif de la grande expédition internationale Deep life, impliquant plusieurs équipes du CNRS jusqu'en 2030.

DES NEUTRINOS AUX ABYSES

À 2 450 m sous l'eau et à 40 km au large de Toulon, le Laboratoire sous-marin Provence Méditerranée (LSPM), inauguré le 24 février dernier, est une installation unique au monde, permettant d'étudier à la fois les neutrinos et le milieu abyssal.



L'IMPACT DES FLEUVES

Dans le cadre du Programme prioritaire de recherche Océan et Climat, le projet Riomar va étudier l'évolution de l'environnement côtier sous influence des fleuves au XXI^e siècle dans cinq zones côtières métropolitaines.



LES INÉGALITÉS DU LITTORAL

Le projet Adaili a pour but d'étudier les inégalités dites environnementales (d'accès aux aménités, aux ressources, aux services) au sein des populations habitant un littoral. Objectif : tendre vers un littoral durable et résilient dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.



LA VIE DES CÔTES

Jusqu'en 2024, la célèbre goélette *Tara* participe à l'étude des écosystèmes côtiers tout au long des côtes européennes. Si elle permettra de mieux en connaître les espèces et leurs interactions, la campagne Tara Europa se penchera sur l'impact des polluants et du dérèglement climatique sur cette biodiversité.



FOCUS SUR LA POMPE BIOLOGIQUE

Du 2 juin au 17 juillet, la campagne internationale Apero mobilise près de 120 scientifiques à bord de deux navires de la Flotte océanographique française, pour étudier la pompe biologique de carbone dans l'Atlantique Nord-Est. Le journal de bord est à suivre sur un blog de CNRSlejournal.fr



PRÉCIEUX GÉNOMES

Piloté par le CNRS et le CEA, le Programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) exploratoire ATLASEa a pour but de séquencer le génome de 4 500 espèces présentes dans la zone économique exclusive française. À la clef, des données précieuses, des molécules d'intérêt médical et une meilleure connaissance des espèces invasives.



Les grands fonds marins: ces inconnus menacés

L'exploitation minière des grands fonds marins pourrait être autorisée dès cette année dans les eaux internationales. Les scientifiques craignent que cette industrie mette en danger des écosystèmes dont ils commencent à peine à entrevoir la richesse et l'importance en affectant la capacité de l'océan à stocker du carbone.

PAR SEBASTIÁN ESCALÓN



En octobre 2022, le navire *Hidden Gem* (Joyau caché) a effectué sa première récolte à grande échelle de minéraux des grands fonds marins. The Metals Company, l'entreprise propriétaire du navire, a ramené à la surface 4 500 tonnes de nodules polymétalliques, des concrétions riches en métaux qui gisaient à quelque 4 kilomètres de profondeur. À la suite de ce succès technologique, l'entreprise a annoncé qu'elle pouvait commencer l'exploitation à l'échelle industrielle dès 2024. Coup de bluff ou pas, les regards se tournent à nouveau vers ces abysses recelant d'immenses trésors.

Si on en croit les argumentaires de The Metals Company, l'exploitation des minéraux du fond de la mer ne devrait pas faire polémique. Pour tirer profit des énergies renouvelables, disent-ils, il faut des batteries, et pour fabriquer des batteries, il faut du cobalt, du lithium, du manganèse, du cuivre. Leur message clé : pas de transition énergétique sans exploitation

minière sous-marine. Or, cette exploitation pourrait devenir une menace de plus sur les écosystèmes océaniques. Elle pourrait en effet mettre à mal certaines fonctions de l'océan, y compris celle de pompe à carbone.

Matières premières à foison

Trois gisements océaniques sont dans la ligne de mire des compagnies. Tout d'abord, les nodules polymétalliques, riches en cobalt, manganèse, nickel et cuivre. De quelques centimètres de diamètre, ces nodules ressemblent à des cailloux noirs posés sur le plancher océanique. Ils sont le fruit de millions d'années d'accrétion : les métaux dissous dans l'eau précipitent et se déposent sur la surface d'un objet dur, un coquillage, un caillou, une dent de poisson qui constitue leur noyau. Leur vitesse de formation est infiniment lente, quelques millimètres par million d'années, et pourrait être liée à l'action de certains micro-organismes.

Ensuite, il y a les dépôts sulfurés. On les trouve autour des sources hydrothermales, au voisinage des dorsales océaniques. L'eau chaude et corrosive de ces sources lessive les roches de la croûte océanique et se charge en métaux et en sulfures. Lorsqu'elle jaillit du fond de la mer, au contact de l'eau froide de l'océan, les métaux précipitent et peuvent former de grands dépôts de minéraux sulfurés.

Enfin, il y a les encroûtements polymétalliques. Leur processus de formation est similaire à celui des nodules, mais il a lieu sur les flancs rocheux des monts sous-marins. Ces couches contiennent une grande variété d'éléments, le cobalt en premier lieu, et peuvent atteindre plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur sur des surfaces allant de quelques kilomètres carrés à plusieurs centaines de kilomètres carrés.

Impossible à l'heure actuelle de calculer l'ampleur des sources minérales des grands fonds. Cependant, les estimations de l'Institut d'études géologiques des États-Unis indiquent que la zone Clarion-Clipperton, une région au nord-est du Pacifique grande comme l'Union européenne, contiendrait 21 milliards de tonnes de nodules. Cette zone prospectée par The Metals Company recèlerait à elle seule plus de cobalt et de nickel que l'ensemble des mines terrestres. De quoi faire naître des ambitions dignes de la ruée vers l'or.



Des nodules polymétalliques tapissent les fonds marins à des profondeurs situées entre 4000 et 5000 mètres. Leur richesse en métaux (manganèse, fer, cobalt, zinc, nickel) attire la convoitise des industriels.



© BJÖRN WYŁEŻICH / STOCKADOBEE.COM

« On connaît mieux les reliefs de la Lune et de Mars que ceux des grands fonds marins », rappelle Sarah Samadi, biologiste de l'Institut de systématique, évolution, biodiversité¹. En effet, seulement 5 % de la surface des grands fonds, ceux qui se trouvent à 200 mètres de profondeur au moins, a été cartographiée. Quant aux organismes qui peuplent ces abysses, notre ignorance est presque totale. C'est d'ailleurs là l'une des craintes majeures des scientifiques vis-à-vis des opérations minières : que des écosystèmes soient balayés avant même d'avoir été découverts.

Menaces sur des écosystèmes inconnus

« La principale vulnérabilité des écosystèmes profonds est le manque de connaissances, atteste Sarah Samadi. Seule une infime partie de la biodiversité a été explorée. » En effet, lorsque des chercheurs réalisent un échantillonnage d'espèces dans un milieu des grands fonds, la plupart des animaux récoltés sont inconnus. « On découvre encore de nouvelles espèces sur des échantillonnages réalisés il y a 30 ou 40 ans ! » explique la biologiste. Dans ces conditions, impossible d'évaluer les risques de l'activité minière sur un écosystème donné.

Or, il ne suffit pas de connaître les espèces pour comprendre le fonctionnement d'un écosystème. Il faut aussi définir comment elles s'adaptent à leur milieu et comment elles s'insèrent dans la grande dynamique de l'océan. « Tout est interdépendant : hydrosphère, atmosphère, lithosphère, manteau terrestre, rappelle Mathilde Cannat, chercheuse à l'Institut de physique du globe de Paris². On ne peut pas faire de science sans tenir compte de ces interdépendances. »

Les estimations de l'Institut d'études géologiques des États-Unis indiquent que la zone Clarion-Clipperton, au nord-est du Pacifique, contiendrait 21 milliards de tonnes de nodules polymétalliques.

Exemple de cette imbrication de différents niveaux : les systèmes de sources hydrothermales des dorsales océaniques. Pour Mathilde Cannat, ceux-ci revêtent une importance particulière : « C'est là que l'interaction entre le manteau et les enveloppes externes de la Terre est à son maximum. » La chercheuse est impliquée dans la conception et la maintenance de l'observatoire EMSO-Açores, situé sur un champ hydrothermal baptisé « Lucky Strike », sur la dorsale médio-atlantique. Cet observatoire, en place depuis plus de dix ans, vise à comprendre, entre autres, le fonctionnement de l'écosystème des sources. Les chercheurs s'intéressent à l'adaptation de la faune à ce milieu extrême, et au rôle des micro-organismes.

Un programme pour les grands fonds

Lancé cette année, le Programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) d'accélération Grands fonds marins vise à donner un nouvel élan à la recherche scientifique sur l'océan profond. Financé à hauteur de 50 millions d'euros sur neuf ans, le programme permettra de mieux structurer la communauté scientifique. « Avant de faire les appels à projets, nous voulons co-construire les grands axes de recherche de façon interdisciplinaire, autour de deux défis étroitement imbriqués : un défi à dominante

sciences de la vie et un défi à dominante sciences humaines et sociales », explique Pierre-Yves Le Meur, co-coordonateur du programme avec Mathilde Cannat, chercheuse à l'Institut de physique du globe de Paris¹ et Jean-Marc Daniel de l'Ifremer. « On ne veut pas faire de la science qui reste dans les revues spécialisées, affirme Mathilde Cannat. On veut une science qui aborde les questions que devraient se poser les décideurs et ceux qui établissent les normes de protection des océans. » Un objectif ambitieux pour lequel les scientifiques s'efforceront de tisser des liens avec des ONG, des services de l'État ou encore, des autorités coutumières des différents peuples du Pacifique.

1. Unité CNRS/Institut de physique du globe de Paris.



© IFREMER (2016)

L'idée que le fond de l'océan est une vaste étendue monotone où la vie n'y prend que les formes les plus modestes n'a plus cours. Dans ces profondeurs dépourvues de vie végétale, la variété des écosystèmes n'en est pas moins saisissante. « *Tous les phylums du monde animal sont représentés dans le fond de la mer* », rappelle Sarah Samadi.

Certains de ces écosystèmes ont captivé l'imagination des chercheurs, comme ceux des célèbres fumeurs noirs des dorsales océaniques où se concentrent vers tubulaires géants, palourdes et crabes blancs. Avant leur découverte dans les années 1970, personne n'aurait pensé qu'une activité aussi frénétique pouvait avoir lieu en l'absence de végétaux et de photosynthèse. C'était sans compter, bien entendu, sur ces bactéries chimiosynthétiques qui tirent leur énergie des sources hydrothermales.

Mais les écosystèmes des dorsales ne sont pas les seuls qui méritent l'attention des scientifiques. Par exemple, les monts sous-marins, ces montagnes ou volcans qui s'élèvent du plancher océanique, constituent des havres de biodiversité. En effet, ces reliefs fournissent des supports variés à de nombreuses espèces fixes, coraux, éponges, vers tubulaires, qui à leur tour attirent des animaux pélagiques. Dans les profondeurs, là où une hétérogénéité rompt le paysage, le nombre d'espèces se multiplie. Une épave, par exemple, peut devenir le support d'un récif corallien d'eau profonde. Une carcasse de baleine attirera une foule d'espèces. Dans les plaines abyssales, un simple nodule polymétallique posé sur le fond peut fonder une petite oasis de vie. En effet, il offre un point d'appui aux animaux sessiles (*qui vivent fixés*

“La principale vulnérabilité des écosystèmes profonds est le manque de connaissances. Seule une infime partie de la biodiversité a été explorée.”

à un substrat, Ndlr), éponges, vers tubulaires, anémones, et constitue un abri sous lequel les animaux du fond peuvent se cacher.

Aussi fascinants soient-ils, ces environnements restent très difficiles à étudier. Les chercheurs voudraient les observer longuement, et suivre leur évolution sous l'effet du changement climatique ou suite à une perturbation, mais les difficultés d'accès rendent l'entreprise peu aisée. « *Il y a moins de vingt sites dans le monde situés au-delà des 500 mètres de profondeur qui sont revisités fréquemment* », explique Nadine Le Bris, professeure en écologie marine à Sorbonne Université, qui étudie depuis douze ans, au Laboratoire d'écogéochimie des environnements benthiques³, les réponses de massifs coralliens méditerranéens face aux pressions anthropiques.

Dégâts à large échelle

L'impact environnemental d'une éventuelle opération minière pourrait se faire sentir sur de grandes échelles. Prenons par exemple l'extraction des nodules. Celle-ci remue de grandes quantités de sédiments qui forment des panaches pouvant voyager sur des centaines de kilomètres et à travers toute la colonne d'eau. « *Ces panaches peuvent affecter les espèces suspensivores comme les coraux et les éponges. Ils pourraient aussi encrasser les organes respiratoires des poissons. La turbidité pourrait aussi mettre en péril les larves qui sont en suspension dans l'eau* », prévient Nadine Le Bris.

L'exploitation des amas sulfurés pourrait rejeter des contaminants dans l'eau. En effet, ces dépôts contiennent des métaux toxiques tels que le plomb, le cadmium ou le mercure. « *On a tendance à considérer l'océan comme un immense bûcher où tout se dilue et où rien n'a de conséquences. Ce n'est pas vrai. Les masses d'eau océaniques ne se mélangent pas si facilement*



Les « fumeurs noirs », ici le long de la dorsale médio-atlantique, constituent d'étonnantes havres de biodiversité.

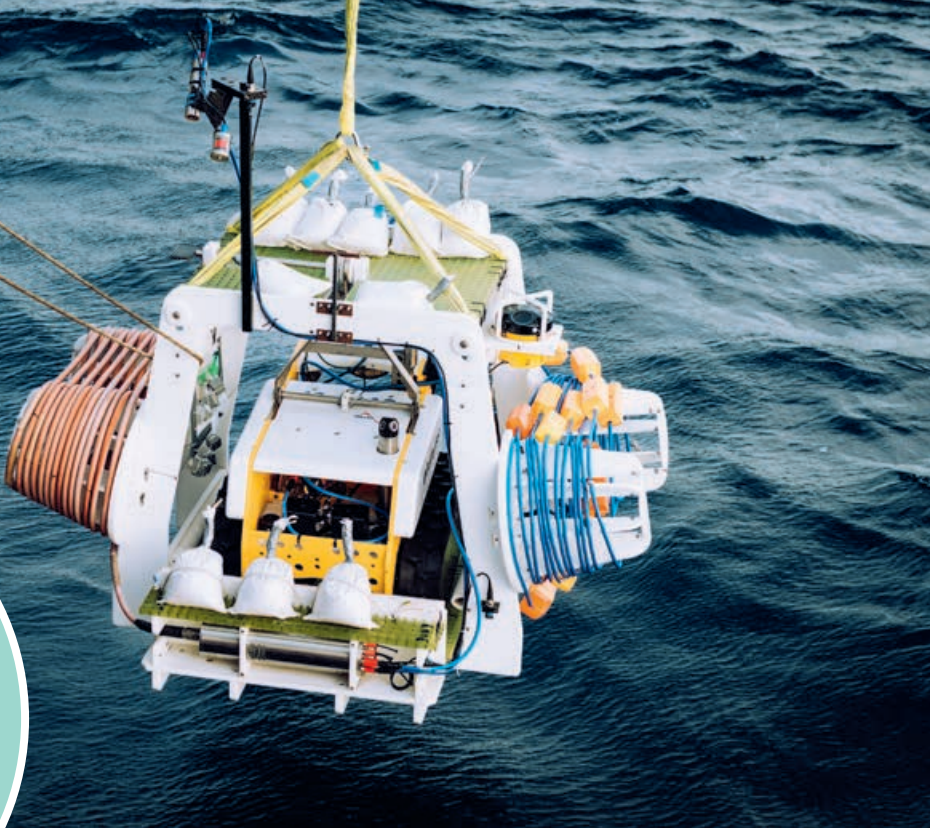
1. Unité CNRS/EPHE-PSL/MNHN/Sorbonne Université. 2. Unité CNRS/Institut de physique du globe. 3. Unité CNRS/Sorbonne Université.

BATHYBOT

Plus d'un an après sa mise à l'eau, BathyBot vient de s'éveiller au fond de la mer Méditerranée. Ce robot téléopéré depuis la surface est le premier à être installé de façon permanente à 2400 mètres de profondeur. Accompagné d'un récif artificiel et d'une batterie d'instruments, BathyBot permettra d'étudier la biodiversité, la bioluminescence et les processus biogéochimiques des fonds marins.



À voir : notre [reportage sur la mise à l'eau du robot](#)



© CYRIL PRESILLOV / MID / CNRS IMAGES

et les courants marins peuvent transporter la pollution sur de longues distances », explique l'enseignante-chercheuse.

Une autre source d'inquiétude majeure concerne le stockage du carbone de l'océan, sachant que celui-ci absorbe un tiers de nos émissions de CO₂. Dans les couches superficielles de l'océan, le phytoplancton prélève une partie du carbone dissous dans l'eau pour se développer. Au fil des chaînes alimentaires, une partie de cette matière organique finit par tomber au fond de l'océan où elle est stockée durant des millénaires. Les mécanismes de cet échange de carbone entre différents niveaux de l'océan ne sont pas encore bien élucidés. Néanmoins, il ne s'agit pas d'un phénomène passif : animaux et micro-organismes, chacun y joue son rôle. Or, pour Nadine Le Bris, « l'exploitation minière, en perturbant ces communautés, pourrait affecter les flux de carbone ». De la même manière, le labourage de grandes étendues du fond marin pourrait libérer dans l'eau de grandes quantités de carbone pris dans les sédiments.

Pour quantifier ces processus, les chercheurs manquent cruellement de données. Comme l'explique Sarah Samadi, pour vraiment mesurer les impacts environnementaux, « il nous faut une vision beaucoup plus globale et comprendre comment s'imbriquent les différents niveaux et les différents écosystèmes ». Voilà pourquoi, invoquant le principe de

précaution, plus de 700 experts en sciences de la mer ont signé une déclaration appelant à un moratoire sur l'exploitation minière en eau profondes. Et sur ce terrain, ils ne sont pas seuls.

Polémiques à l'échelle mondiale

L'Autorité internationale des fonds marins (AIFM), l'organisation chargée d'encadrer l'exploitation minière des grands fonds, pourrait autoriser l'exploitation minière dès juillet 2023. Est-ce à dire que les compagnies minières vont s'engouffrer immédiatement dans la brèche ? « Je préfère être prudent, tempère Pierre-Yves Le Meur, anthropologue de l'unité Savoirs, environnement et sociétés⁴ et spécialiste de la gouvernance des ressources minérales terrestres et marines. Dans les années 1960, on pensait que cette exploitation allait démarrer puis il ne s'est rien passé. Plus tard, dans les années 2000, la compagnie qui était prête à se lancer dans l'extraction de métaux dans les eaux de la Papouasie-Nouvelle-Guinée a fait faillite. »

Pour Sophie Gambardella, chercheuse au laboratoire Droits international, comparé et européen⁵, juriste et spécialiste des régulations portant sur la mer, il reste encore trop de questions ouvertes pour croire à un début imminent de l'exploitation minière. Par exemple, celle de la répartition des bénéfices de ces opérations. Les fonds marins sont un patrimoine de l'humanité et tout ce que l'on en tire doit être partagé équitablement entre les nations. « Les pays développés pensent qu'un transfert de technologies et de capacités vers les pays du Sud est le bon modèle. Les pays du Sud, eux, voudraient plutôt combiner une répartition monétaire et non-monétaire. »

4. Unité Cirad/IRD/UM3. 5. Unité CNRS/Aix-Marseille Université/Université de Toulon.

Autre point de tension : les règles qui encadrent l'exploitation. L'AIFM a construit des instruments visant à limiter les risques, d'abord de l'exploration, et ensuite de l'exploitation des grands fonds. Mais voilà, « ces instruments soulèvent des questions. En principe, c'est à l'exploitant de faire remonter à l'AIFM les données relatives aux impacts environnementaux de l'activité. Mais en pratique, force est de constater que la transparence des compagnies n'est pas toujours totale », explique Sophie Gambardella.

Il n'est même pas sûr que ces opérations soient rentables et compétitives face aux mines terrestres. The Metals Company a subi de durs revers financiers après son coup d'éclat de 2022, et pourrait ne pas avoir les épaules assez solides pour se lancer dans des opérations d'échelle industrielle. « Il y a probablement une dimension spéculative dans ces opérations, y compris, sans doute, dans le cas de The Metals Company », considère Pierre-Yves Le Meur.

Dans les instances internationales, le débat reste très vif. Les nations du Pacifique, là où se trouvent les concessions minières les plus convoitées, sont divisées. « Certains pays sont contre, comme Fidji ou Palau, qui promeut sa biodiversité et son tourisme vert. D'autres sont pour, comme les îles Cook qui veulent commencer l'exploitation dans leur zone économique exclusive. Entre les deux, il y a Tonga qui pense développer l'activité tout en respectant des zones protégées, ou encore Nauru, qui vise les eaux internationales », explique Pierre-Yves Le Meur. Quant aux territoires français du Pacifique, la Nouvelle Calédonie, la Polynésie et Wallis et Futuna, ils se sont positionnés clairement en opposition à l'activité minière. Ce que

“Une douzaine d'États se sont déjà exprimés en faveur d'un moratoire sur l'exploitation des grands fonds marins avec le soutien de nombreuses ONG et de multinationales.”

le président Emmanuel Macron a fait à son tour, au nom de la France, en novembre dernier lors de la CO27 à Sharm el-Sheikh. Une douzaine d'États se sont déjà exprimés en faveur d'un moratoire sur l'exploitation des grands fonds marins avec le soutien de nombreuses ONG et de multinationales telles que Google ou Renault.

Nul ne doute que les prochaines réunions de l'AIFM seront chahutées. Difficile de faire des prédictions vu le contexte, mais il se pourrait que les chercheurs n'aient pas à croiser, lors de leurs prochaines missions océanographiques, de grands vaisseaux miniers. ■

Arthur, le robot archéologue

Ne tenant pas plus de place qu'une machine à laver, Arthur « est le plus petit robot téléopéré capable de plonger à 2 500 mètres de profondeur », assure Vincent Creuze, le chercheur du Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier¹ qui l'a conçu. Depuis 2022, Arthur assiste les archéologues du Drassm, le Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines, dans l'exploration des épaves et autres sites archéologiques immergés. Ses performances en matière d'imagerie et sa capacité à récolter des échantillons en douceur font de ce robot archéologue un instrument de choix pour l'étude

des écosystèmes. Voilà pourquoi le Drassm associe à ses missions des biologistes marins. Ainsi, grâce à Arthur, Nadine Le Bris, du Laboratoire d'écogéochimie des environnements benthiques² peut étudier les coraux qui fleurissent sur les épaves profondes de la

Méditerranée. Grand atout de ces récifs artificiels : il suffit de dater l'épave pour déterminer la vitesse de croissance des coraux et le temps de maturation de ces écosystèmes.

1. Unité CNRS/Université de Montpellier.
2. Unité CNRS/Sorbonne Université.



© V. CREUZE - ROY DRASSM, UNESCO

VIVANT

PHYSIOLOGIE De plus en plus de femmes surclassent les hommes dans les très longues courses d'ultra-trail. Bénéficient-elles d'une meilleure récupération musculaire ? Faut-il leur proposer des entraînements différents pour atteindre leur plein potentiel ? Pour le savoir, Caroline Nicol et ses collègues de l'Institut des sciences du mouvement¹ (ISM) ont suivi de près des sportives et des sportifs lors de la course Marseille-Cassis.

PAR CHARLINE ZEITOUN ET CYRIL FRÉSILLON

Les femmes récupèrent-elles mieux ?



1. Unité CNRS/Aix-Marseille Université.

Info

Ces travaux, ainsi qu'une vingtaine d'autres projets et innovations, sont aussi à découvrir dans la fresque « Sport & science, l'union fait la force » conçue par le CNRS en partenariat avec la RATP, jusqu'au 6 juillet dans les couloirs de la station Montparnasse-Bienvenue, à Paris.



1. Parmi les centaines de publications scientifiques sur la récupération musculaire fonctionnelle (délai pour retrouver ses capacités à renouveler un effort), seules sept portent sur les femmes. Pour en savoir plus, la physiologiste Caroline Nicol a l'idée de comparer celle des hommes et des femmes lors de plusieurs éditions du Marseille-Cassis, une course de 20 kilomètres d'effort à travers le parc national des Calanques.



© RICHARD DYSON / ALAMY / PHOTO12

2. La question de la récupération des femmes se pose depuis des années car des sportives apparemment « infatigables » envahissent les classements des très longues courses, comme Jasmin Paris, ici à la Jura Fell Race de 2016. Cette Britannique de 35 ans est en effet devenue en janvier 2019 la première femme à remporter la Montane Spine Race, ultra-marathon de 430 kilomètres, en 83 heures et 12 minutes, douze heures de moins que l'ancien record.

3. Pour son étude sur le Marseille-Cassis, Caroline Nicol a recruté des participants qu'elle a équipés d'électrodes. But : enregistrer l'activité de leurs muscles associée à la récupération fonctionnelle lors de différents sauts effectués avant la course, le surlendemain (au moment du pic des courbatures) et quelques jours plus tard.



© CYRIL FRÉLON / ISM / CNRS IMAGES

© GUILLAUME RUOPPOLO / JMC22



4. Ici, une volontaire réalise des drop jumps : elle se laisse tomber sur les pieds avant de rebondir aussi vite et haut que possible. Résultat : des déficits fonctionnels persistent quatre jours après la course chez les hommes alors que les femmes ont récupéré dès le deuxième jour.

5. Mais la course Marseille-Cassis présente une particularité : la seconde partie se fait en descente. Ce dénivelé est susceptible de solliciter les ischio-jambiers – muscles situés sur l'arrière des cuisses et réputés plus faibles chez les femmes – davantage qu'une course à plat ou que les drop jumps précédents qui eux sollicitent surtout les triceps suraux situés dans les mollets.



PATRICK SAINTON - INSTITUT DES SCIENCES DU MOUVEMENT



6. Un autre type de saut est donc proposé à cette participante installée sur un siège lesté de 15 kg et qui glisse le long d'un plan incliné. Lâchée d'une hauteur donnée, elle doit lutter contre l'écrasement à l'impact, un peu comme lors d'une course en descente, et rebondir aussi vite et haut que possible. Deuxième résultat : seul ce test, impliquant fortement les ischio-jambiers, montre une récupération fonctionnelle incomplète des femmes au 4^e jour, à l'instar des hommes.



7. Pour suivre aussi la récupération structurale (régénérescence de la structure musculaire au niveau des fibres), les volontaires se rendent au Centre de résonance magnétique biologique et médicale pour passer une IRM (imagerie par résonance magnétique) les jours où ils ont réalisé les tests de sauts.



© CYRIL FRÉSSILLON / ISM / CNRS IMAGES



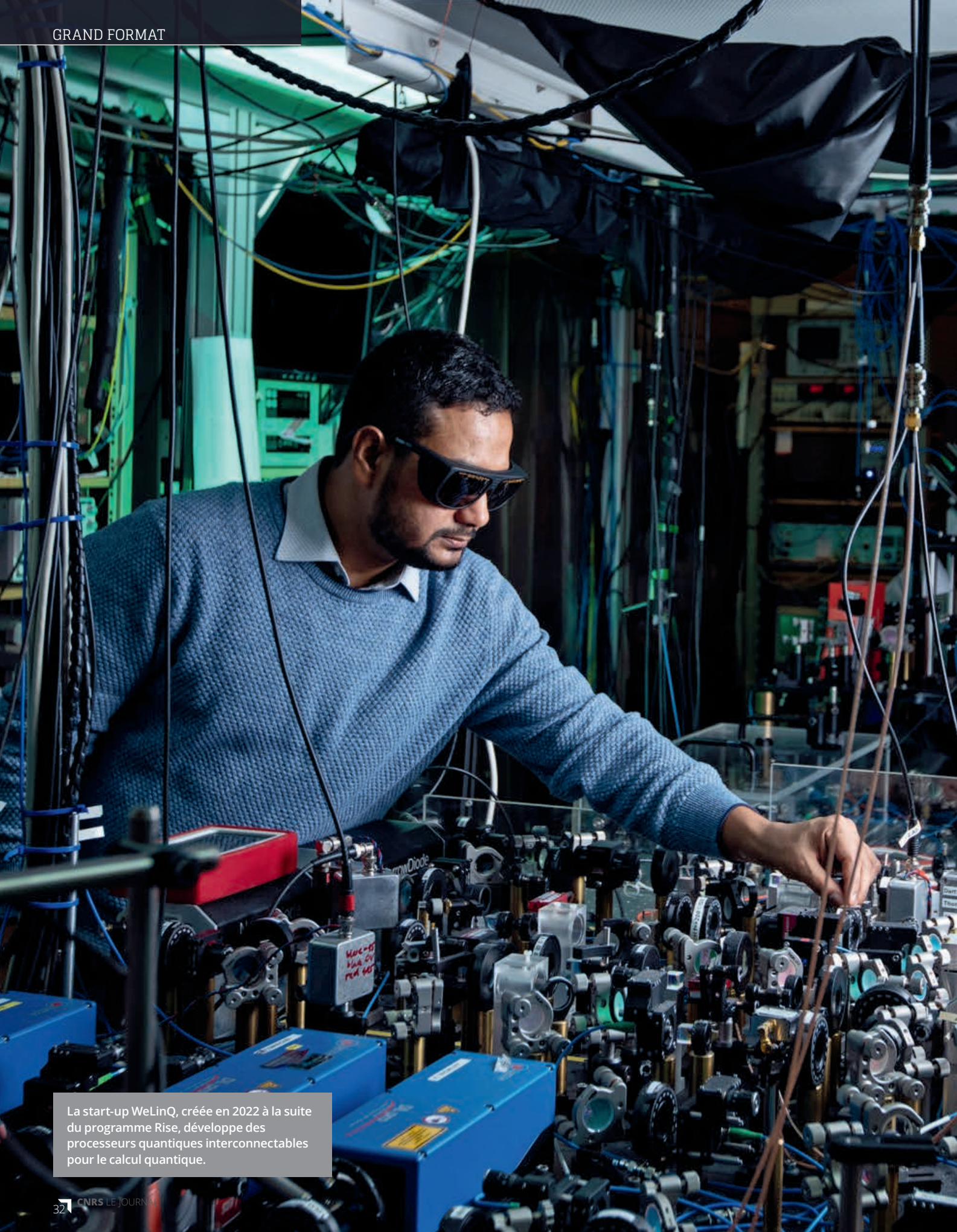
© CYRIL FRÉSSILLON / ISM / CNRS IMAGES

8. Les microlésions musculaires, ou plutôt les marqueurs d'inflammation et de gonflement musculaires sont ainsi localisés et leur évolution suivie au fil des jours de récupération. Les premières analyses ne montrent pas de différence entre femmes et hommes, sauf au niveau des fameux muscles ischio-jambiers pour lesquels les femmes présentent davantage d'inflammation.



© CYRIL FRÉSSILLON / ISM / CNRS IMAGES

9. Au final, les femmes récupèrent plus tôt au niveau fonctionnel, sauf dans les tests qui impliquent les ischio-jambiers. Si ces résultats se confirment, les sportives bénéficieront peut-être à l'avenir d'entraînements spécifiques, en montée et en descente, pour renforcer ces muscles particuliers. Et peut-être battre d'autres records...



La start-up WeLinQ, créée en 2022 à la suite du programme Rise, développe des processeurs quantiques interconnectables pour le calcul quantique.

CNRS RISE UP, *une nouvelle offre pour les entreprises*

Pour la quatrième année consécutive, le CNRS prendra ses quartiers à VivaTech, plus grand salon européen de l'innovation, du 14 au 17 juin à Paris. À cette occasion, l'organisme lancera son offre de services Rise Up, destinée aux entreprises issues des laboratoires sous sa tutelle.

PAR LAURENCE STENVOT

Avec près de 2 000 entreprises créées depuis vingt ans et issues des laboratoires placés sous sa tutelle, le CNRS compte parmi les grands acteurs de la deeptech en France. « Nous présentons cette année à VivaTech une dizaine de start-up sur des thématiques – le quantique, le développement durable, la santé et l'énergie – qui façonnent les défis que doit relever notre société », rapporte Jean-Luc Moullet, directeur général délégué à l'innovation du CNRS. Ces entreprises ont pu bénéficier de l'accompagnement du CNRS pour valoriser des résultats de recherche et les transformer en innovations. « Après les programmes de prématuration¹ et de création de start-up Rise², en passant par le programme de maturation³ opéré par les Satt, nous allons lancer un nouvel outil à l'intention des entreprises issues des laboratoires sous tutelle du CNRS. Et nous voulions que ça se passe à VivaTech. »

Appelé Rise Up, ce dispositif sera officiellement dévoilé le 14 juin. « Cet outil va faciliter l'effet "réseau" et soutenir le développement de toutes les entreprises créées à partir d'une

découverte scientifique réalisée dans un laboratoire dont le CNRS assure la tutelle. Il s'agit de fédérer une grande famille CNRS de l'innovation », ajoute Jean-Luc Moullet.

Sur son stand de 112 m², le CNRS proposera des interventions et des discussions autour des technologies quantiques, de la recyclabilité et de l'économie circulaire, de la décarbonation de l'industrie, ou encore de la chimie verte – des thèmes symboliques des grandes orientations scientifiques en cours. « Les discussions entre pilotes de Programmes

Le stand du CNRS au salon VivaTech 2022.



1. Le programme de prématuration finance la première étape nécessaire aux chercheurs pour mûrir le projet de valorisation et permettre une montée en TRL (Technology Readiness Level) des projets. Son budget en 2021 était de 8 M€, ce qui a permis de soutenir 62 projets innovants. 2. Mis en place en 2019, le programme Rise accompagne des chercheurs-entrepreneurs sur la voie de la création de leur entreprise. Chaque année, une trentaine de projets deep-tech sont ainsi accompagnés. 3. Les programmes de maturation sont souvent portés par les Sociétés d'accélération du transfert de technologies (Satt). Ces dernières investissent en moyenne entre 200 000 à 300 000 € pour chaque projet.



L'usine Afyren Neoxy, en Moselle, est une bioraffinerie unique au monde qui permet de produire 7 acides 100 % biosourcés en circuit court et d'offrir une alternative aux acides pétro-sourcés habituellement utilisés dans des secteurs tels que l'alimentation, les arômes et parfums ou la chimie.

© AFYREN

et équipements prioritaires de recherche (PEPR) exploratoires et dirigeants de start-up symbolisent le trait d'union entre la recherche fondamentale et l'innovation », souligne Jean-Luc Moullet.

Une « grande famille CNRS » de l'innovation

Du laboratoire au marché, voici une vingtaine d'années que le CNRS et CNRS Innovation, sa structure dédiée au transfert technologique créée en 1992, amènent les inventions de chercheuses et chercheurs en technologies au plus près de la société. Technologies qui, parfois, permettent l'éclosion de start-up. « Le programme Rise accompagne une trentaine

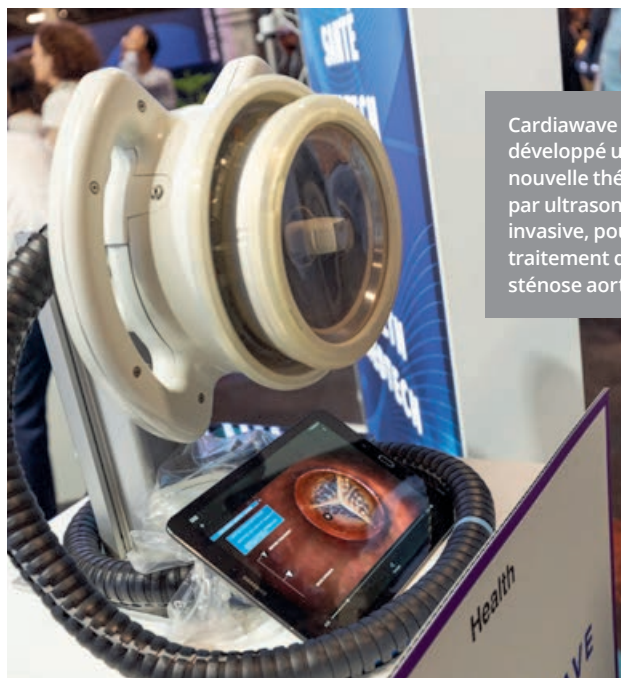
de projets de création d'entreprise par an. Cependant, beaucoup de start-up issues des laboratoires CNRS sont également accompagnées par d'autres acteurs de la valorisation, comme les Satt ou les incubateurs du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche », explique Maëlle Riondet, chargée du nouveau programme Rise Up à CNRS Innovation.

Sur les 1 400 entreprises encore en activité, on retrouve une multitude de profils. Eurofins, par exemple, est le leader mondial des tests de produits dans l'agroalimentaire, la pharmacie, l'environnement et la biologie médicale. Entreprise du CAC 40 créée en 1987 avec 61 000 employés à son actif, Eurofins Scientific a vocation à industrialiser et commercialiser la technologie SNIF NMR®, une méthode d'analyse brevetée permettant de vérifier l'origine et la pureté de nombreux aliments et boissons, dans les cas où les méthodes d'analyses traditionnelles ne réussissent pas à détecter les contrefaçons sophistiquées.

Autre exemple avec Afyren, spécialiste des molécules biosourcées, créée en 2012 et qui a pour projet de monter sa deuxième usine. Alors que les produits de consommation quotidiens sont encore trop largement composés de molécules issues du pétrole, Afyren offre aux industriels des molécules biosourcées de substitution, grâce à sa technologie respectueuse de l'environnement basée sur des micro-organismes naturels.

Citons également la toute jeune start-up WeLinQ, créée en 2022 à la suite du programme Rise, qui développe des processeurs quantiques interconnectables pour le calcul quantique. WeLinQ sera présente à l'occasion du lancement

Cardiawave a développé une nouvelle thérapie par ultrasons non invasive, pour le traitement de la sténose aortique.



© CNRS / YUD POURDIEU LE COZ

de Rise Up, aux côtés des sociétés Sensome (qui met au point une technologie d'aide à la décision au cours du traitement chirurgical d'un accident vasculaire cérébral) et Cardiawave (qui a développé une technologie de traitement par ultrasons de maladies des valves cardiaques), toutes deux emblématiques de réussite en termes de valorisation au CNRS.

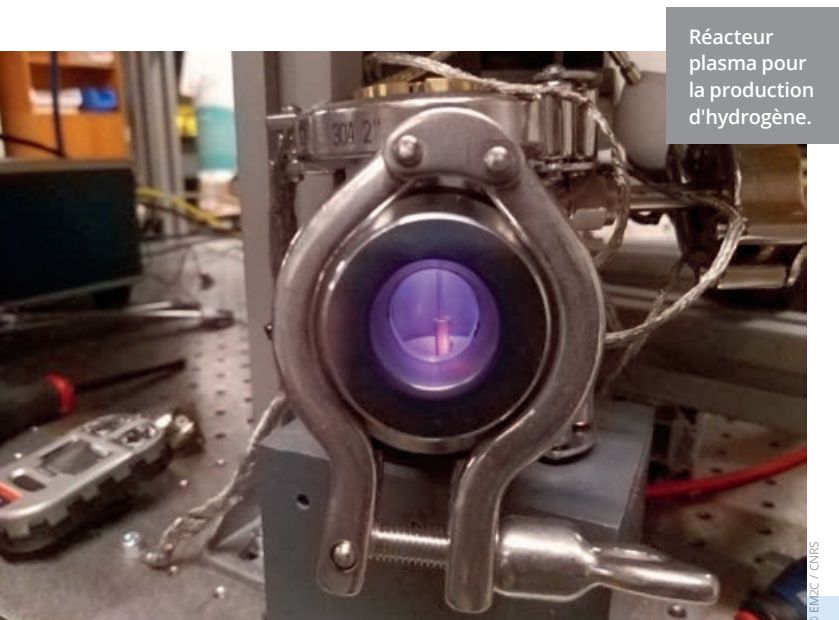
Un réseau pour accompagner les entrepreneurs

Pour Mehdi Gmar, directeur général de CNRS Innovation, toutes ces entreprises, répertoriées depuis 1974 et fortes de leur diversité, méritaient leur propre réseau. Rise Up, une offre de services à destination des entrepreneurs, a pour objectif de « resserrer les liens » entre ces derniers pour « les accompagner ». « Nous avons mené des entretiens avec

“Le CNRS s'affirme comme un acteur majeur de l'innovation et du partenariat industriel, avec une centaine d'entreprises créées par an.”

une soixantaine d'entrepreneurs de start-up issues de laboratoires du CNRS, ainsi que des entretiens avec les personnels du CNRS en charge de la valorisation et des activités entrepreneuriales, pour recenser les besoins de ces entreprises et comprendre ce que nous pouvions leur apporter», rapporte Maëlle Riondet. Parmi ces besoins, des problématiques de recrutement notamment dues à un manque de visibilité et des besoins en profils très techniques ; l'accessibilité à des laboratoires ou matériels spécifiques ; ou encore un manque de visibilité pour trouver de nouveaux clients/partenaires/investisseurs potentiels et faire connaître leur offre.

Rise Up se pose ainsi comme un « outil » supplémentaire pour resserrer les liens avec le monde socio-économique. « Le CNRS s'affirme comme un acteur majeur de l'innovation et du partenariat industriel, avec une centaine d'entreprises créées par an, au taux de survie de près de 80 % à 8 ans. Un très bon score », affirme Mehdi Gmar. La preuve que les entre-



Réacteur plasma pour la production d'hydrogène.

© EM2C / CNRS

Spark Cleantech ↑ au cœur de la décarbonation industrielle

C'est dans le laboratoire Énergétique moléculaire et macroscopique, combustion (EM2C) du CNRS, à CentraleSupélec, qu'ont été posées les prémices de la start-up Stark Cleantech, qui sera présente sur le stand du CNRS à VivaTech. Ayant pour ambition d'accélérer la décarbonation de l'industrie, la start-up développe un procédé de

production d'hydrogène décarboné qui utilise cinq fois moins d'électricité que l'électrolyse¹, directement sur site, avec zéro émission de CO₂. « Le procédé permettra de produire de l'hydrogène économique, même pour de petites capacités pour les futures stations-service hydrogène par exemple, mais surtout de répondre aux besoins d'usages industriels, et ce, directement sur les sites de consommation, donc en s'affranchissant des contraintes de transport et de stockage de l'hydrogène qui peuvent représenter jusqu'à 70 % des coûts de revient », explique Patrick Peters, co-fondateur et CEO de Spark. Suivi par le programme

d'accompagnement à l'entrepreneuriat du CNRS Rise en 2022, la jeune entreprise entre tout juste dans sa phase d'industrialisation après une première levée de fonds réussie et après avoir remporté le Grand prix iLab 2022 de Bpifrance. « Nous souhaitons atteindre le marché avec de premières unités dès 2025, après une phase pilote industrielle en 2024. VivaTech nous permet de débiter cette phase en communiquant sur qui nous sommes et ce que nous faisons », souligne Patrick Peters.

1. Processus d'échange au cours duquel l'énergie électrique est transformée en énergie chimique.

prises s'appuyant sur des technologies du CNRS sont « solides » et que l'organisme est un « acteur historique » de l'innovation en France.

Du recrutement au partage d'expériences

Le programme Rise Up offrira différents services. D'abord, une plateforme de recrutement dédiée, visible au niveau national et dont les offres seront présentées notamment auprès de doctorants et postdoctorants du CNRS. Le réseau permettra également un relai d'actualités des entreprises au sein des canaux de communication du CNRS et de CNRS Innovation pour permettre aux entreprises de gagner en

visibilité. Le réseautage sera également un point d'orgue pour permettre aux entrepreneurs d'échanger librement sur des thématiques ou domaines bien précis.

« Le partage d'expérience est primordial entre entrepreneurs. En effet, la transition de la posture de chercheur à celle d'entrepreneur n'est pas forcément évidente, c'est pourquoi il est important d'avoir des interlocuteurs qui partagent leurs propres expériences. Nous pourrions, par exemple, identifier des entrepreneurs expérimentés de secteurs similaires (mais non concurrents) et les mettre en relation avec des entrepreneurs plus jeunes et ayant besoin de retours d'expérience », indique Maëlle Riondet.

Les entrepreneurs Rise Up bénéficieront également des collaborations avec la Direction des relations avec les entreprises (DRE) du CNRS, qui a notamment à son actif des outils pour des collaborations de recherche tels que les laboratoires communs avec les entreprises. « Une centaine d'entreprises sont créées chaque année à partir de nos laboratoires sous tutelle. Et nous avons pour ambition d'en créer cinquante de plus par an. Rise Up est l'occasion de les célébrer comme membres de la famille CNRS, une famille qui s'agrandit un peu plus chaque année », conclut Mehdi Gmar. ■

© FRÉDÉRIQUE PLAS / CNRS IMAGES



La start-up One Biosciences ambitionne de devenir un leader mondial dans la médecine de précision pour maladies complexes.

One Biosciences ↑ l'IA pour de nouveaux médicaments de précision

« One Biosciences est à un moment stratégique de son développement. Nous souhaitons gagner en visibilité alors que l'activité de l'entreprise s'intensifie, avec en ligne de mire le développement de plusieurs biomédicaments dont les premières étapes sont prévues en 2024. VivaTech représente pour nous un temps fort, pour mieux nous faire connaître des investisseurs, des institutionnels, et également des potentiels partenaires commerciaux », rapporte Magali Richard, CEO de la start-up One Biosciences qui sera présente sur le stand CNRS à VivaTech. Cette jeune entreprise créée en 2020 est

née des travaux de Céline Vallot, lauréate de la médaille de l'innovation 2022 du CNRS et chercheuse au laboratoire Dynamique de l'information génétique : bases fondamentales et cancer¹. « One Biosciences a pour ambition de devenir un leader mondial dans la médecine de précision pour maladies complexes. Elle intègre les technologies en cellule unique et l'intelligence artificielle pour découvrir et développer des nouvelles approches thérapeutiques », explique la chercheuse. Car les technologies de séquençage en cellule unique² de la start-up offrent la possibilité d'accéder à une mine d'informations sans précédent pour comprendre l'hétérogénéité et la dynamique des systèmes biologiques complexes, responsables de mécanismes

pathologiques. Une innovation qui nécessite une interdisciplinarité forte – impliquant à la fois biologie moléculaire, robotique, data science, compétences médicale et industrielle – présente au sein de l'équipe One Biosciences. « Notre force réside en partie dans cette multidisciplinarité, qui a permis de développer un ensemble de protocoles, d'outils et d'algorithmes, qui nous confèrent un avantage compétitif majeur. La prochaine étape de l'entreprise sera notamment de poursuivre cette idée d'innovation pour être toujours meilleurs dans notre capacité à traiter et interpréter les données », indique Magali Richard.

1. Unité CNRS/Institut Curie/Sorbonne Université.
2. Ensemble de techniques de biologie moléculaire qui permettent l'analyse de l'information génétique.

EN ACTION



Du climat aux antibiotiques en passant par la forêt, le droit ou l'Univers, la recherche agit sans relâche pour le bien commun.

ILLUSTRATION : TONWEN JONES / COLAGENE PARIS, POUR CNRS LE JOURNAL



Climat: l'implacable état des lieux du Giec



© UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

TERRE

ENTRETIEN Après huit années de travaux, le Giec a publié en mars son sixième rapport de synthèse. Gerhard Krinner, qui en a coordonné une partie, nous en dit plus sur ce qui constitue désormais la référence scientifique pour les négociations climatiques à venir.

PROPOS RECUEILLIS PAR SEBASTIÁN ESCALÓN

Cette synthèse reprend les conclusions des trois grands volets du 6^e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), publiés en 2021 et 2022, ainsi que de quatre rapports spéciaux précédents. Cela fait beaucoup d'informations à condenser ?

Gerhard Krinner ¹. En effet, nous avons condensé en trente pages des rapports qui font dans les 2 000 pages chacun. Dans l'ensemble du 6^e rapport d'évaluation du Giec, nous avons cité plus de 70 000 articles scientifiques. Si, en moyenne, un article fait quinze pages, cela fait un million de pages de littérature scientifique condensées en trente. C'est du lourd, du très concentré, comme la pilule de l'astronaute (rires).

Quelle est l'importance de ce rapport de synthèse ?

G. K. C'est le couronnement du 6^e rapport d'évaluation du Giec, le produit final, celui qui sera à la base des négociations des futures COP. Avec ce document, aucun État ne peut venir à la table des négociations et dire « finalement, on ne croit pas que l'Homme soit responsable du changement climatique ». En effet, tous les États reconnaissent et approuvent chaque phrase de ce rapport de synthèse.

Parlez-nous du processus de rédaction. Est-ce que, à ce niveau-là, il y a encore des débats entre scientifiques ?

G. K. Pour rédiger cette synthèse, nous étions initialement trente per-

sonnes, plus le président et les vice-présidents du Giec et les co-présidents des groupes de travail I, II et III (dont Valérie Masson-Delmotte). J'ai coordonné la deuxième section, qui porte sur le climat à long terme, avec une chercheuse américaine, Kate Calvin, qui est la directrice scientifique de la Nasa.

Quant aux débats scientifiques, il y en a tout le temps. La science n'est jamais finalisée. Par contre, sur les questions fondamentales, il n'y a plus de doute raisonnable possible, en particulier sur l'attribution du changement climatique. Le premier rapport du Giec, en 1990, disait que l'« on observe des changements compatibles avec l'action de l'Homme, mais compatibles aussi avec la variabilité

1. Directeur de recherche au CNRS, à l'Institut des géosciences de l'environnement (unité CNRS/IRD/Inrae/Université Grenoble Alpes).

Derrière cet homme, une épaisse fumée s'élève d'un feu allumé illégalement dans un champ de maïs en bordure d'une réserve de la forêt tropicale (Sinop, État du Mato Grosso, Brésil, le 9 août 2020).

naturelle du climat. » Depuis se sont ajoutées trois décennies de changement climatique. On a constaté une augmentation linéaire de la température moyenne globale de presque 0,2 °C par décennie depuis 1970. Aujourd'hui la phrase équivalente d'attribution dans le rapport du Giec est : « les activités humaines ont causé un réchauffement égal à celui qui est observé ». Autrement dit, tout le réchauffement climatique observé est attribué à l'activité de l'Homme.

Ce rapport a été approuvé par l'ensemble des États qui siègent à l'ONU. Comment se déroule cette procédure ?

G. K. Une fois que nous, les scientifiques, avons atteint un consensus, nous rédigeons une synthèse à l'intention des décideurs. Cette synthèse, c'est ce que nous voulons leur dire. Ensuite, les 195 pays discutent et doivent l'approuver phrase par phrase. Certains pays veulent enlever une phrase, ou au contraire, renforcer un constat. Notre rôle, en tant que chercheurs, est d'assurer que le rapport final reste scientifiquement correct. Ce sont des négociations parfois un peu pénibles, mais tout ce qui figure dans le rapport final a l'assentiment des chercheurs. Les scientifiques ont un droit de veto absolu.

Quelles en sont les principales conclusions ?

G. K. La première section du rapport porte sur le climat qu'on observe aujourd'hui et sur comment on en est arrivé là. Les messages clés sont : on observe un changement climatique dans toutes les régions du monde. Il est sans précédent. Il est extrêmement rapide par rapport aux changements naturels. Il est dû à l'Homme, point final. Des actions pour enrayer le changement climatique ont commencé au niveau mondial, et l'augmentation des émissions commence à ralentir. On commence à voir des résultats mais c'est loin d'être suffi-

sant, les impacts du changement climatique atteignant dans certains cas les limites dures de l'adaptation. C'est le cas pour certains écosystèmes comme les récifs coralliens tropicaux. Autre message essentiel, ce sont les pays les plus riches qui sont les plus responsables du changement climatique. Et à l'intérieur de chaque pays, ce sont les populations les plus riches qui émettent le plus. Quand on regarde la quantité totale de CO₂ émise entre 1900 et aujourd'hui, les anciens pays industriels portent bien entendu une grande responsabilité.

“Toute mesure d'atténuation doit prendre en compte la justice climatique. D'autant plus qu'il n'est pas efficace de faire porter le chapeau aux populations les plus pauvres.”

Qu'en est-il des conclusions de la deuxième section, celle que vous avez coordonnée.

G. K. Ce deuxième volet porte sur l'évolution du climat au long terme, au-delà de 2040. En prenant en compte les politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre implémentées aujourd'hui, nous allons vers un réchauffement global compris entre 2,2 et 3,5 °C en 2100, avec une stabilisation des émissions à peu près au niveau actuel. C'est moins catastrophique que ce qu'on aurait pu croire il y a trente ans. Toutefois, il n'est pas exclu que les émissions continuent à augmenter. Ce qu'on sait avec plus de certitude, c'est qu'au moment où l'on arrivera à zéro émission nette de CO₂, le climat va se stabiliser rapidement. Zéro émission

nette de CO₂ égale stabilisation du climat. C'est là un message très clair et très important de cette synthèse.

Quid de la troisième section du rapport de synthèse ?

G. K. C'est celle qui dit ce qu'on peut faire. Dans les vingt prochaines années, le climat va continuer à se réchauffer et il est très probable que l'on dépasse les 1,5 °C au cours des années 2030. Mais ce n'est pas une raison pour baisser les bras. Parmi les actions, il y a le développement des sources d'énergie renouvelable, bien sûr, mais il faut aussi agir sur la demande. Il ne faut pas seulement encourager la sobriété, il faut aussi la rendre possible. Autre conclusion : toute mesure d'atténuation doit prendre en compte la justice climatique. D'autant plus qu'il n'est pas efficace de faire porter le chapeau aux populations les plus pauvres.

La fin de ce sixième cycle du Giec annonce le début d'un septième... Comment imaginez-vous le prochain rapport ? Quelles sont les questions qu'il devra aborder avec plus de détails ?

G. K. Je pense qu'il va y avoir des recherches sur la géo-ingénierie et que dans le septième rapport on pourra mieux en parler. On en saura plus sur les mesures d'adaptation, en particulier sur celles qui sont le plus efficaces sur le long terme. On pourra peut-être en dire plus sur les mesures de capture et de stockage du carbone. Nous aurons de meilleures informations sur le changement climatique à l'échelle régionale, qui est toujours difficile à modéliser, et nous aurons peut-être les moyens de faire des prévisions climatiques à l'échelle décennale. Il y a beaucoup de domaines où la science a des progrès à faire. ▮

**+
À lire**

Retrouvez cet entretien dans son intégralité ainsi que tous nos contenus consacrés au climat dans notre dossier « Climat : le défi du siècle » sur lejournalcnrs.fr

Cryptoactifs : vers des alternatives éco-compatibles ?

NUMÉRIQUE

INFORMATIQUE Bitcoin et cryptomonnaies sont décriés pour les énormes besoins en électricité requis par leur mécanisme de validation des transactions. La recherche explore de nouvelles pistes pour des blockchains plus vertueuses.

PAR MARTIN KOPPE

Fer de lance des cryptomonnaies (aussi appelées cryptoactifs), le Bitcoin est un réseau permettant d'effectuer des paiements de pair à pair via Internet sans impliquer de banques (*Bitcoin désigne le réseau, bitcoin l'unité de compte de la cryptomonnaie qui repose sur le réseau homonyme, ndlr*). L'incontestable succès technique et financier de Bitcoin – qui n'a jamais été « piraté » et dont la capitalisation boursière atteint les 500 milliards d'euros 14 ans après son invention en 2009 – est cependant tempéré par son impact environnemental¹. En effet, la conception même de son système de validation exploite un protocole particulièrement énergivore.

Comme tous les cryptoactifs, le réseau Bitcoin est adossé à une blockchain : un registre public partagé et inviolable où sont enregistrées toutes les transactions effectuées entre participants. La sécurité, l'invulnérabilité et la décentralisation du système reposent sur la vérification/validation des transactions par des membres du réseau appelés « mineurs ». Toutes les dix minutes, les machines de ces mineurs doivent résoudre un problème de calcul brut ; le premier mineur à y parvenir peut inscrire définitivement dans la blockchain le bloc de transactions qu'il vient de valider et reçoit en récompense des bitcoins nouvellement créés. Ce protocole est appelé *proof of work* (PoW), car pour être reconnu valideur de la blockchain – et être récompensé – il faut apporter la preuve d'un travail fourni (en l'occurrence, un calcul).



S'il a prouvé sa fiabilité et sa robustesse, ce procédé a toutefois un défaut majeur : il mobilise une puissance de calcul – et donc une consommation électrique – énorme, et qui ne cesse de croître. Ainsi, l'indice *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index*² de l'université de Cambridge (Royaume-Uni), qui évalue quotidiennement la consommation électrique nécessaire au fonctionnement du réseau Bitcoin, estime que la cryptomonnaie

1. Lire « Le réseau Bitcoin, une erreur follement coûteuse », sur lejournal.cnrs.fr 2. <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci> 3. Voir « La consommation d'électricité en chiffres », sur edf.fr. 4. Unité CNRS/ENS des Mines de Saint-Étienne/Univ. Clermont-Auvergne. 5. <https://inria.hal.science/hal-02559573/> 6. Unité CNRS/Univ. de Strasbourg. 7. Pour *Better algorithms for secure and efficient blockchains*, meilleurs algorithmes pour des blockchains sûres et efficaces. <https://base-bloc.bramas.fr/> 8. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-91014-3_9

engloutit entre 62 et 230 TWh d'électricité par an ; l'équivalent de 10 à 40 % de la consommation électrique totale en France³. La conception de nouvelles manières de récompenser les mineurs est donc essentielle au développement d'alternatives plus soutenables.

Des alternatives au calcul brut

L'Ethereum, seconde cryptomonnaie la plus populaire, est ainsi basé sur un protocole *proof of stake* (PoS). Dans cette preuve d'enjeu, ou de participation, un tirage au sort s'effectue en fonction des sommes que les utilisateurs bloquent dans la cryptomonnaie en question. Plus ils en ont et plus ils ont de chance d'être choisis. *« La proof of stake a résolu une partie du problème, mais en rognant sur le principe de décentralisation, tempère Pascal Lafourcade, professeur à l'université Clermont Auvergne et membre du Laboratoire d'informatique de modélisation et d'optimisation des systèmes⁴ (Limos). Il existe également un concept de proof of space, où les utilisateurs récompensés sont ceux qui allouent de l'espace disque pour stocker les données d'une blockchain. »*



© CHANYANUCH - STOCK.ADOBE.COM

Expert en sécurité, notamment de véhicules connectés et d'examens en ligne, Pascal Lafourcade a quant à lui codéveloppé la *proof of behavior*⁵. C'est alors la preuve d'un bon comportement qui est mise en avant. Le projet EcoMobiCoin, qu'il dirige, vise à établir un système où la blockchain est modifiable par les utilisateurs qui privilégient une mobilité verte : vélo, transports en commun, marche, etc. Une preuve de concept est en cours de développement.

« Tout comme le bitcoin, le succès d'une cryptomonnaie dépend du fait que des individus et des entreprises acceptent d'être payés avec, reconnaît Pascal Lafourcade. Dans l'idée

d'EcoMobiCoin, on peut imaginer un cercle vertueux où les gens pourraient financer une partie de leurs déplacements avec les ecomobicoin qu'ils ont obtenus pour avoir favorisé les mobilités vertes. On pourrait diversifier les coins dans toutes sortes d'applications. J'aimerais par exemple explorer l'idée d'un éducoin où des professeurs attestent de la présence et de l'implication des élèves, qui sont alors récompensés. »

Alléger les blockchains

Il n'y a pas que les protocoles de validation des transactions qui peuvent être optimisés. À mesure que la blockchain enregistre de nouvelles transactions, le fichier partagé dans lequel elle est enregistrée ne cesse de s'alourdir. La blockchain Bitcoin pèse aujourd'hui près de 500 Teraoctets ! Quentin Bramas, maître de conférences à l'université de Strasbourg et membre du laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie⁶ (lCube), étudie notamment les algorithmes distribués, c'est-à-dire qui fonctionnent sur plusieurs machines en réseau en même temps et qui doivent malgré tout rester synchronisés. Ses travaux l'ont amené à explorer la robotique en essaim, parfois inspirée du mouvement des nuées d'oiseaux et des bancs de poissons, où l'on cherche à identifier la quantité de mémoire minimale nécessaire pour résoudre des tâches. Une problématique qui l'a mené jusqu'à s'intéresser aux blockchains. *« Ces travaux se rejoignent sur la question du consensus : comment des systèmes décentralisés parviennent à se mettre d'accord sur chaque valeur, détaille Quentin Bramas. Ces approches sont assez théoriques, car il est parfois impossible d'y arriver à cause d'un manque d'informations. »*

Le chercheur porte le projet Base Bloc⁷, financé par l'Agence nationale de la recherche, qui vise à réduire la consommation d'énergie, mais aussi d'espace des blockchains. En quête d'un algorithme de consensus plus économe, il approfondit le concept de *proof of interaction*⁸, qu'il a codéveloppé. Ici, c'est le temps de transmission des messages dans le réseau des mineurs qui sert de critère pour le tirage au sort. Ce point ne peut pas être comparé par des utilisateurs qui se suréquiperait, comme cela a lieu avec les mineurs de bitcoins qui ont à un moment fait flamber le prix des cartes graphiques. La *proof of interaction* réclame peu de puissance de calcul, et ce même quand la taille de la blockchain et le nombre d'utilisateurs montent en flèche.

Il existe aussi des solutions moins algorithmiques, qui consistent à mieux cerner ce dont les gens ont réellement besoin face à certains effets de mode. *« Une blockchain permet de vérifier ce qu'il s'est produit dans le passé, or, pour cela, toutes les informations ne sont pas forcément utiles, souligne Quentin Bramas. On peut donc identifier et enlever le superflu pour que le registre ne grandisse pas à l'infini à force d'échanges. De même, les entreprises s'intéressent souvent aux blockchains pour sécuriser des données partagées au sein d'un consortium. Dans ce cas, elles n'ont en fait pas besoin d'une blockchain publique et il est alors bien plus facile de concevoir des algorithmes sobres et efficaces. »* ||

Quand la recherche s'intéresse au droit et à la justice

SOCIÉTÉS



Le CNRS est membre de l'Institut des études et de la recherche sur le droit et la justice, qui propose une vision interdisciplinaire et interprofessionnelle de ces enjeux.

PAR SOPHIE FÉLIX

“ Notre objectif est de décroiser les relations entre scientifiques, professionnels du droit et de la justice qui travaillent sur le terrain, et institutions et pouvoirs publics qui se préoccupent de ces questions », résume Valérie Sagant, directrice de l'Institut des études et de la recherche sur le droit et la justice (IERDJ). Né le 1^{er} janvier 2022 de la fusion de deux entités – l'Institut des hautes études sur la justice et la Mission de recherche Droit et Justice –, l'IERDJ en poursuit et prolonge les missions.

Croiser les points de vue

Pour cela, l'institut a choisi une forme juridique particulière : le groupement d'intérêt public de droit français. Ni laboratoire, ni association loi 1901, ni groupement de recherche, ce statut permet de « réunir autour d'un objectif commun des acteurs de l'État et des acteurs privés », explique la directrice. En cela, il constitue un « levier intéressant pour croiser les intérêts et les perspectives différentes sur les questions du droit et de la recherche ». Les seize membres constitutifs du groupement – dont les quatre Cours supérieures françaises (Conseil constitutionnel, Conseil d'État, Cour de cassation et Cour des comptes), des organismes professionnels et des associations – assurent donc collectivement la gouvernance. Ils contribuent au budget et au personnel de l'institut, issu du monde scientifique, des juridictions ou de directions du ministère de la Justice. Ce dernier assure la vice-présidence avec le CNRS.

Engagé depuis près de trente ans dans la Mission de recherche Droit et Justice qu'il a co-crée avec le ministère

de la Justice, le CNRS renforce son implication dans le nouveau groupement. « L'IERDJ est un magnifique écrin pour réaliser l'une des missions de l'organisme : œuvrer à la connaissance pour le bien commun, analyse Marie Gaille, directrice de l'Institut des sciences humaines et sociales (INSHS) du CNRS. Cet écrin tient dans le fait de garantir à la recherche scientifique en droit et sur le droit, les pratiques juridiques, les métiers et les évolutions de la justice, la possibilité de développer des questionnements nourris par les échanges à l'interface de tous les partenaires de l'institut, donc en prise avec les mutations de la société. Cette recherche est autant le fait de spécialistes du droit que de sociologues, historiens, philosophes, politistes, etc. » Ce soutien est « extrêmement important pour développer nos nouvelles ambitions, assure Isabelle Sayn, directrice de recherche au CNRS et directrice adjointe scientifique de l'IERDJ. Le CNRS incarne la dimension “recherche” de l'institut et en garantit l'indépendance. Il joue un rôle essentiel dans l'équilibre entre les membres. »

Faire émerger de nouvelles recherches

Structure de référence, l'IERDJ agit de plusieurs manières pour produire des connaissances. Tout d'abord, il soutient et finance vingt à trente projets de recherche interdisciplinaire par an. Cinq appels à projets ont ainsi été lancés début 2023, sur des thématiques comme la justice sociale, les métiers des personnels de soutien à l'activité judiciaire, ou encore la justice environnementale. Des axes pérennes ont été identifiés, comme les besoins de justice, l'impact du numérique sur le monde judiciaire ou le rôle de ce dernier dans la sauvegarde de l'environnement. « Nos appels détaillent les questions que nos membres se

1. et 2. Unité CNRS/Université Paris Nanterre. 3. *La Justice en examen : attentes et expériences citoyennes*, Cécile Vigour, Bartolomeo Cappellina, Laurence Dumoulin et Virginie Gautron, PUF, coll. « Le lien social », septembre 2022.



scientifique pour éviter les biais et garantir notre vision particulière pluridisciplinaire et interprofessionnelle », souligne Isabelle Sayn. Sur le thème de la corruption par exemple, ce travail a permis d'organiser un colloque confrontant le point de vue des scientifiques et des professionnels de la lutte contre la corruption, afin de faire émerger de nouvelles questions et remobiliser les chercheurs et chercheuses sur ce sujet quelque peu délaissé.

Impliquer la société civile

Conformément à la politique du CNRS envers la science ouverte, toutes ces productions sont disponibles en ligne, en complément de notes de synthèse sur les projets soutenus ou encore de rediffusions de rencontres. Diffuser les connaissances auprès des scientifiques, des professionnels du terrain et des décideurs et institutions est en effet une des missions de l'institut, qui participe également à l'élaboration de formations, par exemple avec l'École nationale de la magistrature. L'IERDJ s'ouvre aussi à l'international avec son conseil scientifique et des financements et prix de thèse accessibles aux scientifiques étrangers francophones.

Mais « nous avons l'ambition d'aller plus loin, dans une approche encore plus interdisciplinaire qui intégrerait davantage la société civile », annonce Valérie Sagant. Des représentants de la société civile, comme des associations ou des entreprises, sont ainsi conviés aux colloques organisés par l'IERDJ, qui entend également « alimenter la réflexion sur les politiques publiques en cours de développement » via ses membres ministériels. L'institut souhaite enfin inciter les chercheurs et chercheuses à systématiser l'étude du point de vue des citoyens et justiciables. « Le rôle de l'IERDJ est aussi d'ouvrir la recherche sur le monde juridique à d'autres préoccupations, terrains et méthodes. Nous souhaitons explorer toutes les résonances de ces travaux dans la société », conclut Valérie Sagant. ▮

posent sur chaque thématique et financent des projets problématisés », précise Isabelle Sayn.

Parmi les projets sélectionnés lors de précédents appels, l'équipe pluridisciplinaire de Sophie Harnay, au laboratoire EconomiX¹, étudiera l'impact des mutations institutionnelles, économiques et sociales contemporaines sur la profession d'avocat, la transformation de ses pratiques, représentations et valeurs. Robert Carvais, directeur de recherche CNRS au Centre de théorie et analyse du droit², s'intéresse quant à lui au discours des greffiers des bâtiments au XVIII^e siècle. Une autre recherche, conduite avec l'appui de la Mission de recherche Droit et Justice, a aussi donné lieu à l'ouvrage *La Justice en examen*³, portant sur la perception et les attentes des citoyens vis-à-vis de la justice.

D'autre part, l'institut produit des études rédigées à l'issue du travail de groupes de réflexion sur une question précise, comme le droit des générations futures, notamment en matière d'environnement. Il fait également rédiger des états des connaissances, par exemple sur la thématique « justice et environnement » ou sur l'application des neurosciences dans le domaine du droit et de la justice. « Les experts et expertes chargés de rédiger ces états des connaissances sont toujours accompagnés par un comité

 Pour en savoir plus
 >> <https://gip-ierdj.fr>

La forêt au défi du changement climatique

© JONATHAN LENOIR / EDYSAN (CNRS - UPJV)



© JONATHAN LENOIR

VIVANT



TERRE



ÉCOLOGIE Récent lauréat de la médaille de bronze du CNRS, l'écologue Jonathan Lenoir nous explique les enjeux qui entourent la préservation des écosystèmes forestiers dans le contexte du réchauffement climatique global.

PROPOS RECUEILLIS PAR GRÉGORY FLÉCHET

La forêt est un maillon essentiel du climat mondial. Mais de quelle manière le changement climatique agit-il sur les écosystèmes forestiers ?

Jonathan Lenoir ¹. Ces dernières décennies, nous avons constaté que certaines forêts produisaient plus de biomasse aérienne sous l'effet du réchauffement climatique. Ceci peut sembler une bonne nouvelle puisque cet accroissement de la biomasse est synonyme d'un stockage de CO₂

plus important. Mais le réchauffement climatique se traduit aussi par l'augmentation des températures extrêmes et des sécheresses, à la fois en fréquence et en intensité. La combinaison de ces phénomènes est à l'origine des mégafeux que l'on a pu observer en Californie, en Australie et au Chili pas plus tard que cet hiver. Or, le relargage massif de CO₂ à la suite de ces immenses incendies de forêts alimente à son tour l'emballement climatique.

Certains de ces écosystèmes sont-ils plus sensibles que d'autres aux effets du changement climatique ?

J. L. Nous savons que les forêts situées de part et d'autre de l'équateur seront davantage affectées car les espèces animales et végétales qui les composent sont très proches des limites de températures qu'elles peuvent supporter, ce qui implique une marge de sécurité plus étroite en contexte de réchauffement global. Le manque de diversité au sein de certains écosystèmes forestiers gérés par l'homme limite par ailleurs leurs capacités d'adaptation. À l'inverse, plus une forêt est hétérogène et diversifiée, plus elle sera en mesure de s'adapter aux perturbations climatiques à venir.

1. Chargé de recherche au CNRS, au laboratoire Écologie et dynamique des systèmes anthropisés (Edysan, unité CNRS/Université de Picardie Jules Verne).

► Ambiance fraîche et humide d'un microclimat forestier, avec un hêtre couvert de mousses, dans la réserve naturelle de la vallée de Chaudefour (Auvergne).

L'autre grande menace qui pèse sur les forêts est donc la perte de biodiversité. Quelles en sont les causes principales ?

J. L. Le réchauffement climatique en est une, mais d'autres facteurs entrent en jeu. Dans la plupart des pays de la zone tropicale, la déforestation destinée à étendre les parcelles agricoles joue un rôle majeur. Et l'introduction d'espèces exotiques a aussi un impact non négligeable. En perturbant la forêt par le défrichage ou les coupes rases, l'humain offre une porte d'entrée à de nouvelles espèces qui peuvent potentiellement devenir envahissantes.

Prenons le cas d'une forêt très peu perturbée par les activités humaines. Comment le dérèglement climatique va-t-il agir sur elle ?

J. L. Sur ce genre de milieu, les changements sont plus graduels. Dans un premier temps, la forêt évolue vers un nouvel état d'équilibre où des espèces qui étaient jusqu'ici sous-représentées deviennent dominantes. Mais au-delà d'un certain seuil de réchauffement, les essences d'arbres les plus sensibles à la hausse des températures et au manque d'eau finissent par dépérir. La répétition d'événements climatiques extrêmes affaiblit par ailleurs les espèces les plus robustes qui deviennent vulnérables aux attaques d'insectes phytophages ou de champignons. Néanmoins, la diversité taxonomique, structurelle et fonctionnelle des forêts peu perturbées par les activités humaines les rend plus résistantes et surtout plus résilientes aux dérèglements climatiques.

À l'heure actuelle, quelles sont les grandes questions que se posent les scientifiques de votre communauté sur la forêt ?

J. L. L'un des grands enjeux concerne l'impact du réchauffement climatique global sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers et la rétroaction que ces derniers exercent sur le climat. Plusieurs travaux ont déjà montré qu'il existe une interrelation forte entre le fonctionnement de l'atmosphère et celui de la biosphère, dont les arbres constituent un élément majeur et moteur des cycles biogéochimiques, comme celui de l'eau. Les forêts redistribuent une grande partie de l'eau contenue dans les sols vers l'atmosphère où elle est ensuite véhiculée, via les nuages, vers d'autres régions du globe. La façon dont ce mécanisme se met en place puis est régulé constitue un champ de recherche important pour l'écologie forestière et les sciences du climat.

Au sein du laboratoire Edysan, vous étudiez plus particulièrement le microclimat sous couvert forestier. De quoi s'agit-il ?

J. L. L'ensemble des arbres qui composent une forêt peut s'apparenter à une pompe biologique qui puise l'eau du sol. Tant que cette ressource est disponible et qu'elle est accessible par les racines, les arbres vont l'extraire par transpiration au cours de la photosynthèse. Après avoir transité par le tronc et les branches, l'eau est finalement relarguée sous forme de vapeur au niveau des feuilles. En période de canicule ou de sécheresse excessive, ce phénomène va faire chuter la température localement car cette eau provenant du sol est plus froide que l'air ambiant.

Depuis un peu plus de deux ans, vous coordonnez le projet Imprint qui s'intéresse au microclimat des forêts françaises. Quels sont ses principaux objectifs ?

J. L. Il s'agit d'étudier le rôle du microclimat dans les changements de distribution des espèces végétales qui composent une forêt. Ce travail se déroule sur trois forêts domaniales françaises réparties le long d'un axe nord-sud : la forêt de Mormal au nord, celle de Blois dans le centre de la France et celle de l'Aigoual au sud.

Chacune est dotée d'un réseau d'une soixantaine de capteurs qui enregistrent en continu la température sous le couvert végétal. Une station météorologique mesure également la température en lisière de chaque massif. Ces données sont ensuite intégrées dans un modèle utilisant des données descriptives en trois dimensions de la forêt obtenues par un scanner lidar aéroporté. D'ici la fin du projet, prévue à l'horizon 2025, nous serons en mesure d'élaborer des cartes à fine résolution spatiale et temporelle des microclimats des trois massifs forestiers, qui pourraient servir à identifier de potentielles zones refuges aux conditions climatiques stables ou bien encore à anticiper les risques d'incendies en période de sécheresse.

Récemment, vous avez contribué à une étude internationale ² qui démontre l'importance de conserver une diversité des classes d'âge parmi les arbres qui composent une forêt.

J. L. Ce travail cherchait à vérifier si l'âge d'un arbre influence ses capacités de résistance et de résilience à un épisode de sécheresse. Nos investigations tendent à montrer que les jeunes arbres sont moins résistants que les vieux individus l'année de la sécheresse, probablement parce que leurs racines ne sont pas assez développées pour puiser l'eau en profondeur. Ils limitent alors leur croissance au maximum pour surmonter ce handicap. Ils vont toutefois pouvoir bénéficier du rafraîchissement local issu de la transpiration des plus vieux. Au cours des trois ou quatre années qui suivent un tel épisode, les jeunes arbres vont rattraper ce retard de croissance, plus vite que les individus âgés. Une forêt qui respecte un certain équilibre générationnel entre les arbres sera donc plus à même de surmonter un violent stress hydrique. ■



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

2. "Younger trees in the upper canopy are more sensitive but also more resilient to drought", Tsun Fung Au et al., *Nature Climate Change*, décembre 2022.

Trouble dans la cosmologie

UNIVERS

ASTROPHYSIQUE La vitesse d'expansion de l'Univers, un paramètre nommé constante de Hubble, a fait l'objet de deux mesures aux résultats incompatibles. Ce désaccord pourrait faire chanceler le modèle standard de la cosmologie.

PAR JULIEN BOURDET

La cosmologie est en crise ! Au cœur du problème : la vitesse d'expansion de l'Univers qui, tel un gigantesque ballon de baudruche enfle encore et encore depuis 13,8 milliards d'années. Quand les astrophysiciens mesurent avec leurs télescopes le taux actuel de cette expansion, connue sous le nom de constante de Hubble (ou H_0), ils trouvent une valeur incompatible avec celle prédite par le modèle standard de la cosmologie, la théorie qui décrit le mieux pour l'instant l'histoire de l'Univers, depuis son origine (le Big Bang) et les premiers atomes jusqu'à aujourd'hui, en passant par les premières étoiles et galaxies.

Ce désaccord n'est donc pas anodin : il pourrait signifier que ce modèle, qui fait jusqu'ici consensus, est à revoir. Rien de moins. Sauf si une erreur s'est glissée dans les

► La première image de champ profond par le télescope spatial James-Webb, révélée en juillet 2022, est la plus nette et la plus précise jamais réalisée dans l'infrarouge.

mesures. Le débat fait rage actuellement chez les scientifiques qui tentent par tous les moyens de résoudre la « tension de Hubble » comme ils l'ont baptisée.

Méthodes de mesure

C'est l'astronome américain Edwin Hubble qui a été le premier à estimer la valeur de la constante qui porte aujourd'hui son nom. En 1929, il observe que les galaxies s'éloignent de nous, et ce d'autant plus vite qu'elles sont lointaines – le rapport entre la vitesse de fuite d'une galaxie et sa distance donne H_0 . La découverte, qui implique que l'Univers est en expansion, est au fondement même de l'idée du Big Bang et marque le début de la cosmologie moderne. D'où l'importance pour les physiciens de mesurer précisément la valeur de ce paramètre.

D'autant que pour venir compliquer encore plus l'affaire, les astrophysiciens savent aussi, depuis vingt-cinq ans, que l'expansion cosmique va en accélérant, sous l'effet d'une mystérieuse énergie noire, qui représenterait deux tiers du contenu de l'Univers et dont la nature reste inconnue. Depuis les premières observations historiques, l'amélioration des techniques a permis d'affiner considérablement la mesure de la constante. Deux méthodes sont principalement utilisées aujourd'hui pour la déterminer.

La première repose sur l'analyse du fond diffus cosmologique, première lumière émise par l'Univers, lorsque celui-ci était âgé de 380 000 ans. Ce rayonnement est toujours visible aujourd'hui et on a pu le cartographier en détail, notamment grâce au satellite européen Planck. En reconstituant ainsi les conditions qui régnaient dans l'Univers primordial, on a alors pu prédire, dans le cadre du modèle cosmologique, le taux d'expansion qu'on devrait observer aujourd'hui. Résultat : selon les données de Planck publiées en 2020, H_0 est égale à 67,4 kilomètres par seconde par mégaparsec (Mpc) – un mégaparsec correspondant à une distance de 3,26 millions d'années-lumière. Cela veut dire que sur une telle distance, l'Univers grandit de 67,4 km toutes les secondes.

La seconde méthode, elle, consiste à mesurer directement H_0 en déterminant la vitesse d'éloignement et la distance des autres galaxies. La vitesse d'éloignement est établie en mesurant le décalage vers le rouge du spectre lumineux des galaxies.

Chandelles standards et échelle des distances

Pour connaître la distance, les astronomes utilisent ce qu'ils appellent des chandelles standards. « *Ce sont des objets dont on connaît la luminosité absolue. En comparant celle-ci à l'intensité lumineuse reçue sur Terre, on peut déterminer la distance qui les sépare, et donc la distance de sa galaxie* », explique Mickaël Rigault, de l'Institut de physique des deux infinis de Lyon ¹. Les céphéides, des étoiles variables dont

la fréquence de pulsation lumineuse est reliée à leur luminosité absolue – une loi établie en 1908 par l'astronome américaine Henrietta Leavitt –, constituent de telles chandelles. C'est avec ces étoiles que Hubble a obtenu une estimation de la vitesse d'expansion cosmique.

Les astrophysiciens d'aujourd'hui ont repris cette même technique mais ils utilisent comme chandelles standards les supernovas dites de « type Ia », des explosions d'étoiles en fin de vie qui deviennent subitement aussi lumineuses que des milliards de soleils pendant quelques semaines. « *De cette manière, on construit une sorte d'échelle des distances cosmologiques où chacun des barreaux permet de mesurer la distance d'objets de plus en plus lointains et ainsi de déterminer la constante de Hubble avec une grande précision* », résume Mickaël Rigault. Dernière en date, la mesure de H_0 , obtenue par la collaboration *Shoemaker* menée par l'Américain Adam Riess, qui utilise cette méthode de l'échelle des distances, donne ainsi une valeur de 73 km/s/Mpc.

Écart inexplicable et grain de poussière cosmique

Si on prend en compte les incertitudes, les deux estimations sont irréciliables. « *Il y a quelques années encore, le doute était permis sur la réalité de cette anomalie. Mais les mesures de H_0 sont devenues aujourd'hui si précises qu'il existe moins d'une chance sur un million pour que ce désaccord soit dû au hasard. C'est très excitant, car cela pourrait signifier que le modèle de la cosmologie est incomplet et que nous devons envisager une nouvelle physique* », avance Vivian Poulin-Détolle, du Laboratoire Univers et particules de Montpellier ².

“ Avant de changer le modèle standard de la cosmologie, qui parvient à prédire de nombreuses observations, il faut s'assurer que cette tension ne vient pas d'erreurs de mesure. ”

Un constat renforcé par le fait que d'autres mesures obtenues par des méthodes indépendantes arrivent à une valeur de H_0 compatible avec celle déterminée grâce aux céphéides et aux supernovas. C'est notamment le cas de l'expérience *Holicow* qui traque des quasars lointains, galaxies au noyau très actif et extrêmement lumineux. Lorsqu'une grosse galaxie se trouve sur la ligne de visée entre nous et un quasar, celle-ci dévie la lumière de l'astre au point d'en faire apparaître des images multiples, par

1. Unité CNRS/Université Claude Bernard. 2. Unité CNRS/Université de Montpellier.

un effet dit de « lentille gravitationnelle ». Quand le quasar émet un flash de lumière, celui-ci est visible sur les images mirages mais avec un léger retard les unes par rapport aux autres car les trajets empruntés par la lumière ne sont pas de la même longueur. En mesurant ce retard, on peut alors estimer H_0 , sans recourir à un étalon de distance. Résultat de Holicow : 73,3 km/s/Mpc, soit très proche de la mesure de Shoes.

Reste « *qu'avant de changer le modèle standard de la cosmologie, qui parvient à prédire de nombreuses observations, il faut s'assurer que cette tension ne vient pas d'erreurs de mesure* », prévient Mickaël Rigault.

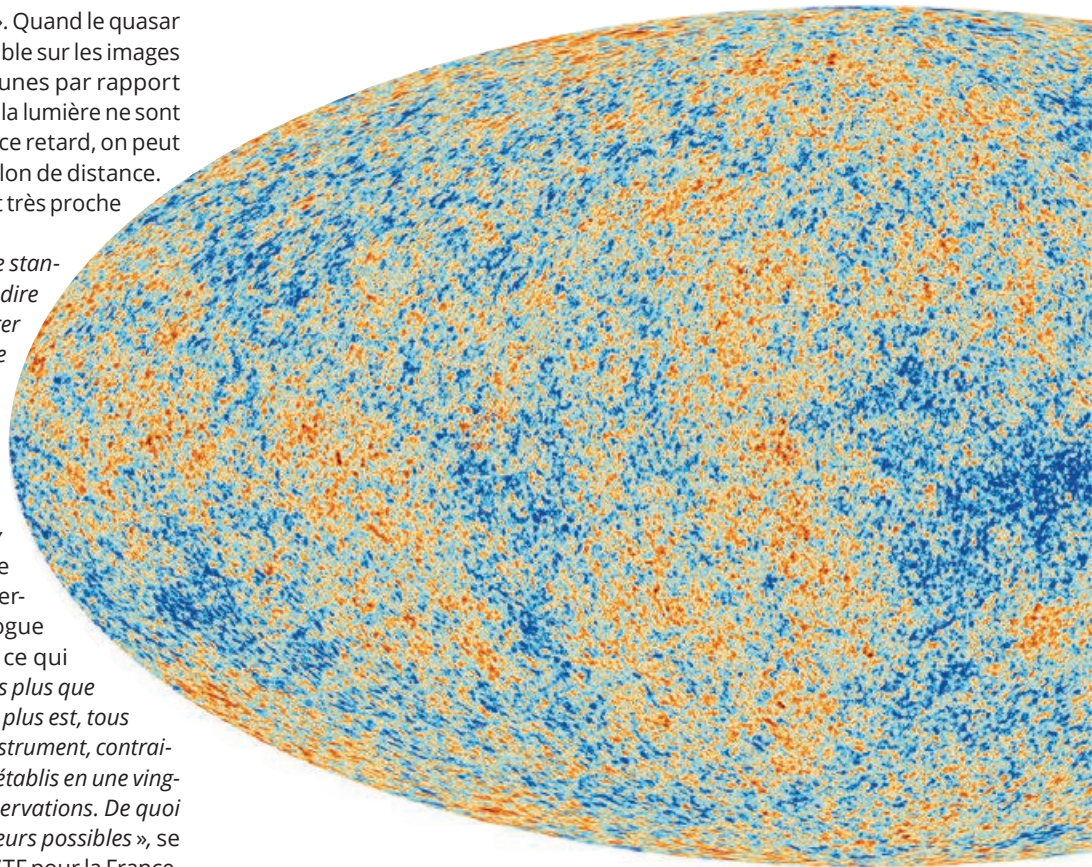
Nouvelles mesures à la rescousse

D'ici à cinq ans, de nouvelles observations pourraient permettre d'y voir plus clair. Grâce au *Zwicky Transient Facility* (ZTF), un relevé astronomique de tout le ciel de l'hémisphère Nord réalisé à l'observatoire Palomar en Californie, un catalogue de 3 000 supernovas a été constitué, ce qui permettra de mesurer H_0 . « *C'est dix fois plus que ce qui est fait aujourd'hui avec Shoes. Qui plus est, tous ces objets ont été détectés avec le même instrument, contrairement aux autres catalogues qui ont été établis en une vingtaine d'années à partir de différentes observations. De quoi s'affranchir de nombreuses sources d'erreurs possibles* », se réjouit Mickaël Rigault, responsable de ZTF pour la France.

L'étape suivante sera d'étalonner la luminosité des supernovas grâce à des étoiles géantes rouges, un nouveau type de chandelles standards. Pour cela, l'équipe de Mickaël Rigault a fait une demande d'observation sur le télescope spatial James Webb. Les astrophysiciens pourront alors déterminer la valeur de H_0 . Et si le résultat confirme la mesure de Shoes, alors cela ferait plus encore pencher la balance du côté d'une nouvelle physique, au-delà du modèle standard. Les physiciens attendent également beaucoup de la détection des ondes gravitationnelles. En 2017, l'observation par Ligo et Virgo de telles ondes issues de la fusion de deux étoiles à neutrons, associée à la détection de lumière par les télescopes de ce même événement, a fourni une nouvelle manière de mesurer H_0 – les ondes gravitationnelles permettant de déduire la distance de la source et la lumière sa vitesse d'éloignement. Avec un seul événement de ce type enregistré, la précision n'est pas encore suffisante mais dans un futur proche on s'attend à en détecter de nombreux autres.

Réflexion autour de nouveaux scénarios

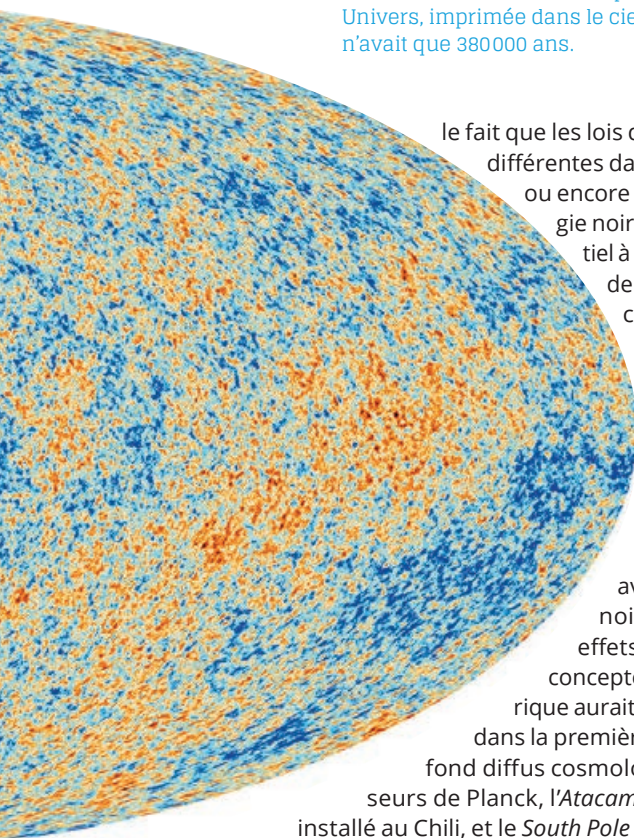
Les théoriciens se penchent déjà sur de nouveaux scénarios cosmologiques qui permettraient d'expliquer la tension. « *Les modèles qui sont aujourd'hui favorisés font l'hypothèse d'un ingrédient supplémentaire qui aurait été présent dans l'Univers jeune, vers 380 000 ans après le Big Bang, et qui aurait donné un coup de fouet à l'expansion de l'Univers* », confie Vivian Poulin-Détolle. Plusieurs pistes sont évoquées : l'existence d'un nouveau type de neutrino,



▲ L'observatoire Vera-C.-Rubin, situé au Chili, va réaliser une vaste cartographie de l'Univers dans le cadre du Legacy Survey of Space and Time (LSST).



► Le fond diffus cosmologique (CMB, pour Cosmic microwave background) observé par Planck est un instantané de la lumière la plus ancienne de notre Univers, imprimée dans le ciel alors que l'Univers n'avait que 380 000 ans.



le fait que les lois de la gravitation étaient différentes dans l'Univers primordial, ou encore la possibilité que l'énergie noire ait joué un rôle essentiel à cette époque. C'est cette dernière idée que creuse le chercheur français. Récemment, il a proposé un modèle faisant appel à une énergie noire précoce qui aurait été plus grande par le passé, contribuant à l'expansion de l'Univers pour 10 %, avant de devenir l'énergie noire dont on mesure les effets aujourd'hui. Selon son concepteur, cette solution théorique aurait laissé des traces claires dans la première image de l'Univers, le fond diffus cosmologique, que les successeurs de Planck, l'*Atacama Cosmology Telescope*, installé au Chili, et le *South Pole Telescope*, situé au pôle Sud, pourraient facilement repérer dans les prochaines années.

Et d'autres observations encore, dont le CNRS est partie prenante, pourraient donner du grain à moudre aux partisans d'une nouvelle physique. À commencer par les mesures du relevé stéréoscopique Desi (*Dark Energy Spectroscopic Instrument*), un projet américain actuellement en cours de prise de données en Arizona, qui devraient permettre d'améliorer notre compréhension de la façon dont les galaxies de l'Univers se structurent sous l'effet de la gravitation et de déterminer s'il est nécessaire ou non d'invoquer de la nouvelle physique pour expliquer la tension de Hubble. Dans l'espace et au sol, le télescope européen Euclid, dont le lancement est prévu en juillet prochain, et le *Vera Rubin Observatory*, un télescope américain installé au Chili, qui débutera ses observations un an plus tard, cartographieront le ciel avec une précision inédite. À eux deux ils catalogueront plusieurs milliards de galaxies de manière à révéler dans le détail la façon dont elles sont organisées dans l'Univers.

« La fissure ouverte par la constante de Hubble est une véritable opportunité. Le modèle standard a beau très bien fonctionner, ses ingrédients principaux (l'énergie noire et la matière noire), qui composent 95 % de l'Univers nous sont inconnus. Grâce à cette crise, nous sommes peut-être sur le point de lever le mystère de leur nature fondamentale », conclut Vivian Poulin-Détolle. II



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

En bref

LEADER DE LA SCIENCE OUVERTE

92 % des publications des chercheurs et chercheuses du CNRS sont en accès ouvert pour l'année 2020, un taux proche de l'objectif de l'organisme et bien supérieur à ceux de la France ou même des unités dont le CNRS est une tutelle. C'est l'un des chiffres marquants du baromètre de l'accès ouvert des publications scientifiques au CNRS, piloté pour la quatrième année consécutive par la Direction de données ouvertes de la recherche (DDOR).

www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/le-cnrs-leader-francais-de-la-science-ouverte

AU TOP DE L'INNOVATION

En 2023, le CNRS maintient sa place dans le Top 100 Global Innovators™. Le Centre, rare organisme de recherche à se distinguer dans ce classement international, est également reconnu cette année parmi les 50 organisations les plus souvent citées. Cette liste établie par Clarivate™ utilise une analyse comparative complète des données mondiales sur les inventions.

PROGRAMMES EXPLORATOIRES

Dans le cadre de France 2030, plusieurs programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) exploratoires ont été lancés ces dernières semaines. Porté par le CNRS et Météo France, le PEPR TRACCS doit aider à transformer la modélisation du climat, notamment à l'échelle des territoires, et à améliorer les connaissances et outils en lien avec les impacts et les risques climatiques. NumPEx, piloté par le CNRS, le CEA et Inria, a quant à lui pour objectif de concevoir et développer des briques logicielles qui équiperont les futures machines dites « exascale », c'est-à-dire capables de réaliser 1 milliard de milliards d'opérations par seconde. Le PEPR exploratoire Sous-sol, bien commun – piloté par le CNRS et le BRGM – vise de son côté à mieux appréhender les ressources du sous-sol français dans le cadre de la transition énergétique et les conflits d'usage associés.

Une association au service des anciens et des amis du CNRS

“

Le CNRS est une grande famille qui ne se limite pas à son personnel en activité», souligne

la physicienne Élisabeth Giacobino, qui a pris la présidence de l'association en 2022¹. Cela fait plus de trente ans que l'Association rayonnement du CNRS – Association des anciens et des amis du CNRS (A3-CNRS) diffuse les connaissances scientifiques issues de travaux menés au sein de l'organisme et tisse des liens entre

son millier de membres. Ces derniers sont principalement d'anciens personnels du CNRS, qu'ils aient été chercheurs, ingénieurs ou techniciens même si l'association garde ses portes ouvertes aux personnels actifs. De plus, il n'est pas nécessaire d'avoir été employé par le CNRS pour la rejoindre.

Fondée en 1990, l'Association rayonnement du CNRS – Association des anciens et des amis du CNRS (A3-CNRS) poursuit son œuvre. Elle organise des activités culturelles, de la conférence au voyage à l'étranger, et attribue un prix scientifique à de jeunes chercheurs.

PAR MARTIN KOPPE

► Voyage organisé par l'A3-CNRS au Parlement européen de Strasbourg, en 2022.

Hébergée dans les locaux historiques du CNRS à Meudon, l'association a été fondée pour « *maintenir et conserver les liens entre les anciens et les amis du CNRS, ainsi qu'œuvrer au rayonnement du CNRS* », explique Élisabeth Giacobino. Les fondateurs Pierre Bauchet, ancien directeur scientifique et président de la section Économie du Comité national du CNRS, Jean-Baptiste Donnet, président fondateur de l'université de Haute-Alsace, Claude Fréjacques, ancien président du CNRS, Charles Gabriel, ancien directeur des programmes et moyens du CNRS et Pierre Jacquinot, qui fut directeur général du CNRS et président de l'Académie des sciences. Ils voyaient l'association comme un moyen essentiel de favoriser les rencontres entre ses membres.

Cette association dispose également d'un large maillage national avec les dix-sept représentations régionales de l'organisme. Celles-ci organisent régulièrement pour les membres de l'A3-CNRS des visites d'expositions, de laboratoires, de sites culturels et historiques et des conférences.



© A3-CNRS

1. Elle a succédé à la chimiste Liliane Gorrichon.
2. Unité CNRS/Cnes/Université Toulouse Paul Sabatier. 3. <https://www.a3cnrs.org/page/73132-a3-magazine-dernieres-publications>

La conférence la plus récente a été donnée à Toulouse par Sylvestre Maurice, membre de l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie², sur le thème Exploration sur Mars et recherche de traces de vie. En outre, quelques voyages à l'étranger sont proposés aux adhérents. On retrouve cette année une croisière culturelle en Norvège, allant de Bergen jusqu'au Cap Nord, ainsi que des séjours à Vienne et en Croatie. « Ces voyages sont importants, car ils renforcent les liens entre nos membres, qui plus est dans un cadre d'enrichissement culturel et historique », rapporte Élisabeth Giacobino.

Pour conserver un lien durable avec ses membres, l'association publie de plus un magazine deux fois par an, dont chaque édition est organisée autour d'une nouvelle thématique. Il comprend des articles pointus et vulgarisés de chercheurs, des textes d'adhérents et des informations relatives à la vie de l'association.

Depuis un an, les quatre-vingts numéros ont été numérisés et mis en ligne³. Ils sont accessibles sur l'espace public du site de l'A3-CNRS. Tous les membres sont aussi abonnés d'office à *CNRS le Journal*.

Enfin, l'association remet depuis 2019 le prix A3-CNRS du rayonnement scientifique. Après une pause pendant la crise sanitaire, il a été décerné en 2022 à la chercheuse Louise Purdue (voir encadré). « *L'idée d'un prix nous est venue pour récompenser des recherches originales, interdisciplinaires et ouvertes sur des applications techniques ou sociétales* », explique Élisabeth Giacobino.

L'A3-CNRS offre ainsi tout un panel d'avantages à ses adhérents et s'implique dans la diffusion du savoir scientifique dans la société. « *Grâce à l'ensemble des services proposés, nous souhaitons bien sûr nous agrandir, s'enthousiasme Élisabeth Giacobino. Pas besoin d'attendre la retraite pour nous rejoindre.* » II



Pour en savoir plus sur l'association A3-CNRS
<https://www.a3cnrs.org/page/32169-actualites>

Louise Purdue, prix A3-CNRS du rayonnement scientifique 2022



Chargée de recherche au laboratoire Cultures et environnements. Préhistoire, Antiquité, Moyen Âge, Louise Purdue est spécialiste d'archéologie environnementale. Elle travaille sur la reconstruction des paysages, des agrosystèmes et des hydrosystèmes historiques et préhistoriques. Il s'agit en particulier de comprendre comment les sociétés agricoles anciennes ont géré les ressources naturelles, et en particulier l'eau, en fonction de leurs besoins et des contraintes de l'environnement. La chercheuse couvre ainsi plusieurs millénaires et différents climats dans ses recherches. Ses travaux, qui résonnent avec les problématiques contemporaines de l'accès et d'une gestion durable de l'eau, lui ont valu d'être récompensée par le prix A3-CNRS du rayonnement scientifique en 2022.

1. Unité CNRS/Université Côte d'Azur.

En bref

UNE FONDATION POUR L'AFRIQUE

La Fondation CNRS a annoncé la création d'une nouvelle fondation sous son égide : la Fondation Avenir Afrique, dont la mission principale est la promotion et le soutien d'un nouveau projet intitulé IDBio (ingénierie durable des produits biosourcés). Ce projet vise le renforcement de compétences par la formation initiale, continue et par la recherche pour l'émergence de nouvelles filières de valorisation de ressources renouvelables et de déchets dans une stratégie de développement durable et de soutien à l'économie locale.

MATÉRIAUX

Le CNRS, l'Insa de Lyon, l'université Claude Bernard de Lyon 1 et Saint-Gobain se sont associés pour créer le laboratoire commun Matilde, dédié à l'étude de matériaux inorganiques et de leurs mécanismes d'endommagement dans leur environnement d'utilisation. Objectif : améliorer la durée de vie de ces matériaux et leur empreinte carbone. Pour relever ce défi, ce laboratoire « hors les murs » associera des experts en sciences des matériaux issus de la recherche académique et industrielle.

INTERNATIONAL

En février, une délégation du CNRS, menée par son président-directeur général Antoine Petit, s'est rendue en Inde pour échanger avec ses principaux partenaires sur le terrain. À cette occasion, la création du 3^e *International Research Laboratory* (IRL) dans ce pays a été officiellement annoncée : l'IRL Scal(e)S (*Self-organisation and control in biological systems*), qui devrait être ouvert d'ici la fin de l'année, tentera de démêler les mécanismes de la matière et des organismes vivants, et plus particulièrement les caractéristiques complexes qui soutiennent leurs fonctions physiologiques. Une collaboration qui vient s'ajouter aux nombreuses autres de l'organisme avec la recherche indienne dans des domaines allant de l'informatique aux sciences humaines et sociales, en passant bien sûr par les mathématiques.

<https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/la-recherche-francaise-beaucoup-gagner-dune-collaboration-forte-avec-linde>

« La transition écologique ne pourra se faire qu'avec des réseaux intelligents »



COLL. PERS.

MATIÈRE

NUMÉRIQUE

INGÉNIERIE Capteurs et intelligences artificielles s'invitent dans les réseaux électriques, formant des réseaux plus « intelligents » appelés smart grids.

Explications avec Nouredine Hadjsaid, spécialiste de ces systèmes chargés d'optimiser l'équilibre entre production et consommation d'électricité.

PROPOS RECUEILLIS PAR MARTIN KOPPE

Dans les réseaux électriques, à quels problèmes veulent répondre les smart grids, c'est-à-dire les réseaux intelligents ?

Nouredine Hadjsaid¹. Précisons déjà une chose : les réseaux électriques sont vitaux pour les économies modernes et sont considérés comme le système le plus complexe jamais construit par l'être humain. Le réseau français représente près d'un million et demi de kilomètres de lignes et de câbles électriques, soit plus de trois fois la distance entre la Terre et la Lune, interconnectés avec l'ensemble du réseau européen. Il est gouverné par des lois physiques immuables qui exigent un équilibre à chaque instant entre ce qui est produit et ce qui est consommé. La rupture d'un tel équilibre peut provoquer un black-out. Le réseau électrique est basé sur le vecteur énergétique « électricité », qui a des qualités uniques en termes de

flexibilité, de versatilité, de transport et de distribution, mais il ne se stocke pas à large échelle. Ainsi, lorsque vous appuyez sur un interrupteur, l'énergie est produite en temps réel. Les moyens de production doivent être flexibles pour intervenir instantanément et de manière coordonnée. Le réseau doit en plus garder une marge de sécurité opérationnelle pour prendre en compte divers aléas, comme les tempêtes ou des pics soudains de consommation. C'est la seule industrie au monde qui fonctionne avec de telles contraintes.

La complexité du système s'est ensuite accrue avec l'arrivée des énergies renouvelables. La consommation française effectue des pointes à 100 gigawatts, ce qui équivaut à une centaine de tranches nucléaires, qui sont, elles, parfaitement pilotables. Les énergies renouvelables sont théoriquement capables de fournir un peu moins d'un tiers de ce pic. Elles représentent cependant plus de 500 000 unités réparties sur tout le territoire, dont on ne pilote pas vraiment la production qui, dans le cas du solaire ou de l'éolien, dépend en

plus des conditions météorologiques. Leur intégration constitue donc un chantier phénoménal.

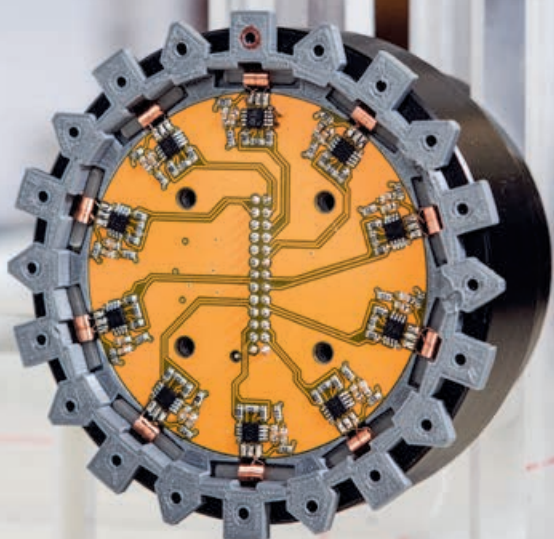
Quelles sont les caractéristiques d'un réseau intelligent ?

N. H. En premier lieu, la résilience du système. Celle-ci demande de disposer de modèles de représentation sur différentes échelles de temps et incluant les dynamiques induites. Du point de vue opérationnel, il faut contrôler la chaîne de pilotage en temps réel : mesurer, analyser, décider et communiquer. Pour certaines parties du réseau, déjà bien instrumentées, cela passe par la maîtrise de la fiabilité des milliers de mesures à l'échelle de la seconde.

Pour les autres, il faut installer suffisamment de capteurs et reconstruire l'observabilité de l'ensemble du réseau en temps réel à partir de peu de mesures. Les données extraites nourrissent des modèles prédictifs complexes, éventuellement renforcés par de l'intelligence artificielle, afin d'optimiser le fonctionnement global du réseau. Compte tenu de la nécessité de maintenir en permanence

© FRÉDÉRIQUE PIAS / GZELAB / CNRS PHOTOTHÈQUE

1. Professeur à l'Institut d'ingénierie et de management de l'université Grenoble Alpes, directeur du Laboratoire de génie électrique de Grenoble (GZELab, CNRS/Univ. Grenoble-Alpes), directeur de la chaire industrielle d'excellence Enedis sur les smart grids, titulaire de la chaire Intelligence artificielle du Multidisciplinary institute in artificial intelligence (MIAI) et président du conseil scientifique de Think Smartgrids.



► Prototype de capteur magnétique capable de mesurer sans contact du courant électrique.

l'équilibre dans un contexte de plus en plus complexe et incertain, les systèmes de décision doivent s'appuyer sur de l'intelligence distribuée avec divers degrés d'analyse et de décision autonomes, tout en se coordonnant avec des systèmes centralisés indispensables pour l'optimisation globale. C'est un travail énorme.

Quelles sont les principales difficultés rencontrées ?

N. H. Nous voulons développer des systèmes autonomes et réactifs, mais aussi maîtrisables et sécurisés, capables de faire face à des variabilités accrues. Nous devons ainsi prendre en compte les modèles des pays voisins auxquels notre réseau est interconnecté, comme l'Allemagne ou la Belgique, eux-mêmes interconnectés à d'autres pays et ainsi de suite. Tous sont soumis à des aléas extérieurs susceptibles d'affecter notre réseau. Nous avons de plus besoin de nouveaux modèles de planification, intégrant les incertitudes croissantes, tout en maîtrisant les investissements qui constituent des montants colossaux. Tout cela représente une tâche titanesque,

il nous faudra des dizaines d'années de recherches pour y répondre.

Comment la recherche étudie-t-elle les réseaux intelligents ?

N. H. Je considère trois principales catégories d'approches. D'abord, la modélisation permet de comprendre ce qu'il se passe dans des systèmes dont on n'observe directement qu'une infime partie. Il s'y déroule des phénomènes non linéaires, avec des dynamiques complexes et des rétroactions. Les modèles aident à décrire tout cela, puis à proposer des solutions, notamment en adaptant l'architecture du réseau ou en concevant de nouveaux modes de pilotage. Dans un deuxième temps, ces résultats doivent être validés sur des plateformes expérimentales physiques, utilisant de véritables objets technologiques.

Au G2Elab, nous partageons par exemple avec l'École nationale supérieure de l'énergie, l'eau et l'environnement (ENSE3) le centre Production réseau d'énergie distribué (Predis), qui consacre 2 000 m² à la démonstration sur la gestion intelligente de

l'énergie. Ces travaux peuvent d'ailleurs être couplés avec des modèles tels que des jumeaux numériques (*modèles virtuels d'objets physiques, Ndlr*). Enfin, nous collaborons directement avec les acteurs du monde socio-économique pour mieux comprendre les problèmes auxquels ils sont confrontés, puis tester sur le terrain les solutions qui ont passé les étapes précédentes.

Quels travaux menez-vous personnellement ?

N. H. Je m'intéresse principalement à la résilience des systèmes. Je crée des modèles pour identifier les vulnérabilités sur des architectures complexes et évolutives. Je développe également des architectures de réseaux qui intègrent mieux les énergies renouvelables et les nouveaux usages. J'ai aussi étudié le pilotage des réseaux grâce à des onduleurs équipés d'intelligences artificielles, pour mieux faire face à la baisse de l'inertie globale du système due aux énergies renouvelables. Ces dispositifs, particulièrement importants dans les systèmes photovoltaïques, génèrent des courants alternatifs à partir de sources continues. Leur optimisation permettrait de limiter les besoins en stockage d'énergie. Enfin, j'ai travaillé sur des méthodes pour identifier les meilleurs endroits où placer des capteurs afin d'améliorer l'observabilité du réseau.

Plus généralement, je suis très soucieux du renforcement des liens entre la recherche académique et le monde industriel. Avec mes nombreuses fonctions, je suis en contact avec des centaines d'industriels, différents ministères, la Commission de régulation de l'énergie ou encore l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. Ces partenariats vertueux ouvrent aux chercheurs l'accès à un vaste panel de données de première main, essentielles pour innover et construire des modèles fiables. Cela fait également remonter les besoins et les verrous auxquels le secteur de l'énergie est concrètement confronté. II



Lire l'intégralité de l'entretien sur lejournalcnrs.fr



Contrer l'antibiorésistance

© CIRIL JAZBEC/THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA

VIVANT



SANTÉ La multiplication de résistances aux traitements contre les infections menace la santé humaine. Pour faire face, les scientifiques traquent les déterminants génétiques qui arment les pathogènes contre les antibiotiques et testent de nouvelles stratégies thérapeutiques.

PAR MATHIEU GROUSSON

Le constat est unanime : si rien n'est fait, la résistance des pathogènes aux agents antimicrobiens pourrait devenir la première cause de mortalité dans le monde à l'horizon 2050. Comme l'affirmait l'Organisation mondiale de la santé (OMS) dès 2015, le phénomène « représente un immense danger pour la santé mondiale » pouvant conduire à une « ère post-antibiotique dans laquelle les infections courantes pourront recommencer à tuer ». Conscients du danger, les scientifiques du monde entier ont pris le problème à bras-le-corps. Biologistes et

chimistes sont en première ligne et, avec eux, les experts du CNRS et de ses partenaires.

L'acquisition de résistances aux antimicrobiens, des médicaments utilisés pour prévenir et traiter les infections, est un phénomène évolutif naturel. Mais rien que ces dernières décennies, une utilisation parfois abusive et excessive des antibiotiques a fait prendre au phénomène une tournure nous plaçant dans une situation critique : on observe désormais un taux élevé de résistance pour des infections bactériennes courantes, avec des cas de propagation mondiale rapide de pathogènes dits « multi-résistants » qui, pour certains, ne peuvent tout simplement plus être traités via les traitements existants.

Comprendre les résistances

Comme l'explique Olivier Neyrolles, à l'Institut de pharmacologie et de biologie structurale¹ (IPBS), à Toulouse, « la résistance d'un pathogène à un antimicrobien peut avoir différentes origines. Elle peut être liée à une mutation de la cible qui n'est alors plus reconnue par le médicament, ou bien à une modification d'une enzyme nécessaire à l'activation de ce dernier. Parfois c'est la membrane du pathogène qui est

► Cultures de staphylocoques dorés résistants aux antibiotiques (Statens Serum Institute, Copenhague, Danemark, 12 décembre 2018).

rendue imperméable aux médicaments ou alors c'est la capacité du pathogène à excréter le médicament qui est accrue. »

Ainsi, la première mission des spécialistes consiste-t-elle à comprendre le plus finement possible les voies multiples empruntées par la résistance, et la manière dont surviennent et se diffusent les mutations génétiques qui en sont à l'origine. Philip Supply, au Centre d'infection et d'immunité de Lille², a récemment déterminé les facteurs qui ont permis l'émergence et la propagation rapide de la branche épidémique dite « W148 » d'une lignée de souches de la tuberculose, particulièrement virulentes et résistantes. Résultat : non seulement ce variant du pathogène présente de multiples mutations de résistance, mais également des mutations permettant de compenser le coût métabolique de leur acquisition, et enfin une mutation d'hypervirulence. « Nos données montrent que cette dernière préexiste aux mutations de résistance. Et c'est la combinaison de l'ensemble qui fait la dangerosité de ce variant », précise le scientifique.

Dans certains cas, on observe également des transferts de gènes entre micro-organismes, y compris d'espèces différentes. C'est notamment le cas de *Acinetobacter baumannii*, une bactérie responsable d'infections opportunistes et nosocomiales difficilement traitables, et classée par l'OMS parmi les souches prioritaires à étudier pour la recherche de nouveaux antibiotiques. Xavier Charpentier, au Centre international de recherche en infectiologie³, a en effet montré que des souches de cette bactérie a priori sensibles à un antibiotique sont capables en quelques heures d'acquérir des résistances par un processus de captage et d'incorporation d'une partie du génome de ses voisines. « On ne comprend pas encore très bien les conditions qui président à ce transfert, mais nous avons observé que jusqu'à 80 nouveaux gènes peuvent être acquis par une bactérie lors d'un seul événement de transfert, ce qui en fait un processus d'une redoutable efficacité », précise le biologiste.

Adapter les traitements

« L'objectif de la communauté scientifique est désormais de cartographier de manière globale la résistance, à travers des analyses génomiques, d'expression, protéomiques et métabolomiques », commente Paola Arimondo, à la tête de l'équipe Chimie biologique épigénétique, au laboratoire Chimie biologique pour le vivant⁴ (Chem4Life). « Cela permettra d'anticiper les résistances qui pourraient survenir, afin d'adapter les traitements en fonction du type de résistances auxquelles on a à faire face, que ce soit à l'échelle du patient ou au niveau national, mais aussi pour réglementer l'usage des antibiotiques en santé humaine, animale et agricole », ajoute Xavier Charpentier.

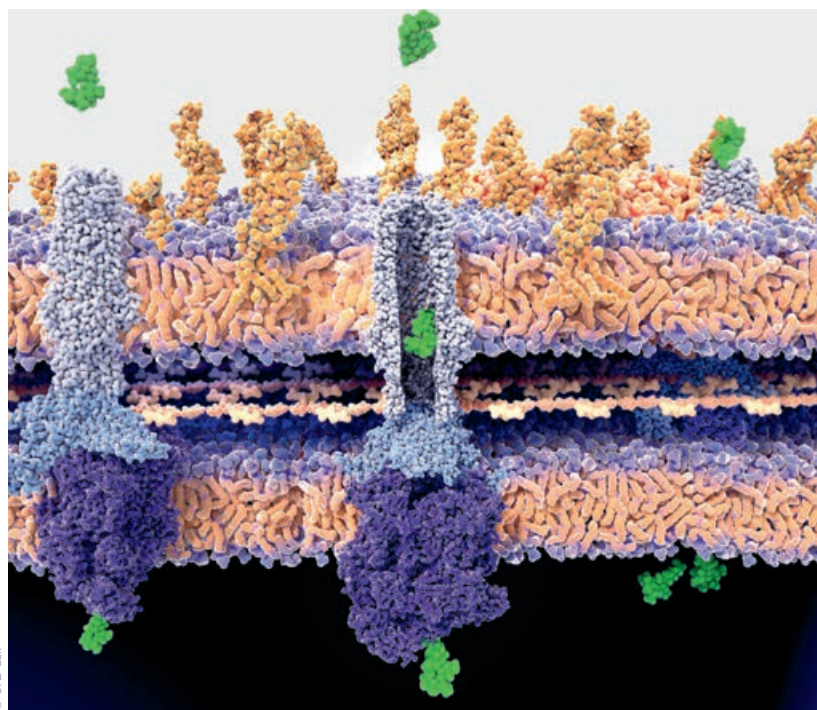
Dans ce but, Philip Supply, en collaboration avec l'entreprise GenoScreen, a mis au point des nouveaux diagnostics moléculaires pour la lèpre et la tuberculose. Fondés sur la technique de séquençage ciblé en profondeur, ils permettent, à partir d'un prélèvement de patient et sans mise en culture, de déterminer les résistances de la souche en présence et par conséquent d'adapter au mieux le traitement. « Dans le cas de la tuberculose, notre test, le plus complet à ce jour, permet d'établir simultanément la sensibilité ou la résistance d'une souche à 13 classes d'antibiotiques », détaille le chercheur.

Contre les mécanismes de résistance

Au-delà de notre capacité à diagnostiquer et suivre l'évolution de mutations, la question du traitement des infections demeure cruciale. Jean-François Hernandez, chimiste à l'Institut des biomolécules Max Mousseron⁵, à Montpellier, travaille ainsi sur des molécules capables de contre certains modes de résistances des bactéries dites à « Gram négatif » aux antibiotiques de la famille des carbapénèmes. Ceux-ci sont utilisés exclusivement à l'hôpital comme dernier recours, et la problématique de la résistance à leur effet a été classée ultra-prioritaire par l'OMS.

Parmi les multiples adaptations de ces pathogènes, l'une d'elles tient à l'expression d'une famille d'enzymes appelées métallo-bêta-lactamases, capables d'inactiver les carbapénèmes. Cette famille a émergé il y a une trentaine d'années et s'est largement répandue depuis. Au sein de l'équipe d'Otto Dideberg, à l'Institut de biologie structurale⁶ (IBS) de Grenoble, Jean-François Hernandez

► Ici, la bactérie à Gram négatif a développé une résistance et expulse les molécules antibiotiques (streptomycine, en vert) à travers une pompe à protéines de sa membrane (en bleu-violet).



© SPU/BSIP

1. Unité CNRS/Université Toulouse Paul Sabatier. 2. Unité CNRS/CHU de Lille/Inserm/Institut Pasteur de Lille/Université de Lille. 3. Unité CNRS/ENS Lyon/Inserm/Université Claude Bernard. 4. Unité CNRS/Institut Pasteur. 5. Unité CNRS/École nationale supérieure de chimie de Montpellier/Université de Montpellier. 6. Institut de biologie structurale.

et ses collaborateurs sont parvenus à mettre au point une série de molécules capables d'inhiber l'action de ces métallobêta-lactamases. Un brevet a été déposé en 2018, et un programme de pré-maturation a été financé par la Société d'accélération de transfert technologique AxLR. *« In vitro et in vivo, nous avons montré que nos molécules sont capables de restaurer l'effet d'un carbapénème sur certaines souches cliniques productrices de ces enzymes et particulièrement problématiques, explique le chercheur. C'est très prometteur et nous cherchons désormais des partenaires pour aller plus loin. »*

Parmi les différentes stratégies actuellement à l'étude, l'une consiste à cibler des processus non essentiels d'un pathogène, soit *« des processus qui inhibés in vitro n'empêchent pas le pathogène de proliférer, mais qui in vivo sont cruciaux à un moment précis de son cycle de vie »*, explique Olivier Neyrolles. À l'IPBS, plusieurs équipes travaillent dans ce sens afin de proposer de nouveaux traitements contre la tuberculose, dont l'OMS estime que près d'un demi-million de nouveaux cas résistants à l'antibiotique principal de première intention se produisent chaque année. Ainsi, l'une de ces équipes a identifié une enzyme qui participe à la synthèse des lipides de l'enveloppe du bacille. *« Lorsqu'il en est privé in vitro, le bacille n'en est pas affecté. En revanche, à une étape du cycle infectieux, son ciblage est délétère »,* précise le chercheur.

S'intéresser aux processus épigénétiques

De leur côté, les scientifiques du laboratoire Chem4Life tentent de tirer parti de processus épigénétiques dans la lutte contre les infections résistantes. Comme l'explique Paola Arimondo, *« l'épigénétique concerne des modifications chimiques réversibles de l'ADN et les protéines autour desquelles l'ADN s'enroule, qui font que dans des cellules de*

▲ Les champignons symbiotiques de ces termites, du genre *Nasutitermes*, produisent des molécules antimicrobiennes.

natures différentes, ou des environnements différents, un même génome ne s'exprime pas de la même manière. » Ainsi, à différents moments de son cycle infectieux, un même pathogène va connaître des modifications épigénétiques de son ADN afin d'adapter son fonctionnement aux différents environnements auxquels il est confronté (réservoir animal, différentes cellules de l'hôte...). D'où l'idée de s'attaquer aux protéines impliquées dans ces modifications afin de perturber le cycle de vie d'un agent infectieux.

Concrètement, en 2018, l'équipe de la chercheuse et celle d'Artur Scherf, de l'unité Biologie des interactions hôte-parasite⁷, à l'Institut Pasteur, ont découvert plusieurs séries de molécules capables d'inhiber les protéines associées aux modifications épigénétiques du paludisme. *« Des tests ont montré que ces molécules sont actives sur une cinquantaine de souches résistantes, précise Paola Arimondo. Nous avons déposé un brevet en 2021 et nous sommes désormais à la recherche de partenaires industriels pour aller plus loin. »*

Vaincre des microbes grâce à d'autres microbes

Une autre piste à explorer, empruntée par Véronique Éparvier, à l'Institut de chimie des substances naturelles⁸, consiste à rechercher des solutions parmi celles directement proposées par le vivant⁹. Cette chimiste est à l'origine de la souchothèque¹⁰ du CNRS, une collection regroupant environ 2 000 souches microbiennes qui constituent une ressource inépuisable de dizaines de milliers de molécules dont certaines ont un effet antibiotique potentiellement exploitable pour la médecine humaine.

Dans le cadre de collaborations avec le Centre national de référence de la résistance aux antibiotiques, la scientifique a isolé des molécules antimicrobiennes produites par des champignons symbiotiques des termites : *« nos premiers tests montrent que ces molécules sont actives contre des champignons du genre Trichophyton, responsables de dermatophytose, mais aussi contre le staphylocoque doré résistant à la pénicilline. »*

Prudente, Paola Arimondo insiste : *« il ne faudrait pas laisser croire que nous sommes arrivés. On parle ici de recherches de longue haleine et qui nécessiteront beaucoup de travail et d'investissement ». « Je pense que la prise de conscience du problème a eu lieu au niveau institutionnel et académique »,* complète, Philip Supply. C'est heureux, car contre la résistance aux antibiotiques, c'est une certitude, le chronomètre est enclenché. II



© VÉRONIQUE ÉPARVIER



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

6. Unité CNRS/CEA/Université Grenoble-Alpes. 7. Équipe mixte de recherche Bases génétiques et moléculaires des interactions hôte-parasite (unité CNRS/Inserm/Institut Pasteur). 8. Unité CNRS/Université Paris-Saclay. 9. Lire « Ces bactéries qui vous veulent du bien » sur lejournal.cnrs.fr. 10. <https://icsn.cnrs.fr/plateformes/souchotheque>

LES IDÉES



*Où l'on découvre notamment une
manière respectueuse de reproduire
des objets traditionnels,
et une approche inédite pour lutter
contre les violences sexuelles.*



© T. SARNET

► Scénographie virtuelle 3D illustrant au premier plan un collier de griffes grizzly endommagé (collier D979-3-97, musée des Confluences, Lyon), sa réplique restaurée et une vue d'artiste d'un guerrier portant ce collier.

SOCIÉTÉS

L'ethnomimétisme : comprendre et reproduire des objets rituels



Par **Frédéric Saumade**, anthropologue, **Thierry Sarnet**, physicien et expert en matériaux et **Mathieu Mourey**, doctorant en anthropologie, tous trois membres de l'Institut d'ethnologie méditerranéenne, européenne et comparative ¹.

Si le biomimétisme s'inspire directement de la nature, l'ethnomimétisme s'inspire des hommes, des matériaux et des techniques développées au cours des siècles par les groupes ethniques dont la culture entretient l'interaction avec l'altérité, soit les espèces, les éléments de la nature et leurs propriétés respectives. Soutenu par le CNRS, le projet I-Mat ² fait émerger ce concept d'ethnomimétisme et l'utilise pour une approche innovante des savoirs traditionnels relatifs aux objets rituels patrimoniaux des sociétés autochtones d'Amérique du Nord.

Depuis l'époque coloniale jusqu'au milieu du XX^e siècle, les ethnologues et autres scientifiques occidentaux qui séjournaient dans des sociétés traditionnelles avaient l'habitude d'en rapporter des objets à forte valeur symbolique, parfois même en les

volant (Michel Leiris le confessa dans *L'Afrique fantôme*), pour les céder à un musée ou les vendre à des collectionneurs. De telles pratiques étant heureusement bannies, on favorisera désormais un échange interactif et équitable entre ces cultures et les sociétés occidentales. Dans le projet I-Mat, des groupes ethniques amérindiens, comme les Sioux Lakotas (Dakota du Sud) ou les Pueblos (Nouveau-Mexique), sont sollicités pour partager leur savoir-faire artisanal, dans un objectif de valorisation dont ils puissent garder le contrôle et le bénéfice.

Allier traditions et technologies

La reproduction d'objets à des fins d'expérimentation de savoir-faire techniques par imitation n'est pas une nouveauté, comme l'ont montré les essais d'archéologie expérimen-

tale d'André Leroi-Gourhan ³. Se situant dans cette lignée méthodologique, l'équipe étudie et reproduit en fac-similé certains objets amérindiens en combinant méthodes ancestrales et hautes technologies (conception assistée par ordinateur, photogrammétrie, scans 3D, impression 3D), à des fins de conservation muséographique, de diffusion de ces savoirs traditionnels et de réintroduction de techniques anciennes, tout en encourageant également la restitution par les musées de certains objets de grande valeur dans les cultures autochtones concernées.

Une attention particulière est apportée aux matériaux issus du vivant. Les espèces animales et végétales protégées utilisées par les artisans amérindiens sont sacrées à leurs yeux, mais l'exploitation de leurs composantes a pu aussi être

1. Unité CNRS / Aix-Marseille Université. 2. Le projet I-Mat est financé par la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (Miti) du CNRS. 3. Voir par exemple André Leroi-Gourhan, *L'Homme et la Matière*, tome 1, Albin Michel, 1943. 4. www.ethnomimetisme.org.

interdite par la loi : c'est le cas des plumes d'aigle, des griffes d'ours ou du bois de peuplier Cottonwood (*Populus fremontii*) de la vallée du Rio Grande, conservatoire forestier riparien en milieu semi-désertique. Notre travail de reproduction peut permettre aux artisans fabricants de résoudre certains problèmes de fournitures. Parallèlement, nous apprenons sur le terrain des techniques ingénieuses utilisées pour assembler les objets rituels, avec des matériaux traditionnels, des solvants et colorants naturels, qui constituent un précieux apport pour repenser une industrie durable.

Des répliques haute fidélité

Le projet I-Mat se décline de la façon suivante : l'enquête ethnographique de terrain prend place au sein des communautés amérindiennes par le biais des artisans et des spécialistes du rituel. Elle privilégie les objets les plus puissants symboliquement aux yeux des autochtones : les coiffes de plumes ou à cornes, les colliers de griffes de grizzly, les habits (peaux animales de cervidés ou bisons), les tambours traditionnels, les accessoires de danses rituelles, etc. Le travail d'observation participante se fait aussi avec certains artisans amérindiens, ou « indianistes », qui sont eux-mêmes facteurs de répliques d'objets rituels anciens, à des fins muséographiques ou commerciales.

Il s'agit ainsi de mieux faire valoir ce que la méthodologie du programme I-Mat apporte de différent des copies courantes, notamment en termes de fidélité dans le processus mimétique. L'enquête se prolonge dans les réserves de musées internationaux qui possèdent des collections importantes d'objets amérindiens, tels que le Peabody Museum de l'université de Harvard, partenaire du projet I-Mat, le musée du Quai Branly-Jacques Chirac (Paris), le musée des Confluences (Lyon), le Museum der Kulturen (Bâle, Suisse), le Bernisches Historisches Museum (Berne, Suisse), les musées de Braunschweig et de Radebeul (Allemagne), ainsi que dans diverses collections privées.

Une plateforme web dédiée à l'ethnomimétisme et au projet I-Mat est en

cours de développement⁴. Elle a pour vocation d'illustrer certaines études de cas parmi lesquelles la fabrication de la réplique muséale de la coiffe du chef Arapahoe Yellow Calf, fruit d'une collaboration entre le CNRS, le British Museum, l'University of Wyoming et le Central Wyoming College, dont le processus de restitution est d'actualité. Une des principales difficultés du projet a été de remplacer les plumes d'aigle royal (*Aquila chrysaetos*), espèce protégée, par des plumes issues de l'élevage (dindon ou vautour). La transformation de ces plumes en répliques de plumes d'aigle royal a été réalisée selon différents procédés : par traitement laser – nanostructuration de surface – et par voie chimique – teintures (procédé additif) et décoloration (procédé soustractif). La réplique a été réalisée avec des plumes d'élevage foncées dont le bas a été décoloré pour donner l'apparence de plumes de queue d'aigle royal juvénile (blanches à bout foncé), similaires à la coiffe originale.

Un travail sur un collier de griffes de grizzly des plaines (*Ursus arctos horribilis*) du XIX^e siècle, espèce désormais disparue, a également été effectué. L'état de conservation du collier original ne permettait pas une restauration classique. Le scan 3D et l'impression 3D ont permis de répliquer chaque griffe de manière individuelle et de rendre à l'objet son état original présumé.

Un artisanat écodurable

Enfin, l'équipe a mené une observation ethnographique de la fabrication des tambours pueblo de Cochiti (Nouveau-Mexique). Les troncs d'arbres morts d'espèces protégées (Cottonwood, Aspen) sont déjà en partie évidés grâce à la décomposition naturelle du bois sous l'action de l'humidité et des insectes. L'artisan achève le travail biologique en creusant ce qu'il reste de bois pourri jusqu'à ce qu'il parvienne à dégager l'aubier de l'arbre, plus résistant à la décomposition. Le morceau de tronc ainsi nettoyé, dont l'écorce est polie au ciseau à bois, est ensuite monté avec des peaux de vaches tannées (rawhide) pour compléter le tambour.

Ici, c'est le biomimétisme qui se conjugue avec l'ethnomimétisme. Ainsi, l'artisan illustre-t-il les virtualités de l'usage de matériaux naturels de récupération et de sous-produits d'animaux d'élevage dans un mode écodurable de fabrication d'objets, lesquels peuvent en l'occurrence aussi bien servir à des fins rituelles que musicales, de collection ou de décoration, constituant ainsi un débouché commercial au-delà de l'appareillage des danses traditionnelles amérindiennes.

Le concept d'ethnomimétisme est initialement lié aux matériaux, aux techniques et au patrimoine culturel des sociétés, mais l'ensemble des connaissances traditionnelles des peuples autochtones, parfois disparues ou oubliées, offre des pistes novatrices pouvant répondre aux exigences du monde moderne en matière de modes de production et de consommation des biens et de l'énergie, de valorisation des déchets et recyclage des biens, de recours à la pharmacopée et aux médecines traditionnelles, d'alimentation et de gestion des écosystèmes. ■

Un nouveau blog sur l'anthropologie

Ce billet consacré à l'ethnomimétisme a inauguré en mars dernier un nouveau blog sur le site de *CNRS le Journal*. Baptisé « L'Anthropologie en partage », celui-ci a pour but d'offrir plus de visibilité aux recherches en anthropologie et de donner à voir la diversité des approches et des travaux qui font la richesse de cette discipline, en dialogue constant avec les autres. Alimenté par des anthropologues, il recense déjà de nombreux articles allant de l'étude des marées vertes à la gestion des déchets corporels, en passant par un autre regard sur les « pierres qui agissent ».

Retrouvez tous les billets du blog « L'Anthropologie en partage » sur lejournal.cnrs.fr



ÉVÉNEMENT

L'urgence climatique s'installe à la Cité

Prendre de la hauteur et du recul sur le sujet du dérèglement du climat : telle est l'ambition de cette nouvelle exposition permanente que vient d'inaugurer la Cité des sciences en partenariat avec le CNRS, avec Jean Jouzel pour commissaire scientifique. À travers un parcours libre séquencé en trois temps – Décarbonons/Anticipons/Agissons –, elle offre un état des lieux des connaissances et des pistes – en commençant par la sobriété – pour préserver l'habitabilité de la Terre. Une exposition salubre, à visiter et faire connaître.

Urgence climatique, Cité des sciences et de l'industrie, Paris, Informations et réservations sur Cite-sciences.fr



Le cheval et nous

Domestiqué il y a 4 200 ans dans les steppes caucasiennes, le cheval a été notre véhicule principal jusqu'au XX^e siècle. Dans ce livre, le paléogénéticien Ludovic Orlando, médaille d'argent du CNRS, nous raconte l'histoire du cheval et de son long compagnonnage avec notre espèce. S'appuyant sur les plus récentes découvertes de la paléogénétique mais aussi

sur celles apportées par l'archéologie, l'anthropologie ou l'histoire des langues et des migrations, ce chercheur mondialement connu pour avoir réécrit l'histoire génomique de la domestication du cheval nous convie à un long voyage dans l'espace et le temps avec l'autre meilleur ami de l'homme...

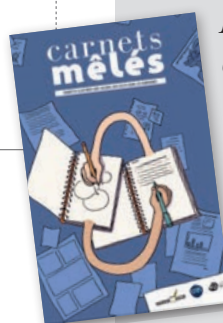
La conquête du cheval. Une histoire génétique, Ludovic Orlando, Éditions Odile Jacob, avril 2023, 272 p., 22,90 €.

À voir, à lire

La science des futurs parents

Comme son titre l'indique, cet ouvrage propose d'exposer les réponses que la science peut apporter aux questions que se posent les parents sans savoir à qui le demander, de la procréation aux premières dents. Quel est le taux de succès des PMA ? Peut-on boire ou être véganes pendant une grossesse ? Les enfants ont-ils vraiment peur du noir ? Les tétines sont-elles nocives ? Sur un sujet où prolifèrent désinformation, matraquage publicitaire et légendes urbaines, le chercheur en neurosciences et père de deux enfants Boris Gourévitch fournit des explications fiables et accessibles à la plupart des interrogations parentales.

70 questions de (futurs) parents, Boris Gourévitch, CNRS Éditions, avril 2023, 384 p., 23 €.



Des BD pour découvrir la vie des migrants

C'est une démarche originale qui permet de découvrir le quotidien de migrants dans la campagne française. Géographes, sociologues et anthropologues ont croisé leur regard avec celui d'illustrateurs pour raconter en

bandes dessinées les obstacles rencontrés par les migrants, réfugiés, demandeurs d'asile ou sans-papiers, dans un monde rural éloigné des services publics et donnant un rôle central à la voiture pour les déplacements. Quatre courtes BD sont nées de cette collaboration, réunies dans *Carnets mêlés*, librement téléchargeables. <https://tinyurl.com/4rreac3>



Retour aux communs

Comment faire « monde commun », pour reprendre la formule de Hannah Arendt, à l'aune de la crise environnementale, des bouleversements numériques, des inégalités sociales et des conflits dévastateurs ? Une centaine de chercheurs et chercheuses en sciences humaines et sociales (philosophes, sociologues, anthropologues, linguistes, historiens, juristes...) joignent leur plume dans cet ouvrage événement pour répondre à cette question centrale. Leurs contributions apportent autant d'éclairages pour comprendre le monde et la façon dont les hommes, les femmes et plus largement le vivant l'ont habité, l'habitent et l'habiteront.

Un monde commun. Les savoirs des sciences humaines et sociales, Alexandre Gefen (dir.), préface de Marie Gaille, CNRS Éditions, 384 p., 29 €.



SPORT

Des premiers Jeux olympiques des temps modernes, à Athènes en 1896, à l'édition parisienne de l'an prochain, en passant par les tristement célèbres jeux de 1936 à Berlin, cet ouvrage vous plonge dans 130 ans d'olympisme. Une trentaine d'auteurs y livrent cette histoire éminemment raccordée à celle du monde, sans faire l'impasse sur les grandes questions politiques ou sociales qui l'ont accompagnée. Valeurs olympiques, boycotts, gouvernance du CIO, lutte anti-dopage, droits de l'homme, gigantisme des jeux... de quoi plonger dans l'histoire de l'olympisme et du sport moderne, véritable objet de recherche tant au CNRS qu'au sein des universités.

Une histoire mondiale de l'olympisme (1896-2024), Nicolas Bancel, Pascal Blanchard, Gilles Boëtsch, Daphné Bolz, Yvan Gastaut, Sandrine Lemaire et Stéphane Mourlane (dir.), Éditions Atlande, mars 2023, 474 p., 25 €.



Amours adolescentes

À 14 ans, les adolescents opèrent un changement dans leur façon de se définir : nouveaux acteurs du « marché » amoureux, « ils et elles » sont devenus « des célibataires », écrit la sociologue Isabelle Clair. Pour son étude, elle a rencontré des dizaines de jeunes pendant deux décennies sur trois terrains aux contrastes marqués : les cités d'habitat social du 93, les villages

ruraux de la Sarthe et les quartiers bourgeois des 16^e et 17^e arrondissements de Paris. À la fin de l'adolescence, observe-t-elle ainsi, échapper à « la mise en couple » devient suspect, la gayfriendlyness (attitude positive vis-à-vis de l'homosexualité) n'épuise pas l'homophobie, tandis

que la pression pour associer sexe et sentiments demeure, aujourd'hui encore, bien plus pesante chez les filles.

Les choses sérieuses. Enquête sur les amours adolescentes, Isabelle Clair, Seuil, mars 2023, 400 p., 21,50 €.



Immersion dans la Silicon Valley

Dans la série *Silicon Valley*, satire corrosive de l'univers de la tech, les entrepreneurs en herbe concluaient toujours leurs présentations de la même façon : leur innovation est là pour « rendre le monde meilleur ». Afin de décrire la réalité de cet univers, le sociologue Olivier Alexandre nous invite dans une immersion. Économie de la gratuité, mirage techno-futuriste voulant faire de la tech une religion de l'avenir, tout est passé au crible, à la portée de tous, notamment grâce à un salubre glossaire.

La Tech. Quand la Silicon Valley refait le monde, Olivier Alexandre, Seuil, mars 2023, 560 p., 23 €.



Dépasser Einstein

Même si elle révolutionna la physique et plus généralement notre conception du monde, la théorie newtonienne de la

gravitation ne constitua qu'une étape vers la théorie de la relativité générale proposée par Einstein au début du XX^e siècle. De l'explication de la chute des corps à celle de l'existence des trous noirs ou des ondes gravitationnelles, l'astrophysicien Marc Lachièze-Rey montre dans ces pages qu'aussi brillante et confirmée expérimentalement soit-elle, la relativité générale n'est sans doute pas la théorie ultime de la gravitation.

Gravitation. Dépasser Einstein, du Big Bang aux trous noirs, Marc Lachièze-Rey, Flammarion, avril 2023, 336 p., 24 €.



Contre les violences sexuelles, les neurosciences en renfort



VIVANT SOCIÉTÉS

ENTRETIEN Fléau planétaire, les violences sexuelles ne sont pas une fatalité. Il est possible de les endiguer, notamment

grâce aux récentes découvertes sur le cerveau et sa formidable plasticité. Explications avec les neurobiologistes Danièle Tritsch et Jean Mariani, auteurs de *Sexe et Violence. Comment le cerveau peut tout changer*.

PROPOS RECUEILLIS PAR ÉMILIE MARTIN

Quelle est l'ampleur du fléau social que sont les violences sexuelles ?

Danièle Tritsch¹. Dans le monde, un enfant sur cinq est victime de violences sexuelles. Une femme sur trois a été battue ou agressée sexuellement au moins une fois dans sa vie. En 2021, en France, 122 femmes ont été tuées par leur partenaire, 94 000 femmes ont été victimes de viols ou de tentatives de viols. 160 000 enfants subissent chaque année des violences sexuelles, dont 22 000 par leur père. 5,5 millions de personnes sont victimes de violences sexuelles durant l'enfance. Au-delà des conséquences psychologiques majeures, le coût pour la société est énorme. L'estimation est difficile, mais, à partir de chiffres déjà un peu anciens, on peut affirmer que le montant total de ces coûts dépasse plusieurs dizaines de milliards d'euros par an.

Quels mécanismes, dans le cerveau, font-ils jaillir la violence ?

D. T. Les structures du cerveau sont connectées et dialoguent sans cesse entre elles, il n'y en a pas une dévolue à une fonction. Ceci dit, différents travaux ont mis en évidence un centre de l'agressivité, composé de quatre noyaux² dont l'amygdale, spécialisée

notamment dans la détection des dangers extérieurs. Plusieurs travaux convergent pour montrer que, lorsque l'on stimule l'un de ces quatre noyaux, on induit un comportement agressif.

Jean Mariani³. C'est ce même centre qui est activé dans une sexualité dite « normale ». Comment passons-nous, via la même structure cérébrale, à la violence sexuelle ? Nous en avons une idée un peu plus précise grâce à l'optogénétique, technique permettant de rendre certains neurones photosensibles. Si on les éclaire avec une lumière spécifique, leur activité électrique change. Des expériences menées sur des mouches drosophiles et des rongeurs ont ainsi permis d'activer certains neurones dans le centre de l'agressivité. Elles ont montré qu'en faisant varier l'intensité d'activation, on induit soit un comportement de séduction soit un comportement d'agressivité.

Vous écrivez : « Les agresseurs de femmes et d'enfants sont quasi exclusivement des hommes ». Comment la neurobiologie l'explique-t-elle ?

D. T. En dehors de quelques psychopathes, ces agresseurs sont en général des hommes « comme tout le monde ». Il n'y a pas de gène masculin du crime. On peut cependant mettre en avant des processus particuliers, notamment ceux liés aux hormones sexuelles, testostérone et œstrogènes, qui existent dans les deux sexes mais à des taux différents. Sous leur influence, le cerveau se sexualise. Bien sûr, à l'échelle macroscopique, il n'y a pas de différence entre le cerveau d'un homme et celui d'une femme. Mais à l'échelle microscopique, celle des réseaux de neurones, il y a des différences incontestables. Par exemple, une expérience menée chez les rats mâles a montré que la testostérone induit la destruction d'une partie des neurones de l'amygdale,



À lire :

Sexe et Violence. Comment le cerveau peut tout changer, Danièle Tritsch et Jean Mariani, Seuil, mars 2023, 384 p., 21 €.

1. Ancienne professeure de l'université Pierre-et-Marie-Curie, Danièle Tritsch y a codirigé un grand laboratoire de neurosciences et apporté des résultats importants sur la neurotransmission.
2. L'amygdale, l'hypothalamus ventro-médian, le noyau prémammillaire et le noyau du lit de la strie terminale. 3. Médecin et scientifique, Jean Mariani est professeur émérite à Sorbonne Université



► Manifestation contre les violences sexistes et sexuelles, le 20 novembre 2021 à Paris.

Pour autant, vous insistez sur le fait que « absolument rien n'est figé »...

J. M. Exactement. Nous possédons tous environ 23 000 gènes qui codent pour les caractères communs à tous les humains comme pour nos caractéristiques propres (couleur des yeux, dosage hormonal propre, etc.). Mais l'expression des gènes est soumise à une régulation d'une complexité inouïe et permanente tout au long de la vie de l'individu. Pour ce qui concerne le système nerveux, elle entraîne par exemple des changements de l'efficacité synaptique et donc du fonctionnement des réseaux neuronaux qui, à leur tour, vont modifier l'expression de ces mêmes gènes.

Certains généticiens⁵ affirment pourtant que nos capacités intellec-

structure du cerveau capitale dans les comportements d'agressivité et de peur⁴. Or, quand la destruction de ces neurones est bloquée, les jeunes rats deviennent moins agressifs. À l'inverse, quand on injecte de la testostérone aux femelles, les mêmes neurones sont détruits et leur comportement devient plus turbulent. D'une certaine manière, la testostérone rend le centre de l'agressivité plus performant. Tous les hommes sont soumis à l'action de cette hormone, mais la grande majorité d'entre eux ne va, heureusement, pas commettre de violences sexuelles.

Ces hormones sexuelles modulent aussi l'agressivité chez l'adulte une fois que le nombre de neurones est stabilisé. Toute une série de processus complexes (taux de diverses hormones, métabolisme, état de stress, prise de psychotropes, etc.) sont impliqués dans le passage à l'acte sexuel violent car ce centre est sous l'influence de nombreuses régulations.

87 % des victimes de ces hommes sont des filles ou des femmes. Comment expliquer cette domination séculaire ?

J. M. Contrairement à la plupart des mammifères, notre espèce a perdu l'œstrus ou « saison des chaleurs ». Les femmes sont fécondes tout au long de l'année durant quelques jours tous les mois. Le passage à la bipédie,

rendant moins visibles les organes sexuels externes, aurait eu pour effet de cacher les manifestations de la période de fécondabilité. La sexualité humaine a alors cessé d'être synonyme de reproduction pour devenir aussi génératrice de plaisir toute l'année. Tous les anthropologues l'affirment : cette dissociation entre sexualité et fécondation a conduit

“L'expansion du cortex (...) pourrait conduire, dans notre espèce, à des capacités inégalées de violence. Cette «face sombre» serait en quelque sorte le prix à payer pour la complexification de notre cerveau et de nos sociétés.”

toutes les sociétés humaines à édicter un contrôle impérieux de la sexualité. Probablement du fait de leur plus grande agressivité, les hommes ont exercé très vite, probablement dès les premiers regroupements d'*Homo sapiens* au Paléolithique, une mainmise sur la sexualité des femmes. Ce contrôle s'est accompagné de la mise en place d'un patriarcat et d'une domination des mâles, et donc de violences.

tuelles seraient inscrites dans notre génome... Tout comme Françoise Clergé-Darpoux, généticienne reconnue, nous contestons vivement ces thèses qui prétendent que l'éducation compterait peu dans la réussite scolaire. Elles ne peuvent que favoriser des dérives eugénistes et le développement d'entreprises qui proposeraient de réaliser un « tri embryonnaire » ou d'établir des scores polygéniques prédisant les

où il a codirigé un grand laboratoire de neurosciences et un service hospitalier. 4. « Microglial phagocytosis of newborn cells is induced by endocannabinoids and sculps sex differences in juvenile rat social play », Jonathan VanRyzin *et al.*, *Neuron*, 102, 2019. 5. Il s'agit notamment de l'Américain Gérard Plomin qui s'appuie sur les techniques récentes de génotypage à haut débit.



► Spécialisée notamment dans la détection des dangers extérieurs, l'amygdale (en rouge) est l'un des quatre noyaux qui composent le centre de l'agressivité.

© SCIEPRO / STOCK.ADOBE.COM

résultats futurs des enfants aux examens. Ce dont chaque individu hérite à la naissance, suite à la « loterie génétique » qui se produit au moment de la méiose et de la fécondation, n'a donc rien de figé. Et certains de nos gènes s'activent en fonction de notre expérience vécue : le stress, la faim, des traumatismes ou, au contraire, une sécurité affective apaisante. Une personne ayant vécu des violences sexuelles durant l'enfance aura plus de risques d'activer les gènes qui la feront passer à l'acte.

Ce qui fait de nous des êtres uniques et forge notre singularité, c'est le fruit de notre bagage génétique modulé par les expériences vécues. Notre microbiote intestinal joue aussi un rôle⁶. La neurobiologie et l'immunologie peuvent donc apporter un éclairage biologique sur ce qui fonde la personnalité, le « self », une notion qui jusqu'à récemment n'était interrogée que par les sciences humaines.

Pourquoi l'espèce humaine se montre-t-elle plus « performante » dans l'agressivité que les autres espèces ?

D. T. Il y a plusieurs hypothèses, l'une d'elles est liée à la perte de l'œstrus

évoquée plus haut et qui a conduit à une sexualité permanente dans notre espèce. Ce changement s'est associé ou a conduit à la mise en place du patriarcat qui aurait ainsi structuré, jusqu'à récemment, l'organisation des sociétés et contribué à façonner l'esprit humain. L'expansion du cortex, en particulier du cortex préfrontal, est une autre donnée biologique importante car elle serait devenue le principal moteur de l'évolution dans notre espèce. Elle est responsable des capacités cognitives, sociales et culturelles qui distinguent l'humain. Le cerveau s'est ainsi construit au fil des siècles un patrimoine scientifique, technique, culturel et artistique sans équivalent. Cette expansion a aussi permis l'acquisition du langage articulé qui autorise des facultés uniques d'apprentissage, de transmission des savoirs et de communication, aujourd'hui amplifiées par la révolution numérique. Et ce pour le meilleur... et pour le pire.

Le centre de l'agressivité est en effet largement interconnecté avec les structures du cortex, en particulier du cortex préfrontal, devenues hautement performantes. Ces interactions pourraient conduire, dans notre espèce, à des capacités inégalées de

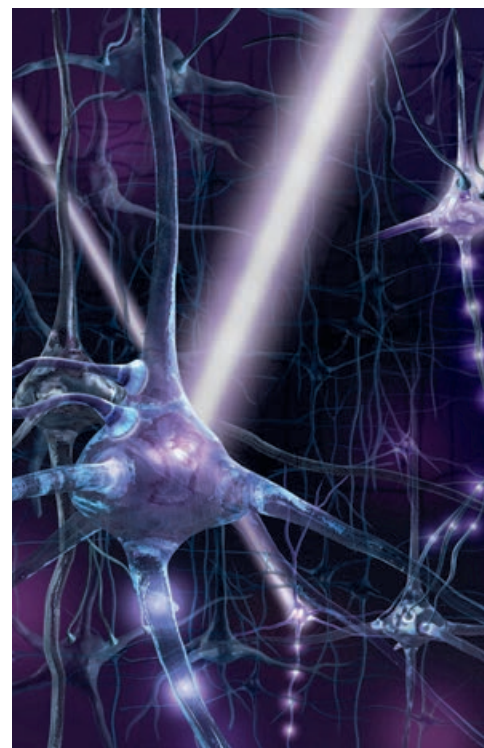
violence. Cette « face sombre » serait en quelque sorte le prix à payer pour la complexification de notre cerveau et de nos sociétés. De nombreux travaux de recherche sont encore nécessaires pour étayer ou infirmer cette hypothèse.

Mais le cerveau « peut tout changer », selon le sous-titre de votre livre...

J. M. Notre patrimoine génétique, et donc notre cerveau, sont plastiques, sensibles aux événements extérieurs. Non seulement cela enterme définitivement l'idée selon laquelle il y aurait des violeurs nés, mais cela prouve s'il en était encore besoin que l'éducation et les psychothérapies ont un rôle fondamental à jouer dans la prévention du passage à l'acte violent, ou de la récidive. De plus, la compréhension fine des mécanismes neuronaux en lien avec la violence doit permettre de mettre au point de nouveaux outils thérapeutiques comme la neurostimulation répétitive, magnétique ou électrique. Elle peut aussi déboucher

► Chez le rongeur, faire varier l'intensité d'activation de certains neurones du centre de l'agressivité peut induire soit un comportement de séduction, soit un comportement d'agressivité.

© SCIENCE PHOTO LIBRARY / DALHOFF, HENNING



6. « The gut microbiome correlates with conspecific aggression in a small population of rescued dogs (*Canis familiaris*) », Nicole S. Kirchoff *et al.*, *PeerJ*, 7, 2019. 7. Le délai médian entre le début des faits et l'enregistrement d'une plainte par les forces de l'ordre est stable pour la majorité des affaires judiciaires, et le plus souvent inférieur à 5 jours. Mais pour les violences sexuelles, il est nettement plus élevé et continue d'augmenter, passant de 87 jours en 2017 à 205 jours en 2021.

sur la mise au point de nouvelles molécules pour de futurs traitements médicamenteux.

Dans le sillage du mouvement #MeToo, la situation générale s'améliore-t-elle ?

J. M. #MeToo, et plus largement les réseaux sociaux, ont suscité une prise de conscience massive. Mais les réseaux sociaux et Internet en général ont aussi un impact beaucoup plus sombre. Qui dit massification de l'information dit aussi massification de la diffusion de la pornographie : les jeunes sont éduqués à la sexualité via des images souvent violentes et dégradantes pour les femmes, véhiculant des stéréotypes.

D. T. Les violences sexuelles reculent peu malgré le phénomène #MeToo, il suffit de considérer le faible taux des plaintes (une femme sur dix) ou leur délai d'enregistrement (il atteint 205 jours en 2021⁷). Quant à la pédocriminalité, elle prend des proportions inquiétantes, en particulier en

Asie avec le « live streaming » (*permettant de commanditer un acte pédocriminel et d'y assister en ligne en échange d'une rémunération, Ndlr*). Il faudrait prendre des mesures légales et sociales fortes, à l'image du plan d'action mis en place par les Espagnols en 2014.

Quelles sont ces mesures dont la France pourrait s'inspirer ?

J. M. Le bracelet électronique pour les conjoints violents, le téléphone grave-danger, les plateformes de recensement des cas de violences sexuelles... À la suite d'un ensemble de mesures, les féminicides ont fortement chuté en Espagne, passant de 71 en 2020 à 48 en 2021. L'instauration de tribunaux spécialisés a aussi permis de traiter les affaires de violences conjugales dans de meilleurs délais, avec un taux de condamnations plus élevé et des victimes mieux protégées.

Tandis que la France accuse un certain retard en la matière malgré quelques progrès, comme l'accueil dans les commissariats, la création de structures d'information et de sensibilisation dans de nombreux organismes, y compris le CNRS et les universités⁸. Le pouvoir politique n'a proposé chez nous que des demi-mesures comme les cellules spécialisées mises en place au milieu de tribunaux déjà surchargés. Il faudrait plutôt créer des tribunaux dédiés ainsi qu'une « task force », à tous les niveaux, que ce soit la prévention, la justice, ou l'éducation. L'éducation est la clé.

D. T. Cela va prendre du temps, une génération sans doute, mais grâce à la recherche, l'éducation des enfants et la multiplication de mesures sociales fortes, il est possible de faire reculer la culture du viol. Nous en sommes convaincus. **II**



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

À lire

LIVRES ILLUSTRÉS

CNRS Éditions vient de publier deux livres aussi instructifs qu'attractifs, mêlant textes et dessins :



Qu'est-ce qui fait disparaître une espèce ?

À quoi sert la biodiversité ? Pourquoi dit-on qu'on est entré dans la 6^e crise d'extinction ? Quels en sont les enjeux ? Comment protéger cette diversité du vivant ? Après le succès de *Tout comprendre (ou presque) sur le climat* (plusieurs dizaines de milliers d'exemplaires vendus), son alter ego dédié à la biodiversité vient de sortir en librairie. Si l'illustratrice Claire Marc est encore de la partie, c'est cette fois Philippe Grandcolas, directeur de recherche au CNRS, qui se charge de livrer des réponses aux questions que nous nous posons (ou devrions le faire) sur ce sujet majeur.

Tout comprendre (ou presque) sur la biodiversité, Philippe Grandcolas et Claire Marc, préface de Valérie Masson-Delmotte, CNRS Éditions, mai 2023, 140 p., 18 €.

« D'où le scientifique sait-il ? »

Cette question, formulée dans l'avant-propos par Nicolas Arnould, directeur de l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS, trouve des réponses concrètes dans cet ouvrage très réussi, expliquant comment les scientifiques ont acquis la certitude que l'Univers est en expansion, que les trous noirs existent ou encore que les continents dérivent. Un exercice précieux, effectué par les experts des sciences de la Terre et de l'Univers, qui permet de saisir l'importance de la démarche scientifique, nourrie d'allers-retours entre observation et théorie, et la différence incommensurable entre des croyances et un savoir scientifique.

Comment les scientifiques savent... ?

Textes de Abder El Albani, Maëlis Arnould, Kristel Chanard, Nicolas Coltice, Éric Lagadec et Alexandre Schubnel, mis en images par Claire Marc, sur une idée originale d'Anne Brès, CNRS Éditions, mai 2023, 72 p., 14 €.

8. Une étude de l'institut Ipsos pour la Fondation L'Oréal-Unesco pour les femmes en science a révélé en mars 2023 que ces structures de recherche et d'enseignement ne font en rien exception et que les violences sexistes y sont présentes. <https://tinyurl.com/yvwr56fz>



de Denis Guthleben,
historien au CNRS

Les oubliées de la science

Nicole Reine Étable a vu le jour il y a 300 ans, en 1723, au palais du Luxembourg à Paris. Ce nom ne vous dit rien ? Alors peut-être celui de Lepaute, qu'elle prend en 1749 après avoir épousé un horloger du roi ? Toujours pas ? En route pour les présentations...

La famille Étable est au service de la maison d'Orléans qui, depuis 1715 et la Régence, s'est établie au Luxembourg. On ne sait hélas rien ou presque de la vie de Nicole Reine jusqu'à son mariage avec Jean André Lepaute, horloger du roi et invité à ce titre à s'installer lui aussi entre les murs du palais. Mais, à l'évidence, grâce à la riche bibliothèque des Orléans et aux beaux esprits qu'ils accueillaient, la jeune femme est parvenue à acquérir de solides compétences en mathématiques : quand son époux se lance dans la rédaction d'un grand traité d'horlogerie, elle réalise les calculs nécessaires à l'établissement des tables d'oscillation des pendules.

Comète de Halley, éclipse de Lepaute

En 1754, Jérôme Lalande entre en scène. L'astronome, qui vient de recevoir les clés de l'observatoire situé sous le dôme nord du palais, se lie d'amitié avec l'horloger et repère les aptitudes de sa femme. Il lui propose bien vite une tâche ardue : aider son confrère Alexis Clairaut à calculer la date

du mouvement des comètes, mais il n'y mentionne nulle part le nom de la mathématicienne. Ce n'est certes pas une première, ni bien sûr une dernière dans l'histoire des sciences. Mais la répétition n'interdit pas la consternation...

Il n'est en effet pas nécessaire de remonter trois siècles dans le passé pour débusquer de pareilles situations. Plus près de nous, l'astronome Henrietta Leavitt, la physicienne Lise Meitner, la chimiste Rosalind Franklin, la biologiste Marthe Gauthier en témoignent. Et encore ! Ce ne sont là que des oubliées rendues célèbres par des travaux historiques ultérieurs : pour chacune d'elles, combien d'oubliées restées anonymes ? Assez pour conduire l'historienne des sciences Margaret Rossiter à souligner dans les années 1990 le fameux « effet Matilda ».

Matilda au CNRS ?

Et le CNRS, dans tout cela ? Il n'a pas échappé aux fidèles de cette chronique que les événements qu'elle relate sont souvent l'occasion de chanter les louanges de notre établissement, le plus beau du monde comme chacun sait. Mais la tâche s'annonce cette fois-ci plus ardue... Comme il ne saurait être question de dresser ici un catalogue, prenons un exemple seulement. Il y a 60 ans, en 1963, Jeanne Vielliard s'apprête à quitter la direction de l'un de nos grands laboratoires, l'Institut de recherche et d'histoire des textes, pour prendre sa retraite. Elle est arrivée à la tête de l'IRHT en 1940, après la mort sous les drapeaux de son fondateur Félix Grat, et est ainsi devenue de facto la première directrice d'unité du CNRS. Mais elle n'a été reconnue de jure dans cette fonction, où elle a pourtant excellé, que peu avant son départ : le CNRS n'avait jusqu'alors fait que prolonger son intérim.

Bien sûr, depuis deux décennies et la création de la Mission pour la place des femmes, l'égalité professionnelle est devenue un véritable enjeu au CNRS. Elle semble même poussée désormais par une politique volontariste pour favoriser la parité et l'égalité dans les carrières. Il a quand même fallu attendre... Alors quoi de neuf depuis Lepaute ? À l'époque, Clairaut, pris à partie par Lalande, s'était défendu : il craignait, en citant le nom de la mathématicienne, d'exciter la jalousie de Marie Anne Gouilly, son amie du moment à qui il confiait soit dit en passant des calculs aussi. La faute aux femmes, en somme... Puisque le serpent ne cesse de se mordre la queue depuis l'arbre de la connaissance, il va falloir que le CNRS soit collectivement et à tous les étages très, très volontariste pour parvenir à lui faire rendre gorge ! ■

“En 1754, Nicole Reine Lepaute relève le défi de calculer la date du retour de la comète de Halley, avec une marge d'erreur d'un mois.”

du retour de la comète de Halley, en tenant compte des perturbations de Jupiter et de Vénus. Le pauvre Clairaut est au bord du *nervous breakdown* en raison de la complexité des opérations... Nicole Reine Lepaute relève le défi : après des mois d'efforts, le passage de la comète au périhélie est prévu pour le 13 avril 1759, avec une marge d'erreur d'un mois – et, précision admirable, l'événement se produit le 13 mars précédent. Dans la foulée, Clairaut publie sa *Théorie*

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 

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS #14

Entrez dans les coulisses
de la recherche

#14 actuellement
en vente
en librairie et Relay

200 pages / **14 €**

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS

#14

ENQUÊTE

L'INTELLIGENCE ANIMALE se dévoile

MYTHES ET LIMITES
DES GÉNÉRATEURS
DE CONTENU

AU BOTSWANA,
LE DELTA QUI
FASCINE LES
SCIENTIFIQUES

COURSE :
LES FEMMES
RÉCUPÈRENT-ELLES
MIEUX ?



COSMOLOGIE
À QUELLE VITESSE
GRANDIT L'UNIVERS ?

www.carnetsdescience-larevue.fr



CNRS ÉDITIONS