

Trimestriel n° 314
DÉCEMBRE 2023

CNRS

LE JOURNAL



Maison Poincaré
Les **maths** ont enfin
leur musée

DOSSIER
L'eau, une ressource
en tension

Supraconductivité :
la température
monte

Des pistes
pour comprendre
les vertiges



La banque coopérative
de la Fonction publique

CASDEN Banque Populaire - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable - Siège social : 1 bis, rue Jean Wiener 77420 Champs-sur-Marne - Siren n° 784 275 778 - RCS Meaux - Immatriculation ORIAS n° 07 027 138 - BPCE - Société anonyme à directeur et conseil de surveillance au capital de 188 932 730 euros - Siège social : 7, promenade Germaine Sablon 75 013 Paris - RCS Paris n° 493 455 042 - Immatriculation ORIAS n° 08 045 100 - Crédit photo : © Roman Jehanno - Conception : Insign 2021 • Merci à Jenny, enseignante chercheuse d'avoir prêté son visage à notre campagne de communication.

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

Jenny, Enseignante chercheuse



[casden.fr](https://www.casden.fr)



Retrouvez-nous chez



CNRS LE JOURNAL

Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

Téléphone : 01 44 96 40 00

E-mail : lejourn@cnrs.fr

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

Anciens numéros :

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

Directeur de la publication :

Antoine Petit

Directeur de la rédaction :

Jérôme Guilbert

Rédacteur en chef :

Saman Musacchio

Rédacteurs en chef adjoints :

Laure Cailloce, Yaroslav Pigenet

Rédacteurs :

Sophie Félix, Mehdi Harmi,

Maxime Lerolle, Laurence Stenvot

Ont participé à ce numéro :

Kheira Bettayeb, Julien Bourdet, Laure Dasinières

Léa Desportes, Sebastián Escalón, Denis Guthleben,

Martin Koppe, Francis Lecompte, Warda Mohamed,

Matthieu Stricot

Secrétaire de rédaction :

Émilie Silvoz

Direction artistique :

David Faure

Iconographes :

Anne-Emmanuelle Héry, Sophie Léonard

et Valérie Delchambre

Gestionnaire :

Mathieu Chatellier

Assistant de direction :

Frédéric Roman

Illustrations :

Maria Rosario do Frade

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-media@cnrs.fr

<https://images.cnrs.fr>

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

En couverture :

© PLUTO73/STOCK.ADOBE.COM

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

Abonnez-vous gratuitement sur :

» lejournal.cnrs.fr/abojournal

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



Sécheresses, inondations, pollutions, problèmes d'accès, conflits d'usages... Les actualités mettant en évidence l'importance de l'eau se multiplient, en France comme à l'international. Dans un contexte de changement global, associant notamment le dérèglement climatique, l'érosion de la biodiversité, la croissance démographique, les modes de production et de consommation associés, l'accélération de la circulation des biens et des personnes, etc., les pressions anthropiques et l'augmentation de la demande ont un impact direct sur le cycle de l'eau, sa disponibilité et sa qualité.

Sur ce sujet complexe, appelant des compétences variées et complémentaires, le CNRS se positionne comme un acteur incontournable. Sa cellule Eau a recensé pas moins de 210 unités de recherche, associant différents partenaires académiques et non académiques. En leur sein, près de 3 000 scientifiques – techniciens et techniciennes, doctorants et doctorantes, chercheurs et chercheuses – relevant des dix instituts du CNRS produisent des connaissances multiples et interdisciplinaires. Leurs objectifs : mieux comprendre l'eau dans tous ses états et ses interactions ; trouver des solutions innovantes pour un meilleur partage pour, et entre les usagers et les écosystèmes ; venir en appui aux gestionnaires de l'eau et aux décideurs et plus largement, contribuer à la gouvernance des territoires.

C'est en s'appuyant sur la qualité et la diversité de cette expertise scientifique que le CNRS a initié dans le cadre de France 2030 le Programme et équipement

prioritaire de recherche (PEPR) exploratoire « OneWater – Eau Bien Commun », un programme national qu'il copilote avec le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et l'Institut national de recherche pour l'agriculture et l'environnement (Inrae), en association avec dix partenaires académiques (www.onewater.fr). En effet, c'est en mobilisant l'ensemble des communautés scientifiques françaises et en renforçant le

*“Le CNRS est un
acteur incontournable
pour répondre aux
grands enjeux sur l'eau.”*

dialogue avec tous les acteurs socio-économiques et les décideurs que nous pourrions répondre aux grands défis actuels et futurs.

La tâche est immense et impose de changer de paradigme : ne plus voir la ressource en eau comme étant au service de nos usages, mais réenvisager nos usages au service de l'eau. Cela nécessite d'interroger le concept d'empreinte et de le mettre au service de la protection de cette ressource tant en termes de quantité que de qualité, de considérer l'eau comme une sentinelle de la qualité des milieux et de la santé humaine, de proposer des solutions d'adaptation viables, durables et équitables, d'envisager de nouveaux modes de gouvernance des socio-écosystèmes et, bien sûr, de partager les données pour venir en appui à la gestion de l'eau.

Pour y arriver, il est indispensable de transmettre ces connaissances à toute la société, de valoriser l'importance de s'appuyer sur la recherche pour prendre des décisions et de passer à l'action pour préserver ce bien commun. C'est dans cette perspective que les chercheurs sont mobilisés auprès des scolaires, gestionnaires, entrepreneurs, élus... dans les territoires, et jusque dans les conférences internationales comme la COP28 sur le climat, qui vient tout juste de s'achever.



Agathe Euzen,

Directrice adjointe de CNRS Écologie & Environnement
Responsable de la cellule Eau du CNRS
Codirectrice du PEPR « OneWater – Eau Bien Commun »

© LUDOVIC PIRON-HALLOUET



© EMILIO RAPPOLD / DPA / DPA PICTURE-ALLIANCE VIA AFP

GRAND FORMAT

11

Tensions sur l'eau	12
Le grand hamster d'Alsace en sursis	26
Supraconductivité, la température monte	32

06

Entretien avec
Marie-Paule Cani

© FRÉDÉRIQUE PLAS

EN PERSONNE 5

« J'essaie de rendre l'humain plus créatif », entretien avec Marie-Paule Cani	6
3 questions à Elisabeth Kohler, directrice de la Mission pour la place des femmes du CNRS	9
Brèves	10

50

40 ans de recherche
dans un laboratoire extrême

© BENOÎT BANAUCQUIS IMAGES

EN ACTION 39

Les sucres, nouvelle arme contre les infections	40
Comment les humains ont volé le rouge aux plantes	42
Le CNRS et la propriété intellectuelle	44
Comprendre les vertiges	46
Sous les Alpes, 40 ans de recherche dans un laboratoire extrême	50
Une IA décèle les premiers signes de la sclérose en plaques	52
« La sociologie doit renouer avec l'esprit scientifique », entretien avec Bernard Lahire	54

Une maison
pour faire rayonner
les maths

58

© IHP PARIS/ATELIER NOUVEIRE, DUBAMATHIRBAUT VOISIN

LES IDÉES 57

Une maison pour faire rayonner les maths	58
Brèves à lire	61
Los Ñetas, un gang très politique	62
Brèves à lire	65

LA CHRONIQUE

Prêter l'oreille à Pascal	66
---------------------------------	----

EN PERSONNE



*Rencontre avec une informaticienne
qui sculpte des mondes virtuels
et une ambassadrice de l'égalité
homme-femme au travail.*

« J'essaie de rendre l'humain plus créatif »

NUMÉRIQUE

ENTRETIEN Marie-Paule Cani sculpte des formes 3D et crée des mondes virtuels animés. Les systèmes intelligents de création visuelle qu'elle développe servent aussi bien pour la recherche que pour la création de jeux vidéo, de films d'animation ou d'effets spéciaux. Gros plan sur cette spécialiste d'informatique graphique.

PROPOS RECUEILLIS PAR SEBASTIÁN ESCALÓN

Sur votre page personnelle, il est dit que l'objectif de vos recherches est de créer une intelligence artificielle créative. De quoi s'agit-il ?

Marie-Paule Cani ¹. Il s'agit de rendre les humains plus créatifs grâce à des modèles intelligents. Je voudrais que l'utilisateur puisse créer ce qu'il a en tête avec l'aide de systèmes qui prennent en charge les tâches répétitives et ennuyeuses. Il ne s'agit pas du tout d'une intelligence artificielle (IA) qui crée à notre place. Je lutte contre ça depuis le début. Maintenant, quand les gens pensent à une IA créative, ils imaginent quelque chose comme Dall-E ou ChatGPT, des systèmes qui peuvent créer quelque chose à partir d'une phrase. Avec ces applications, au lieu de prendre la peine de réfléchir à ce que l'on veut vraiment, on fait une espèce de copier-coller à partir de ce qui existe déjà. Ce n'est pas du tout le sens de mes recherches. Mon but est d'imaginer des systèmes intelligents qui aident l'utilisateur, un peu comme un assistant qui aide un chirurgien en lui tendant exactement le bon outil au bon moment. Les tâches de création sont parmi les plus intéressantes sur Terre, alors pourquoi les laisser à une machine ? Déléguons-lui plutôt les tâches fastidieuses, celles que nous n'aimons pas faire.

Comment aidez-vous les créateurs à se concentrer sur les tâches de création ?

M.-P. C. En leur donnant des instruments pour travailler tout en restant dans le flot de la création. Au lieu d'ouvrir un menu, puis un sous-menu pour éditer tel ou tel paramètre, je veux que l'utilisateur puisse créer par gestes. Un exemple que je donne souvent : imaginons que l'on est en train de créer une table avec des assiettes, des couverts, des verres. Maintenant, je veux que la table soit plus longue. Je veux, d'un seul geste, pouvoir la rallonger. Le système intelligent doit se rendre compte qu'il y a des détails répétitifs, comme les assiettes et les couverts, qu'il faut dupliquer et non pas étirer. Ensuite, je peux aller modifier localement, affiner des détails, sans que tout le reste soit modifié. L'idée est d'interpréter les gestes de création des utilisateurs. Ils n'ont ainsi pas à se confronter à la complexité des modèles informatiques.

Les créateurs de jeux vidéo et de films d'animation utilisent les outils que vous développez. Comment identifiez-vous leurs besoins ?

M.-P. C. C'est en regardant travailler les artistes, en les écoutant nous expliquer sur quoi ils passent le plus de temps, ce qui les ennuie le plus, qu'on trouve des méthodes pour leur simplifier la tâche. Par exemple, durant mon année sabbatique en Nouvelle-Zélande, en 2007, j'ai été invitée chez Weta Digital ², studio d'effets spéciaux fondé par le réalisateur Peter Jackson. Ils m'ont alors parlé du film *King Kong* qu'ils venaient de terminer. Il y avait là un artiste

“Les tâches de création sont parmi les plus intéressantes sur Terre, alors pourquoi les laisser à une machine ?”

¹. Chercheuse au Laboratoire d'informatique de l'École polytechnique (CNRS/École polytechnique) et professeure à l'École polytechnique. Elle a reçu la médaille d'argent du CNRS en 2012 et est membre de l'Académie des sciences. ². Weta Digital (aujourd'hui WetaFX) a notamment participé à la création des effets spéciaux des films *Avatar* (2009), *Mulan* (2020), de la série de films *Le Seigneur des anneaux* (2001-2003), ou encore la série télévisée *Game of Thrones* (2011-2019).



© FRÉDÉRIQUE PLUS

► Marie-Paule Cani en mars 2023.

infographiste qui plantait à la main les touffes de poils virtuelles de King Kong et les peignait pour que la fourrure ait l'air naturelle et un peu emmêlée. C'était une tâche très répétitive qui lui prenait des jours et des jours. Ce serait plus simple que l'utilisateur puisse créer un petit exemple de fourrure ébouriffée puis, d'un seul geste, qu'il puisse l'étendre sur toute la surface du modèle virtuel. Au labo, nous avons créé ce genre de système de copier-coller intelligent. Notre outil Worldbrush permet ainsi de prendre un échantillon de paysage virtuel, puis de le répliquer non pas à l'identique, mais avec les mêmes caractéristiques statistiques. Par ailleurs, un ancien étudiant de mon équipe qui a travaillé chez Weta nous a dit que notre système de modélisation par croquis de chevelures a été utilisé pour le premier film *Avatar*.

Sur quels autres éléments graphiques pouvez-vous aider les créateurs d'effets spéciaux ?

M.-P. C. À Weta, ils nous avaient dit également que leurs artistes n'arrivaient pas à bien faire le design des montagnes. Ils voulaient des montagnes réalistes dont on puisse dessiner les silhouettes facilement, à l'arrière-plan

derrière les acteurs. Cela a conduit à l'un de nos articles de recherche où l'on développait une méthode pour prendre un paysage existant et le déformer depuis le point de vue de la caméra de manière réaliste. De cette façon, on obtenait la prise de vue souhaitée.

N'avez-vous jamais eu envie de participer plus directement à la création d'un film ?

M.-P. C. Je n'ai pas le temps ! Ceux qui participent à ces créations passent un an de leur vie à faire une chose particulière. Moi, en général, j'ai entre cinq et dix projets en cours avec différents étudiants et collaborateurs scientifiques, en France ou à l'étranger. On explore différentes pistes en parallèle. Cette liberté, je l'ai parce que je ne fais pas partie d'une entreprise ou d'une start-up. Lorsque vous animez un personnage qui marche sur la neige, une robe qui tourne ou encore une coulée de lave, vous devez ajouter des connaissances physiques aux modèles.

Comment procédez-vous ?

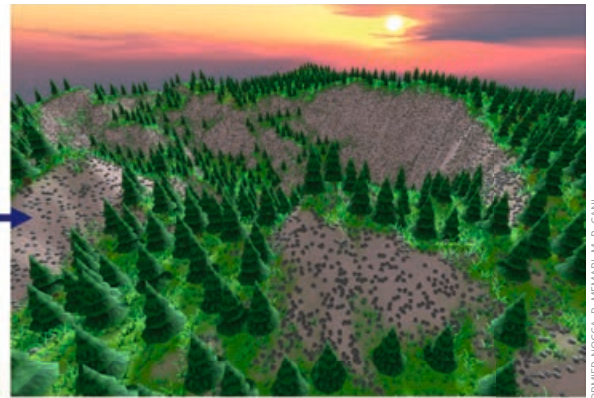
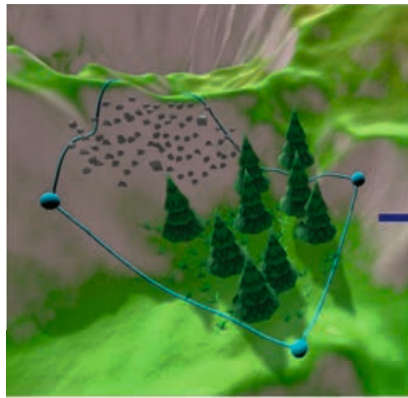
M.-P. C. Pour créer un monde virtuel avec des lois réalistes, il faut se fonder sur ces connaissances physiques. En informatique graphique, ça fait trente ans qu'on utilise nos connaissances du monde réel pour concevoir des modèles et des simulations. L'originalité de mon approche est de voir comment des connaissances plus génériques pourraient être utilisées pendant des phases de création. Par exemple, prenons un biologiste qui

veut un système pour faire des croquis animés fonctionnant à toutes les échelles, de l'organisme entier jusqu'à la simple cellule. Il y a des règles de répétitivité et des principes simples pour le mouvement et les déformations (par exemple, la conservation du volume ou de l'aire de surface). Celles-ci permettent d'aller vers un tel outil générique.

Vous développez aussi des outils avec des chercheurs de diverses disciplines. Comment se déroule cette collaboration ?

M.-P. C. D'une part, je cherche à extraire leurs connaissances de très haut niveau sur un phénomène afin de les reproduire dans un monde virtuel. D'autre part, les chercheurs servent d'inspirateurs et de testeurs pour des systèmes de création. Il peut s'agir par exemple d'un système grâce auquel ils peuvent dessiner un croquis expliquant un phénomène et qui se transforme directement en une scène 3D animée. Nous avons ainsi travaillé avec un professeur d'anatomie. L'idée était qu'à partir d'un croquis en deux dimensions d'un organe, il puisse obtenir un modèle en 3D autour duquel on peut tourner, zoomer pour ajouter des détails, ou au contraire dézoomer pour montrer la place d'un organe dans le corps humain.

▲ L'outil Worldbrush et ses extensions plus récentes permettent de prendre un échantillon de paysage virtuel, puis de le répliquer non pas à l'identique, mais avec les mêmes caractéristiques statistiques.



Qu'est-ce qui vous a amenée dans un domaine de recherche si lié à l'art ? Aviez-vous une vocation artistique ?

M.-P. C. Depuis que je suis petite j'aime dessiner, sculpter, fabriquer. Je créais de petits mondes faits de petits personnages en pâte à modeler avec des squelettes en fil de fer.

J'ai retrouvé tout cela dans ma recherche, avec en plus la possibilité de les voir s'animer sous mes yeux ! Mais je n'avais pas de réelle vocation artistique, plutôt une vocation à la création. Et l'informatique en est devenu l'outil. Je conseille souvent aux jeunes de réfléchir à ce qu'ils ont toujours aimé faire et de le mettre dans leur métier.

Parlez-nous de votre parcours.

M.-P. C. Comme j'étais bonne élève et que j'avais une grande sœur très littéraire, ma mère m'a poussée vers les études scientifiques. Je me suis retrouvée en classe prépa et j'ai eu la chance d'entrer à l'École normale supérieure. J'ai passé l'agrégation de mathématiques, puis j'ai décidé d'aller vers une discipline qui, en 1986-1987, émergeait à peine : l'informatique graphique. La première chose que j'ai voulu faire a été de produire des scènes et des objets naturels dans ces mondes qu'on pouvait créer. À l'époque, les jeux vidéo avaient un caractère presque carcéral : on entrait dans un château, la pièce était généralement vide, alors on passait à la suivante qui était également vide. De plus, on ne savait pas faire des scènes naturelles, pour se promener à l'extérieur.

BLOCKCHAIN

Ou chaîne de blocs en français. Sorte de livre de compte numérique qui enregistre toutes les actions, par exemple les déplacements de jetons de compte en compte dans le cas des cryptomonnaies.

Tout cela présente un fort aspect ludique. Est-ce quelque chose d'important pour vous ?

M.-P. C. Oui, tout à fait. Petit à petit, je mets dans les algorithmes les éléments qui vont me permettre de créer un monde virtuel que j'imagine. C'est intéressant parce que, en créant cet univers, je suis en train de créer en même temps le média qui me permet de m'exprimer. C'est comme si j'étais un peintre et qu'en plus d'un tableau, j'étais en train de créer la meilleure toile, la meilleure peinture et les meilleurs pinceaux.

Comment voyez-vous l'évolution de votre domaine. Quels sont les nouveaux risques et défis ?

M.-P. C. Beaucoup de gens commencent à découvrir ces mondes virtuels animés sur lesquels nous travaillons depuis trente ans, au travers du terme « Métavers ». Mais si le Métavers devient une espèce de terrain commercial limité où tout est payant et coûteux pour la planète à cause de la 5G³ et de la blockchain, je n'en vois pas l'intérêt. Moi, je lutte pour des mondes virtuels qui ont un sens. Par exemple, permettre aux préhistoriens de voyager dans le temps et de s'immerger dans le résultat de leurs hypothèses. Si nos recherches peuvent servir à donner du sens au Métavers, là je suis d'accord. Un autre risque est que l'humanité perde une partie de ses capacités créatives.

De plus en plus de personnes, en particulier des chercheurs, utilisent en effet l'apprentissage profond (ou *deep learning*) pour résoudre quantité de problèmes. On perd donc les modèles fondés sur les connaissances au profit de modèles qui apprennent à partir de millions d'exemples. Et, de cette façon, on perd aussi la capacité d'expliquer les résultats. À l'avenir, j'espère que nous aurons des systèmes intelligents qui combinent les connaissances existantes avec un peu d'apprentissage, de manière à faire quelque chose de vraiment efficace. Et qui aide l'humain à se consacrer uniquement aux tâches les plus intéressantes. ||

“ Je lutte pour des mondes virtuels qui ont un sens. Par exemple, permettre aux préhistoriens de voyager dans le temps et de s'immerger dans le résultat de leurs hypothèses. ”

3. Le Haut Conseil pour le climat a estimé en 2020 que la norme de réseau cinquième génération (5G) aurait un impact négatif sur les émissions de gaz à effet de serre, en particulier en raison de la production de nouveaux terminaux (smartphones, tablettes, etc.) et d'équipements de réseau.

3 questions à... Elisabeth Kohler

La directrice de la Mission pour la place des femmes du CNRS dresse le bilan du Plan d'action 2021-2023 pour l'égalité professionnelle.

PROPOS RECUEILLIS PAR SOPHIE FÉLIX

Quel regard portez-vous sur les avancées en matière d'égalité professionnelle au CNRS ?

Elisabeth Kohler. En prolongeant et en renforçant les politiques d'égalité menées au CNRS depuis une vingtaine d'années, le plan d'action 2021-2023 a permis de réaliser des progrès significatifs¹, par exemple sur les écarts de rémunération, les promotions de chercheuses, ou la prévention et lutte contre les violences sexistes et sexuelles. Mais pour moi, il y a deux grands enseignements à tirer de ce bilan. D'une part, de plus en plus de femmes et d'hommes prennent un réel engagement pour l'égalité, de la direction du CNRS jusque dans les laboratoires, facilitant ainsi l'appropriation de ces politiques par toutes et tous. D'autre part, des barrières, notamment réglementaires, empêchent pour l'instant le CNRS de progresser aussi rapidement qu'il le souhaiterait. Certains véhicules administratifs nous manquent, par exemple pour prendre en charge les frais de garde d'enfants lors de missions.



© CYRIL FRESILLO/CNRS IMAGES

“De plus en plus de femmes et d'hommes prennent un réel engagement pour l'égalité, de la direction du CNRS jusque dans les laboratoires.”

Comment évolue le plafond de verre au CNRS ?

E. K. Le principe des promotions « en cascade » impulsé par le président-directeur général Antoine Petit – soit promouvoir un pourcentage égal ou supérieur au pourcentage de femmes promouvables – a permis une réduction du plafond de verre : la proportion de femmes promues directrices de recherche est passée de 30,1 % en 2019 à 31,7 % en 2022, quand le pourcentage de directrices d'unité passait

de 22,4 % à 25 %. Cette évolution doit être accentuée et étendue à l'ensemble des postes à responsabilité. La visibilité des femmes s'est également renforcée ces dernières années grâce à la parité dans les récompenses décernées par le CNRS et à une vigilance accrue concernant la participation des femmes aux événements scientifiques. Des efforts sont cependant très attendus par la direction du CNRS dans, par exemple, le recrutement des femmes aux postes de chargées de recherche ou la mise en valeur des carrières, notamment dans des domaines traditionnellement plus féminins.

Que prévoyez-vous pour la suite ?

E. K. La plupart des actions du plan 2021-2023 seront consolidées dans le prochain plan d'action pour la période 2024-26. Ce dernier comprendra également des nouveautés avec un focus sur la progression et l'attractivité des carrières des quelque 6 500 ingénieures et techniciennes (IT), suite à une analyse approfondie réalisée en 2023 sur les écarts de rémunération. Il est prévu, par exemple, de sensibiliser les jurys de recrutement et de promotion aux stéréotypes de genre ou encore d'interdire une diminution du montant des primes en cas de congé maternité. Si le télétravail et les incitations aux congés d'accueil pour les pères ont permis d'améliorer l'équilibre entre la vie professionnelle et la vie personnelle et familiale, il reste encore de nombreux progrès à faire dans ce domaine. Il est également important de continuer à sensibiliser les agents à la prévention et la lutte contre les violences sexistes et sexuelles. Enfin, des actions transverses viseront, dans ce nouveau plan, à mieux intégrer l'égalité dans l'ensemble des politiques du CNRS, notamment dans les actions de coopération internationale. **||**

+
Pour consulter le Plan d'action pour l'égalité 2021-2023 :
<https://mpdf.cnrs.fr/roadmap>

1. Voir l'article de CNRS Info : <https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/au-cnrs-legalite-professionnelle-en-bonne-voie>



Claire de March



Laurette Piani

Deux jeunes chercheuses CNRS distinguées

Claire de March, chargée de recherche à l'Institut de chimie des substances naturelles du CNRS et Laurette Piani, chargée de recherche au Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (CNRS/Université de Lorraine), ont reçu le prix Irène Joliot-Curie dans la catégorie « Jeune femme scientifique » de l'année, décerné par l'Académie des sciences. Cette dernière remet chaque année près de 80 prix couvrant l'ensemble des domaines scientifiques. En 2023, le palmarès met à l'honneur plus de 50 lauréats liés au CNRS.

Lire sur CNRS Info : <https://tinyurl.com/34ezh5zr>



Florence Débarre, Prix A3 du Rayonnement scientifique

Décerné par l'Association des anciens et des amis du CNRS, le prix A3 du Rayonnement scientifique 2023 a été remis le 4 décembre dernier à Florence Débarre, chercheuse en biologie évolutive. Déjà lauréate de la médaille de bronze 2022 du CNRS, ce prix d'un montant de 5000 € la récompense pour l'excellence de ses travaux de modélisation des dynamiques éco-évolutives grâce au dialogue entre mathématiques et biologie.

Pierre Santucci reçoit un FEBS Excellence Awards

Chercheur CNRS en microbiologie moléculaire au Laboratoire d'ingénierie des systèmes macromoléculaires (CNRS/Aix-Marseille Université), Pierre Santucci est lauréat du prix européen FEBS Excellence Awards 2023. D'une valeur de 100 000 €, ce prix de recherche prestigieux a pour ambition de soutenir les jeunes chercheurs permanents dans le domaine des sciences biologiques.



COLLECTION PERSONNELLE

Deux biologistes du CNRS lauréats du prix Ruban Rose Avenir

Le 18 octobre, Albertas Navickas, chercheur CNRS à l'Institut Curie, spécialiste des métastases et Flavio Maina, directeur de recherche CNRS au Centre de recherche en cancérologie de Marseille (CNRS/Aix-Marseille Université/Inserm/Institut Paoli et Calmettes), spécialiste de la progression tumorale, ont reçu l'un des dix prix Ruban Rose 2023. Depuis vingt ans, l'association Ruban Rose récompense des projets de recherche et associatifs ayant pour objectif l'amélioration de la prise en charge des patientes atteintes de cancer du sein.



Albertas Navickas



Flavio Maina

© KOSSA PRODUCTIONS / ASSOCIATION RUBAN ROSE

Nomination

Elsa Cortijo, directrice de recherche au CNRS, est nommée pour mettre en place l'agence Climat, biodiversité, sociétés durables, sous la responsabilité du CNRS et en collaboration avec tous ses partenaires scientifiques. Entrée au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE, CNRS/CEA/UVSQ) en 1997, Elsa Cortijo y étudie les mécanismes climatiques en période glaciaire et interglaciaire avant d'en prendre la direction en 2014. Depuis 2019, elle occupait le poste de directrice de la recherche fondamentale du CEA.



© LAURENCE GODART

GRAND FORMAT



*Quand les scientifiques remontent
aux sources d'une eau qui se raréfie et
tentent de faire léviter des objets.*

GRAND FORMAT



Tensions sur l'eau



TERRE

SOCIÉTÉS

Avec le changement climatique, un tiers de la population mondiale devrait se retrouver confrontée à la raréfaction de la ressource en eau. Cela ne va pas sans susciter des tensions croissantes, à l'international comme à l'échelle locale, et interroge la façon dont nous gérons et utilisons la ressource en eau.

PAR LAURE CAILLOCE

Début octobre 2023, le président français Emmanuel Macron était en visite d'État de deux jours en Suisse, avec à son agenda une négociation d'un genre particulier : le chef d'État venait demander très officiellement d'augmenter le débit du Rhône, dont le « robinet » se trouve en Suisse et est contrôlé par le barrage du Seujet, en plein cœur de Genève. « *Le débit du Rhône est un sujet extrêmement sensible, car une bonne partie de la chaîne hydronucléaire de la France en dépend* », explique Stéphane Ghiotti, géographe au laboratoire Acteurs, ressources et territoires dans le développement¹ de Montpellier. Outre le transport fluvial, l'irrigation des cultures et l'alimentation en eau potable de grandes villes comme Lyon, la France a en effet besoin de l'eau du Rhône pour refroidir ses quatre centrales nucléaires présentes le long du fleuve et alimenter une vingtaine de centrales hydroélectriques... et ce alors que le niveau du Rhône baisse de manière préoccupante, notamment durant la période estivale.

Plus de précipitations mais pas partout

Le réchauffement du climat planétaire dû aux activités humaines rebat en effet complètement les cartes de la distribution mondiale de la ressource en eau. « *Le réchauffement global accélère le cycle de l'eau*, explique Bertrand Decharme, hydrologue et modélisateur au Centre national de recherches météorologiques², à Toulouse. *Il y a plus d'évaporation, donc plus de précipitations à l'échelle mondiale, mais celles-ci ne se répartissent pas de manière homogène.* » Résultat : selon les dernières projections, un tiers de la population mondiale

Le Tage à sec dans la région de Guadalajara, en Espagne.

© MANU REINOSOPA VIA ZUMA WIRE

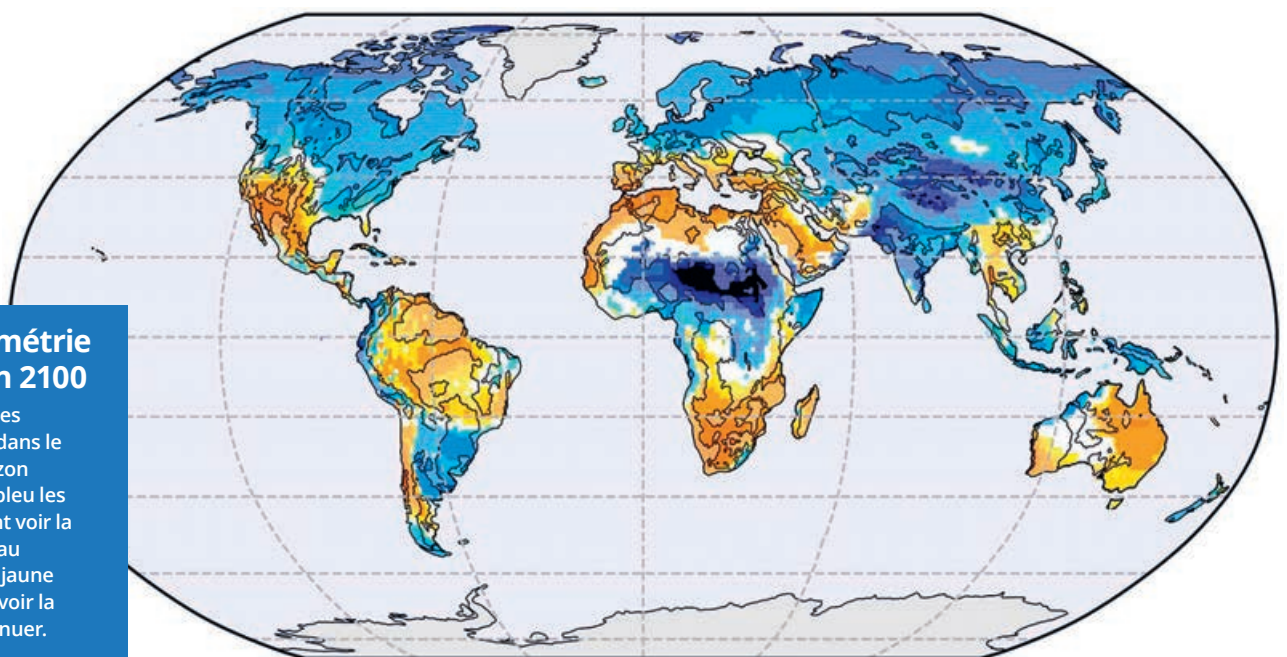
1. Unité CNRS/Cirad/Université Paul Valéry Montpellier/Université Perpignan Via Domitia. 2. Unité CNRS/Météo-France.

“Nos sociétés ont bouleversé le cycle de l'eau sans attendre le changement climatique et sont devenues extrêmement dépendantes de cette ressource en eau.”

devrait voir (et voit déjà) sa ressource en eau diminuer de façon drastique dans les décennies qui viennent. « C'est le cas de tout le pourtour méditerranéen, de l'ouest des États-Unis, de l'Afrique australe ou encore de l'Australie, explique le chercheur. À l'inverse, d'autres régions devraient voir leurs précipitations annuelles moyennes augmenter, comme par exemple le nord de l'Europe – pays scandinaves, Pologne, Ukraine, etc. –, le Canada et l'Alaska, toute la Sibérie et une partie du sud de l'Asie. »

La France entre deux eaux

Le cas de la France est plus difficile à trancher, le pays se trouvant dans la zone de transition entre deux zones aux évolutions diamétralement opposées : le nord de l'Europe et la région méditerranéenne. Si les scientifiques prévoient, et constatent déjà, que la ressource en eau va significativement diminuer dans la partie sud du pays, ils ont plus de mal à modéliser ce qu'il va se passer au nord de la Seine.



La pluviométrie à l'horizon 2100

Modélisation des précipitations dans le monde à l'horizon 2070-2100. En bleu les régions qui vont voir la ressource en eau augmenter, en jaune celles qui vont voir la ressource diminuer.

© MAYA COSTANTINI ET. AL, PROJECTED CLIMATE-DRIVEN CHANGES OF WATER TABLE DEPTH IN THE WORLD'S MAJOR GROUNDWATER BASINS, 2023

L'eau du Tage a été en partie détournée pour irriguer les cultures en Andalousie, dans le sud de l'Espagne.



© JOSE JORDAN / AFP

Nil, Mékong, etc. Entre l'Espagne et le Portugal, c'est aujourd'hui autour du Tage que le torchon brûle, les associations écologistes portugaises accusant les Espagnols de trop puiser dans le fleuve coulant de l'Espagne vers le Portugal pour l'irrigation de la vaste zone agricole située tout au sud de l'Andalousie. « Ils remettent en cause la convention d'Albufeira, signée il y a 25 ans entre les deux pays et qui à l'époque prévoyait un transfert des eaux du fleuve vers le sud de l'Espagne », raconte Nathalie Hervé-Fournereau.

Vol d'icebergs

Les fleuves sont loin d'être le seul sujet de frictions. Plus proches des pôles, c'est la propriété des icebergs qui est source de débats. Ainsi, des tensions entre le Canada et le Groenland (région autonome du Danemark) sont apparues autour des blocs d'eau gelée qui se détachent de la calotte glaciaire groenlandaise et dérivent jusque dans les eaux canadiennes. « Le Canada a autorisé l'exploitation de ces icebergs pour fabriquer de l'eau douce, notamment, mais le Groenland a contesté cette utilisation au motif que c'est une ressource naturelle lui appartenant », détaille la juriste. À l'autre bout du globe, c'est la ville du Cap, en Afrique du Sud, qui envisageait très sérieusement en 2018 de remorquer jusqu'à la côte un petit iceberg détaché de la calotte glaciaire antarctique pour fournir en eau potable sa population.

« Il y a un vrai flou juridique autour de la qualification de ces plateformes glaciaires, commente Nathalie Hervé-Fournereau. De quoi parle-t-on exactement ? Car ces objets bougent, circulent... Une chose est sûre : avec 100 000 icebergs qui fondent en mer chaque année, selon le décompte de l'Organisation des Nations unies (ONU), la question de leur statut va continuer de se poser – même si le coût de leur remorquage et de leur exploitation reste à ce jour prohibitif et limite de facto les initiatives. »

L'ensemencement des nuages, destiné à les faire éclater au-dessus des zones agricoles qui le nécessitent, est une autre source de tension potentielle. Et ce, alors que les projets de géo-ingénierie se multiplient en Amérique, au Moyen-Orient ou encore en Chine, où la centaine de programmes actuellement en développement ne laisse pas d'inquiéter les voisins du géant asiatique. « En France, l'ensemencement avec des particules d'iode d'argent est utilisé dans une vingtaine de départements pour neutraliser les nuages de grêle », précise la juriste. Si l'efficacité de la technique imaginée dès les années 1960 reste à évaluer scientifiquement, elle pose d'ores et déjà la question : À qui appartiennent les nuages ?

Problème : à ce jour, aucune organisation internationale n'est en charge de réguler la question de l'eau, pas plus que de l'environnement. Un sommet exceptionnel sur l'eau

« Le paradoxe, c'est que les régions du monde qui vont voir leurs ressources en eau augmenter sont pour beaucoup celles qui en ont déjà en abondance, et que les régions où la diminution sera la plus forte sont celles où il existe déjà de forts besoins, notamment pour le secteur agricole », poursuit Bertrand Decharme. Ce n'est pas le seul : car même les régions où les précipitations devraient augmenter en moyenne annuelle doivent se préparer à faire face à une irrégularité de la ressource, du fait d'une plus grande amplitude saisonnière, avec des hivers plus arrosés et des sécheresses plus sévères l'été.

Conséquence de ces bouleversements : « les instances internationales, et notamment celles chargées de la sécurité et de la défense, estiment que l'eau va devenir la première source de conflits sur la planète », explique la juriste Nathalie Hervé-Fournereau, spécialiste en droit de l'environnement à l'Institut de l'Ouest : Droit et Europe³, à Rennes. Et ce, d'autant que 40 % des ressources en eau sont transfrontalières, qu'il s'agisse des nappes phréatiques comme la nappe alluviale du Rhin, plus grande nappe phréatique d'Europe à cheval entre la France et l'Allemagne, ou des 250 bassins hydrographiques partagés par plusieurs pays : Rhône, Rhin, Danube,

3. Unité CNRS/Université de Rennes.

organisé par l'ONU en mars 2023 a pris acte des tensions croissantes et appelé les États à davantage de coopération sur la question... « *Mais sur la question de l'eau, les États sont jaloux de leurs prérogatives et peu enclins à revenir sur leur souveraineté* », souligne la juriste.

Mais le sujet de l'eau dépasse de loin le cadre des relations internationales. À l'échelle plus locale, la raréfaction de la ressource, ou à tout le moins son irrégularité dans le temps et dans l'espace, embrase le débat public et soulève la question de son partage. Ainsi, les tensions nées autour des projets de mégabassines dans l'ouest de la France – des bassines alimentées par le pompage dans les nappes phréatiques durant la période hivernale, afin d'irriguer les cultures durant la période estivale – posent avec une acuité nouvelle la question des usages dans l'Hexagone (*lire p. 20*).

Quantité et qualité en baisse

« *Pendant des décennies, en France comme dans de nombreux pays développés, on a pensé que la ressource en eau était inépuisable. On a puisé dedans sans se poser de questions* », raconte Gilles Pinay, écologue et biogéochimiste au laboratoire Environnement, ville et société⁴, à Lyon. Des interventions majeures sur le cycle de l'eau ont été opérées, à tous les niveaux. « *Nos sociétés ont bouleversé le cycle de l'eau sans attendre le changement climatique et sont devenues extrêmement dépendantes de cette ressource en eau*, confirme Florence Habets, hydroclimatologue au Laboratoire

Ensemencement de nuages par l'armée de l'air en Malaisie.



“*Les instances internationales, notamment celles chargées de la sécurité et de la défense, estiment que l'eau va devenir la première source de conflits sur la planète.*”

de géologie de l'École normale supérieure⁵, à Paris. *Pour répondre aux besoins croissants des secteurs industriel et agricole, notamment, on a détourné des masses d'eau considérables, via la construction de barrages, de dériviatives en tout genre... Au point qu'aujourd'hui, la moitié des débits des fleuves de la planète sont dérivés et en partie consommés par les humains, et que les volumes d'eau stockés sont quatre fois plus importants que la quantité de neige qui tombe chaque année.* »

Des actions bien souvent irréversibles, comme les modifications opérées dès les années 1950-1960 sur le cours de la Durance, l'un des affluents du Rhône. Des barrages comme celui de Serre-Ponçon (Hautes-Alpes), la construction d'innombrables canaux d'irrigation et la déviation de la Durance vers l'étang de Berre, en toute fin de course, ont bouleversé le fonctionnement de ce cours d'eau qui, désormais, ne vient quasiment plus grossir le débit du Rhône. « *La Durance est une rivière dont la particularité aujourd'hui est que son débit diminue de l'amont vers l'aval – normalement, c'est l'inverse qui se produit!* », commente Florence Habets.

La Durance n'est pas un cas isolé. En plus des interventions sur les fleuves – barrages, réservoirs en tout genre destinés à sécuriser la filière hydronucléaire de la France... –, de nombreuses rivières ont été « rectifiées » pour accompagner la modernisation du secteur agricole. « *Avec l'intensification de l'agriculture, on a agrandi les parcelles, ce qui a impliqué de modifier le trajet des rivières*, décrit Florence Habets. *Dans les zones humides de l'ouest de la France, les champs ont été drainés afin que les tracteurs puissent passer et que les plantes ne soient pas saturées en eau, au moyen de tuyaux enterrés à plusieurs dizaines de centimètres de profondeur. Pour évacuer toute cette eau, les rivières ont été approfondies, ce qui a eu pour dommage collatéral de faire diminuer le niveau des nappes phréatiques...* »

« *Nos sociétés n'ont pas arrêté d'accélérer la circulation de l'eau et de l'évacuer, l'évacuer...*, constate la scientifique. *Et aujourd'hui, ce que l'on a fait se révèle extrêmement néfaste pour notre adaptation au changement climatique.* » Sans compter

4. Unité CNRS/École nationale des travaux publics d'État/ENS Lyon/Ensa Lyon/ Université Jean Monnet/Université Lumière/Université Jean Moulin. 5. Unité CNRS/ENS-PSL.



Un iceberg détaché de la calotte groenlandaise dérive le long des côtes canadiennes, dans la région de Terre-Neuve.

© TONY CENICOLA/THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA

la dégradation de la qualité des eaux de surface et souterraines, qui a notamment pour effet d'entraîner la fermeture à ce jour d'environ 25 % des points de captage d'eau potable depuis 1980 dans l'Hexagone, réduisant un peu plus la quantité d'eau réellement disponible.

Débat sur les usages

Conséquence : le débat sur les usages – qui, de l'industrie, de l'agriculture ou de la production d'eau potable, a les besoins les plus légitimes –, commence à virer à l'orage. « *Les grandes masses d'eau prélevées en France sont connues dans les grandes lignes. Il est globalement admis que 32 milliards de mètres cubes sont prélevés annuellement dans les eaux de surface et souterraines, avance Stéphane Ghiotti. Sur ce total, les prélèvements industriels représenteraient 8 %, les usages agricoles 9 %, l'alimentation des voies de navigation 16 %, la production d'eau potable 17 % et le refroidissement des centrales nucléaires et thermiques 50 %.* » Mais ces chiffres n'ont de valeur qu'indicative, selon le géographe, tant il est difficile d'estimer les quantités réelles d'eau ponctionnées – ainsi, une grande partie des prélèvements pour l'irrigation agricole sont individuels, c'est-à-dire sans contrôle ou basés sur la seule déclaration. De plus, ils ne donnent qu'une vision incomplète des usages.

Car la réalité, lorsqu'il s'agit de l'eau, s'avère d'une redoutable complexité. Ainsi, les prélèvements ne sont pas tous de

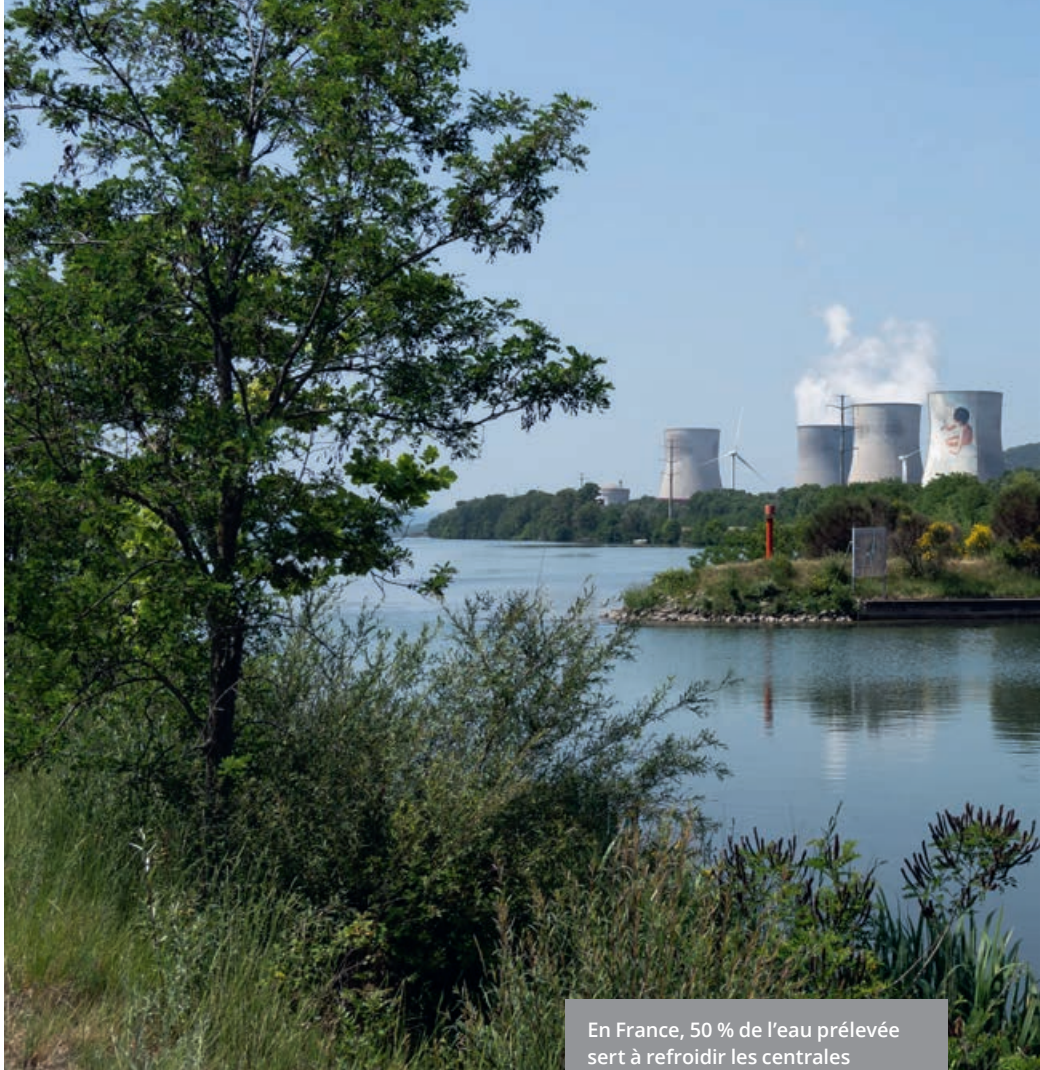
Swot, un satellite pour scruter les eaux terrestres

Développé par le Cnes, la Nasa, Thales Alenia Space et le CNRS, Swot (*Surface Water Ocean Topography*) est un satellite d'observation de la Terre chargé de mesurer le niveau des eaux de surface – lacs, réservoirs et cours d'eau –, leur largeur, et d'estimer grâce à ces variables le débit des principales rivières, ainsi que de déterminer de manière à la fois très fine et très précise le niveau des

océans et des mers. Mis sur orbite en décembre 2022, le satellite passera au crible durant cinq années la topographie de 90 % des surfaces d'eau au niveau planétaire, une échelle jamais atteinte auparavant. Ces mesures doivent permettre de mieux comprendre le cycle de l'eau et d'affiner notre connaissance de la circulation des océans pour améliorer les modèles climatiques.

même nature : la plupart de l'eau utilisée par le secteur industriel (pour refroidir, nettoyer, etc.) finit par revenir dans le cycle local de l'eau, de même que l'eau potable qui, une fois utilisée, est traitée et rejetée dans les cours d'eau... sans préjuger de sa qualité. Tandis que l'eau prélevée par le secteur agricole pour irriguer est consommée en quasi-totalité par la plante ou évaporée et ne revient pas dans les sols, les nappes ou les cours d'eau. Résultat : « Si l'on regarde uniquement les volumes d'eau consommés, c'est-à-dire l'eau qui ne retourne pas dans les écosystèmes, les proportions changent, précise Stéphane Ghiotti. Sur les 4,1 milliards de mètres cubes consommés en France annuellement, 57 % sont en effet de l'eau agricole, utilisée pour l'irrigation – une pratique en plein essor depuis les années 1980 et l'expansion de la culture du maïs sur le territoire français, sur des sols et/ou dans des régions pas toujours adaptés à cette plante. Le reste se partage entre l'eau potable (26 %), le refroidissement des centrales nucléaires (12 %) et l'industrie (5 %). »

Raisonnement sur des bilans globaux et entrer dans une bataille d'interprétation des chiffres trouve rapidement ses limites, pour l'écologue Gilles Pinay. D'autant que les contextes sont extrêmement variables d'une région de France à l'autre. Une chose est sûre : « Quand on voit les niveaux des nappes phréatiques baisser et de plus en plus de cours d'eau asséchés



En France, 50 % de l'eau prélevée sert à refroidir les centrales nucléaires et thermiques.

l'été, il est clair que nos pratiques ont un impact et qu'il faut les revoir », assène le scientifique. Les revoir, mais comment ? Et en priorisant quels usages ? En d'autres termes : à qui appartient l'eau, dans notre pays ?

L'eau, bien commun

« En France, le principe, c'est que l'eau est la chose commune. Une chose qui n'appartient à personne et dont l'usage est commun à tous. Cette approche patrimoniale, inscrite dans le Code civil, empêche l'appropriation de la ressource, précise Nathalie Hervé-Fournereau. Seules exceptions : l'eau de pluie et les sources situées sur des propriétés privées. » Depuis la loi sur l'eau de 1964, l'eau est gérée à l'échelle des grands bassins hydrographiques – Adour-Garonne, Seine-Normandie, Rhin-Meuse... – par des établissements publics (les agences de l'eau) réunissant l'ensemble des acteurs : élus locaux, industriels, agriculteurs, associations d'usagers. « Ces agences que d'aucuns à une époque ont appelé les "parlements de l'eau" sont censées assurer un partage équitable de la ressource en eau et hiérarchiser ses usages », explique la juriste.

Dans le cas des mégabassines en projet en Poitou-Charentes, dont le financement est assuré à 80 % par de l'argent public, l'agence de l'eau Loire-Bretagne a d'ailleurs demandé un moratoire sur l'édification de ces ouvrages destinés à l'usage d'un petit nombre d'agriculteurs – un avis à

Précieuse eau douce !

3%

de l'eau présente sur Terre est de l'eau douce

70%

de cette eau est immobilisée dans les calottes glaciaires

29%

est stockée dans les nappes souterraines

1%

seulement se trouve dans les eaux de surface (rivières et lacs)



© CLAUDE BOTER / HANIS LUCAS / HANIS LUCAS VIA AFP

Bretagne, en lutte contre les pollutions diffuses issues du secteur agro-alimentaire, nitrates en tête. « *La question de l'eau est d'ordre politique et social, et doit être démocratiquement envisagée*, considère Stéphane Ghiotti. *Les solutions techniques évoquées pour pallier la raréfaction de la ressource, telles que les bassines mais aussi le dessalement de l'eau de mer ou l'emploi controversé des eaux usées pour l'irrigation⁷, ne peuvent être que des solutions ponctuelles et ne nous dispenseront pas d'un nécessaire débat démocratique.* »

Au-delà des seuls usages humains, la raréfaction de la ressource en eau demande à réfléchir d'urgence au partage équitable de celle-ci avec les non-humains. « *Les écosystèmes dépendent directement de l'eau des sols, des nappes et des rivières*, rappelle Nathalie Hervé-Fournereau. *Il est intéressant de noter que ce sont d'ailleurs leurs besoins que la directive-cadre sur l'eau cite en priorité, avant l'eau potable ou les besoins agricoles.* » La juriste invite à s'inspirer des exemples internationaux pour faire évoluer le droit à l'eau « *vers un cadre moins anthropocentré et individualiste* » : en Amérique latine et en Nouvelle-Zélande, certains fleuves se sont vu attribuer une personnalité juridique, tandis qu'en Espagne, avec la Loi Mar Menor de 2022, c'est désormais une lagune d'eau salée qui bénéficie de cette protection. L'eau, un bien commun aux humains comme aux non-humains. II

© EMILIO RAPPOLD / DPA / DPA PICTURE-ALLIANCE VIA AFP

“Les solutions techniques évoquées pour pallier la raréfaction de la ressource ne nous dispenseront pas d'un débat démocratique sur les usages.”

l'époque outrepassé par les préfets des départements concernés, dont certaines des autorisations font aujourd'hui l'objet de recours devant la justice administrative française⁶. Les instances européennes se retrouvent aussi régulièrement sollicitées sur la question de l'eau. « *De nombreuses associations environnementales portent les litiges devant les institutions européennes en s'appuyant sur les directives comme la directive-cadre sur l'eau (DCE), un cadre juridique majeur mis en place au niveau européen au début des années 2000 pour restaurer le bon état écologique des masses d'eau* », précise Nathalie Hervé-Fournereau. C'est le cas de l'association Eaux et rivières de



La lagune de Mar Menor, en Espagne, s'est vu attribuer une personnalité juridique pour être mieux protégée.

6. Le tribunal administratif de Poitiers a annulé mardi 3 octobre 2023 deux projets de mégabassines représentant quinze ouvrages au total. Des projets « surdimensionnés », qui ne tiennent « pas compte des effets prévisibles du changement climatique », selon la juridiction. 7. Parmi les réserves à l'égard de l'utilisation des eaux « grises » pour l'irrigation, leur forte concentration en polluants. Bien que traitées, les eaux usées comportent encore de nombreuses substances chimiques telles que les médicaments et d'autres molécules de synthèse. Des polluants qui jusqu'à présent se diluaient dans les rivières où ils étaient rejetés.

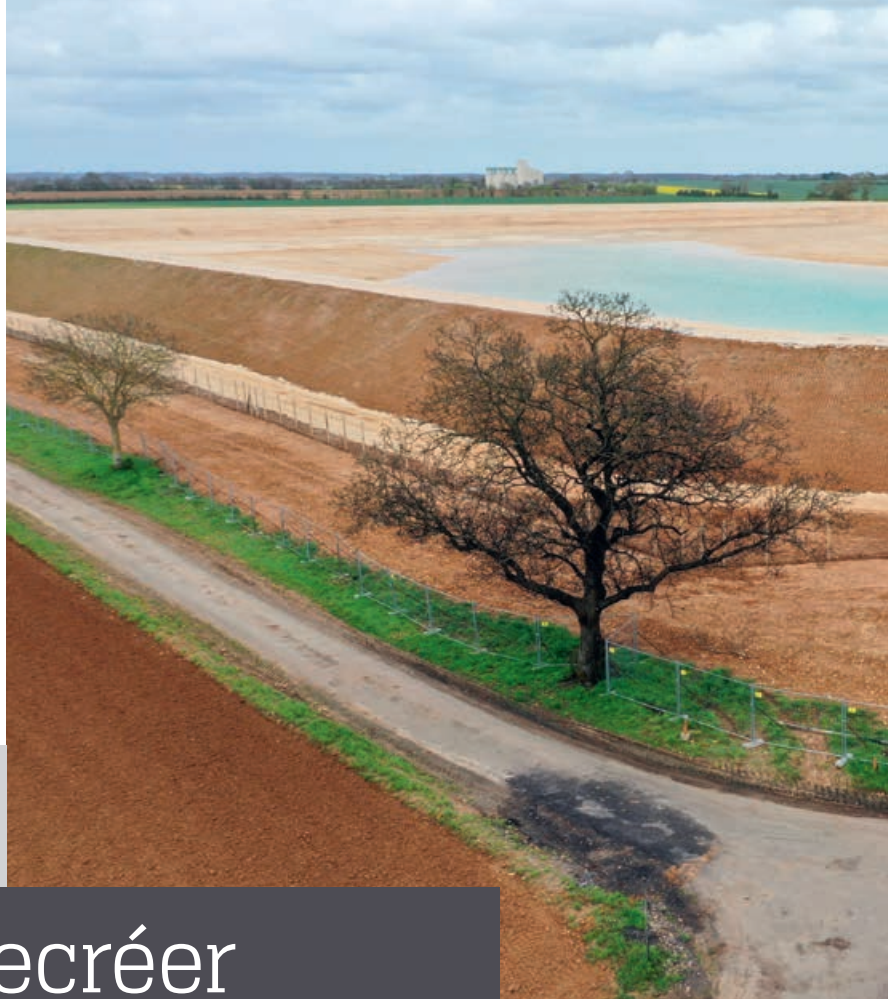
VIVANT 

POINT DE VUE Les mégabassines, dont les premiers déploiements suscitent débats et violences, ne peuvent être la seule réponse au manque d'eau. Pour l'écologue Vincent Bretagnolle, il est urgent de retenir l'eau dans les sols en restaurant les écosystèmes au lieu de précipiter son évacuation vers l'océan.



© MARIE DELAGE

Par Vincent Bretagnolle, écologue, directeur de recherche CNRS au Centre d'études biologiques de Chizé¹



« Il faut recréer des territoires-éponges »

Jusqu'à présent, le paisible village de Mauzé-sur-le-Mignon, aux portes du Marais poitevin, devait avant tout sa célébrité à René Caillié, le premier Européen à être entré dans Tombouctou au début du XIX^e siècle. Quant à Sainte-Soline, à quelque 70 kilomètres de là, une poignée la connaissait quand des millions sont aujourd'hui capables de la situer sur une carte. La présence dans ces communes des deux premières mégabassines construites sur le territoire français, et les affrontements violents qu'elles ont engendrés, les ont projetées dans une notoriété dont elles se seraient sans doute passées.

Le manque d'eau n'est pas une nouveauté dans les Deux-Sèvres. Mais sa consommation a fortement augmenté ces quarante dernières années, avec la mise en place de

l'irrigation des cultures (principalement maïs, mais aussi ray-grass, luzerne, tabac...) par pompage estival direct et débridé dans la nappe phréatique, parfois à plus de 200 mètres de profondeur. Une pratique financée sur fonds publics à la suite de la grande sécheresse qui a frappé la France en 1976.

Le changement climatique en cours et surtout à venir, et le déficit de pluie qu'il occasionne, n'ont fait que dégrader une situation déjà tendue autour de la ressource en eau. En 2022, la pluviométrie de Niort et du Marais poitevin a été déficitaire de 42 % par rapport à la normale. La pluie a manqué notamment au printemps, avec pour conséquence des champs de tournesols qui pour certains n'ont jamais germé et, pour les autres, ont produit des récoltes

divisées par deux. Dans le même temps, les écosystèmes et la biodiversité ont souffert, en silence, loin des relais médiatiques. Des oiseaux sont morts par milliers, les arbres ont perdu leurs feuilles en été. C'est ainsi que la problématique du stress hydrique pour les cultures comme pour les écosystèmes s'est invitée à l'agenda social et politique local, avant de s'imposer à l'échelle du pays, cristallisant le débat autour des mégabassines.

Pomper de l'eau l'hiver, une fausse bonne idée

Imagines il y a déjà plus de dix ans sous le nom de « retenues de substitution », ces vastes retenues d'eau fonctionnent selon un principe simple : pomper l'eau des nappes phréatiques l'hiver, lorsqu'elle y est

1. Unité CNRS/La Rochelle Université. 2. Voir <https://za-plaineetvaldesevre.com> 3. *Réconcilier nature et agriculture. Champs de recherche*, Vincent Bretagnolle et Vincent Tardieu, CNRS Éditions, 2021.



© DAMIEN MEYER / AFP

La mégabassin de Sainte-Soline, dans les Deux-Sèvres, en avril 2023.

« en excès », afin de ne pas y puiser l'été. D'où le terme de substitution : on substitue par un pompage hivernal un pompage jusque-là estival dans ces nappes souterraines. Surélevés – on creuse le sol et on utilise la terre pour construire un talus d'une dizaine de mètres de haut –, et recouverts d'une bâche plastique pour stocker l'eau pompée, ces ouvrages se caractérisent par leur gigantisme et leur usage exclusivement dédié à l'agriculture. La mégabassin de Sainte-Soline a une surface de plus de 15 hectares, et contient l'équivalent en eau de près de 300 piscines olympiques.

Au total, ce sont seize de ces installations démesurées qui devraient émerger dans les prochaines années dans la plaine céréalière du sud des Deux-Sèvres – dont sept sur la Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre², un laboratoire transdisciplinaire à ciel ouvert où je travaille avec d'autres scientifiques et des agriculteurs volontaires à l'agroécologie de demain³. À l'échelle du centre ouest de la France, plus de 150 bassines sont déjà construites (certaines illégalement) ou en projet.

La solution semble marquée du sceau de l'évidence et présente l'avantage de réduire la pression sur les nappes phréatiques l'été, qui provoquait régulièrement l'assèchement complet de centaines de kilomètres de cours d'eau du département. Mais cette « solution de bon sens » est-elle à même de résoudre le problème de l'eau ? L'évidence est malheureusement trompeuse, car si le raisonnement est infaillible, le constat de départ est erroné. La solution des mégabassines ne règle pas les causes profondes du problème auquel nous sommes confrontés, une accélération continue du cycle de l'eau depuis des décennies, et ne peut donc prétendre au rôle de solution unique, ni même prioritaire.

Cours d'eau rectifiés, zones humides asséchées

En effet, plusieurs décennies de politiques publiques en France ont eu pour résultat de précipiter

l'évacuation de l'eau de pluie vers la mer, sans lui laisser le temps d'imprégner les sols, puis les nappes phréatiques. Tout d'abord, on a rectifié les cours d'eau : pour empêcher les inondations, ils ont été canalisés, tandis que leurs méandres étaient endigués et éliminés. Ainsi le débit des rivières a augmenté, empêchant l'eau de stagner, un effet amplifié par le drainage des parcelles agricoles. Ensuite, on a éliminé les prairies inondables des bords de rives. Ces zones humides, qui ont été drainées, permettaient par les crues hivernales de capter pendant des semaines de l'eau de pluie qui remplissait lentement les réserves d'eau souterraines. Puisqu'il n'y avait plus de crues, on a transformé ces prairies en champs de maïs.

Les arbres (bocages, haies, petits bois) ont également été supprimés un peu partout lors des remembrements (*politique agricole de l'après-guerre qui a consisté à créer des parcelles agricoles plus grandes, pour augmenter la productivité, Ndlr*), puis par souci de simplification. Or prairies et arbres contribuaient aussi à retenir l'eau de pluie et à remplir patiemment les nappes phréatiques : sans arbres ni haies, c'est 70 % de l'eau du ciel qui ne s'infiltré plus dans les sols – un chiffre proche de 100 % si le sol est totalement nu. Enfin, la pratique

“ La solution des mégabassines ne règle pas les causes profondes du problème : une accélération continue du cycle de l'eau depuis des décennies, et ne peut donc prétendre au rôle de solution unique. ”

du labour, les engrais et les pesticides ont dégradé les sols des cultures en diminuant leur teneur en matière organique, et donc en humidité. Sans oublier évidemment l'urbanisation et l'imperméabilisation des sols liée aux infrastructures urbaines et routières, entrepôts, centres commerciaux...

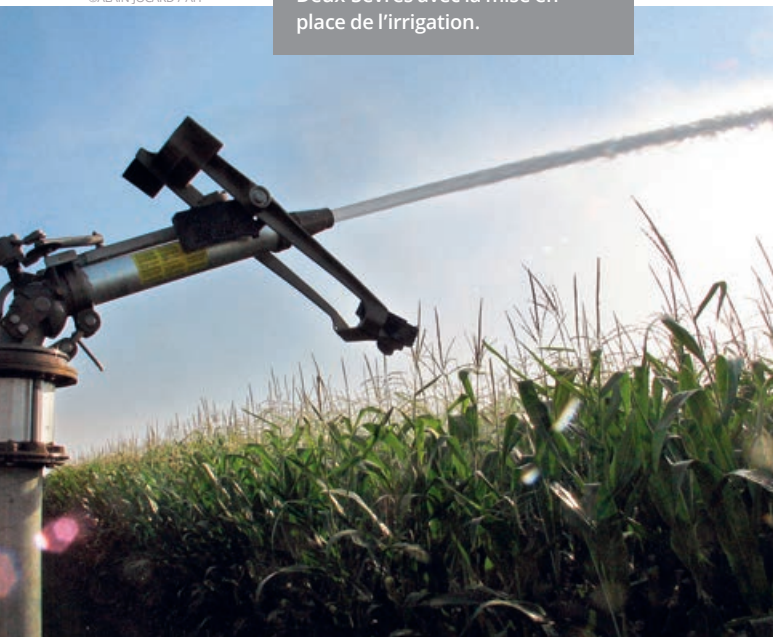
Résultat, nous nous retrouvons aujourd'hui dans une situation de tension insupportable sur ce patrimoine commun qu'est l'eau, dont nous manquons désormais dès le printemps. Le pompage hivernal dans les nappes phréatiques n'y changera rien, d'autant qu'il empêche en réalité le surplus d'eau de diffuser dans les roches calcaires poreuses, qui contribuent elles aussi au stockage hivernal de l'eau.

Ralentir le cycle de l'eau

Les mégabassines peuvent d'autant moins constituer l'unique réponse à la crise de l'eau qu'elles ne vont concerner a priori que 7 % environ des agriculteurs du sud des Deux-Sèvres – pour beaucoup des producteurs de maïs, auxquels l'État financeur accorde le droit de pomper dans ces bassines en échange de pratiques agroécologiques et vertueuses (avec

La consommation d'eau a fortement augmenté ces 40 dernières années dans les Deux-Sèvres avec la mise en place de l'irrigation.

©ALAIN JOCARD / AFP



un résultat pour l'heure fort mitigé, puisque 92 % des 38 exploitants ayant déjà accès aux bassines ne se sont pas engagés dans la réduction de l'utilisation des pesticides). Doit-on laisser sans solution les 93 % des agriculteurs restants ?

gestion de l'eau est une affaire qui se conclut entre les humains et un capital inerte, l'eau. Magnanime, la loi sur l'eau de 2006 impose de laisser quelques gouttes malgré tout aux écosystèmes, aux poissons et aux grenouilles. Quelle erreur de jugement !

“Magnanime, la loi sur l'eau de 2006 impose de laisser quelques gouttes aux écosystèmes, aux poissons et aux grenouilles... Ce sont au contraire les écosystèmes qui sont garants de la ressource en eau.”

Le débat autour des mégabassines ne doit pas masquer le chantier véritablement urgent, qui devrait être engagé dès aujourd'hui à l'échelle du territoire : le ralentissement du cycle de l'eau, afin de conserver celle-ci le plus longtemps possible sur nos territoires. Comment ? Grâce aux écosystèmes, à la biodiversité, et aux solutions fondées sur la nature⁴. En créant un « territoire-éponge », par la plantation d'arbres et de haies dans nos champs et nos campagnes, par le remplacement de certaines

terres cultivées par des prairies, en laissant les cours d'eau lézarder... Et même, pourquoi pas, en permettant aux castors de revenir dans les bassins du Rhône et de la Loire, d'y construire leurs barrages, fort utiles pour retenir l'eau et prévenir les inondations intenses. Ces solutions sont gratuites et efficaces.

Une partie des dirigeants politiques et des agriculteurs considèrent que la

Ce sont les écosystèmes, par leur fonctionnement et la biodiversité qu'ils hébergent, qui sont garants de la ressource en eau, en ralentissant le cycle de l'eau et en la conservant par de multiples adaptations et stratégies, car elle est une ressource essentielle à la vie elle-même. Ainsi, l'eau n'est pas une ressource dont les sociétés humaines disposent et dont une part minime revient aux écosystèmes pour qu'ils subsistent ; l'eau est au contraire un produit des écosystèmes, dont nos sociétés font usage.

La gestion de la ressource en eau est aujourd'hui partagée entre collectivités, usagers (en particulier agriculteurs) et hydrogéologues. Les chances de faire face au stress hydrique, toujours plus intense sous l'effet du changement climatique, semblent bien minces si l'on n'a pas recours aux écosystèmes et aux solutions fondées sur la nature. Il faut donc associer impérativement les écologues à cette gestion. Et que les pouvoirs publics apportent l'impulsion et les financements nécessaires au déploiement de ces solutions fondées sur les écosystèmes, au-delà des seules mégabassines. ||

4. La mise en œuvre du concept des solutions fondées sur la nature à l'échelle des territoires fait l'objet du PEPR « SOLUBIOD » porté par le CNRS et Inrae. La Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre fait partie des sites lauréats.



Tombe de Sennedjem (Égypte, 1295-1213 avant notre ère). Fac-similé.

L'hydraulique, une histoire vieille de 9000 ans

SOCIÉTÉS



ENTRETIEN Captage et stockage de l'eau sont intimement liés au développement des sociétés humaines. Géoarchéologue, Louise Purdue retrace l'histoire des techniques hydrauliques, du simple puits jusqu'aux réseaux complexes de canaux et galeries.

PROPOS RECUEILLIS PAR LÉA DESPORTES

Vous travaillez sur l'histoire des paysages cultivés au cours des cinq derniers millénaires. Vous vous intéressez plus particulièrement à la gestion de l'eau et des sols, en milieu aride et semi-aride. Depuis quand et de quelle manière les sociétés anciennes maîtrisent-elles la ressource hydraulique ?

Louise Purdue¹. Les sociétés humaines ont exploité de différentes manières la ressource en eau, en s'adaptant à des contraintes géographiques et temporelles. Les méthodes de l'archéologie, de la géographie ou de l'histoire ont mis au jour une grande diversité d'aménagements qui

avaient pour vocation de capter l'eau, de la retenir ou de l'acheminer. Les premières traces de captage sont attestées dès le Néolithique, de 9 000 à 6 000 ans avant notre ère, au Proche-Orient. Dans des espaces à apport d'eau non pérenne, sur les plateaux et dans les montagnes notamment, des aménagements simples de captage des eaux souterraines ont été rapidement complétés par le creusement de puits lorsque la nappe était trop profonde, souvent à l'échelle du foyer. Certaines de ces formes traditionnelles sont toujours utilisées aujourd'hui dans les pays où j'effectue une partie de mes recherches, aux

¹. Chargée de recherche CNRS au laboratoire Cultures et environnements. Préhistoire, Antiquité, Moyen Âge (Cepam, unité CNRS/Université Côte d'Azur). Elle est lauréate de la médaille de bronze du CNRS 2020 et du Prix A3 du rayonnement scientifique du CNRS 2022.

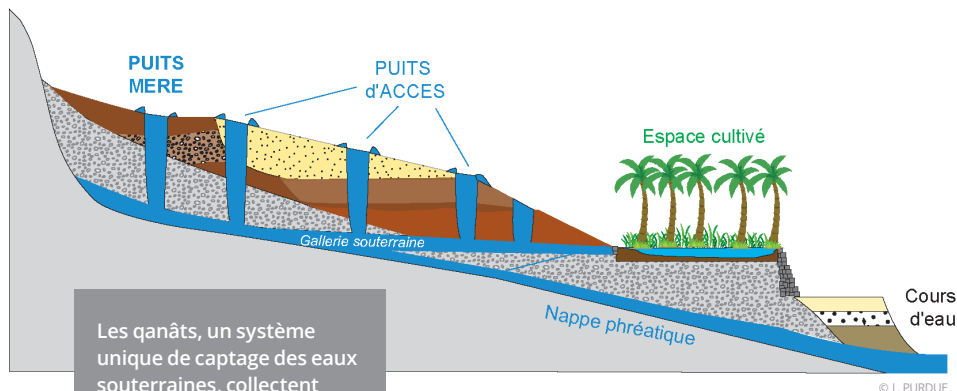
Émirats arabes unis, en Oman ou en Arabie saoudite.

Et dans les vallées, le long des fleuves, où beaucoup de sociétés humaines ont vu le jour ?

L. P. Dans les vallées alluviales à apport d'eau pérenne, comme les rives du Nil ou de l'Euphrate, le captage des eaux de surface ou des sources a sans aucun doute contribué au développement des sociétés. L'eau y a tout d'abord été puisée de façon rudimentaire, avec des seaux ou des outres, puis à l'aide de balanciers à partir du III^e millénaire avant notre ère pour irriguer de faibles superficies à proximité des cours d'eau. Progressivement, et en parallèle à une forte augmentation démographique, ces premières sociétés ont construit des systèmes hydrauliques complexes et à plus grande échelle.

Comment expliquer ce changement d'échelle, des systèmes de captage individuels à des structures hydrauliques bien plus vastes ?

L. P. Au phénomène d'augmentation démographique, synonyme de besoins plus importants, vient s'ajouter l'aridification marquée de l'Holocène moyen qui débute au IV^e millénaire. Ce changement climatique, probablement marqué dans les milieux arides par une diminution de la ressource en eau, a vu le développement de techniques hydrauliques



Les qanâts, un système unique de captage des eaux souterraines, collectent l'eau des nappes phréatiques et la transportent par gravité.

(canaux, réservoirs, citernes, barrages) à vocation agricole, domestique ou encore métallurgique. Plus tardivement, autour du I^{er} millénaire avant notre ère (âge du fer), ces systèmes se sont perfectionnés et étendus. Citons les qanâts, ensembles de galeries souterraines qui collectent l'eau des nappes phréatiques et la transportent par gravité. Apparus en Iran ou en Arabie du sud-est, les qanâts se sont diffusés dans le monde entier à la faveur des conquêtes territoriales et des échanges commerciaux : par l'intermédiaire des Romains en Afrique du Nord et en Méditerranée occidentale, des colons européens en Amérique du Sud et jusqu'en Chine en suivant la Route de la soie.

Concurrencées par cet apport d'eau plus important et plus stable, d'autres techniques, comme la canalisation des eaux de ruissellement, semblent abandonnées par endroit. Cette évolution technique s'accompagne également d'une spécialisation agricole à l'origine de cultures non plus vivrières mais de rente comme celle des palmiers dattiers, très gourmands en eau. Construire et entretenir ces réseaux, qui s'étendaient parfois sur plusieurs dizaines de kilomètres, nécessitait une main-d'œuvre et une collaboration très importantes.

Une nouvelle organisation sociale est donc nécessaire pour gérer la ressource en eau ?

L. P. Pour créer ces systèmes hydrauliques à grande échelle, il a fallu évaluer la disponibilité de la

ressource, la capter, l'acheminer, gérer la maintenance des infrastructures, le tout en prenant en compte les capacités techniques et les évolutions démographiques. D'une ressource, l'eau s'est transformée en un bien commun partagé qui nécessitait un véritable savoir hydraulique.

Il est communément admis que le développement de la « grande hydraulique », au Proche et au Moyen-Orient (Assyrie, Mésopotamie, Égypte), en Asie (Indus, Chine) ou encore en Amérique centrale et du Sud (Mayas, Incas) est étroitement connecté à une stabilité socio-économique et politique des sociétés. Et, à son tour, le progrès hydraulique a favorisé l'expansion urbaine, la mise en place des réseaux de commerce et d'échange et la stabilité politique. C'est le cas par exemple des oasis, espaces artificiels entièrement façonnés par l'homme autour des ressources hydriques et édaphiques (du sol). Apparues notamment en Arabie autour du III^e millénaire avant notre ère, elles sont devenues de véritables nœuds névralgiques en plein désert.

Que reste-t-il de la « grande hydraulique » déployée au cours des derniers millénaires ?

L. P. La spécialisation des sociétés anciennes, en termes de production et de techniques, à laquelle s'ajoute souvent une pression démographique, ont indirectement augmenté leur vulnérabilité aux changements environnementaux. Des contraintes non anticipables, comme certains épisodes de sécheresses ou de crues répétées, ont eu un impact sur les ressources disponibles. Dans des cas extrêmes, ces événements ont

“ Combinée à une forte augmentation démographique, l'aridification a conduit les premières sociétés à construire des systèmes hydrauliques complexes et à plus grande échelle. ”

poussé les populations à migrer. La diminution de la main-d'œuvre qui s'en est suivie a inexorablement conduit au déclin des systèmes hydrauliques. C'est ainsi que les paysages se ponctuent de vestiges abandonnés au fil du temps. De la grande digue de Ma'rib au Yémen (15 mètres de haut sur 600 mètres de long), détruite par des crues torrentielles et répétées au VI^e siècle avant notre ère, il ne reste par exemple que des ruines.

Toutefois, certaines techniques n'ont pas été totalement perdues. Pour reprendre l'exemple des qanâts, quelques-uns restent aujourd'hui fonctionnels, en Iran ou en Chine notamment. Mais la diminution de la ressource en eau met en péril ces infrastructures. En effet, au-delà des contraintes climatiques actuelles, le développement des pompes électriques destinées au captage des eaux souterraines à des fins agricoles a fortement contribué à la diminution du niveau des nappes depuis 70-80 ans. En milieu aride, si cette innovation technologique a initialement favorisé l'accroissement des zones agricoles, elle s'est installée au

détriment d'une bonne gestion et préservation de la ressource en eau. Dans ces espaces, le niveau largement diminué des nappes phréatiques, aujourd'hui très en profondeur, rend impossible le retour à des techniques de captage des eaux souterraines de type qanâts.

Existe-t-il d'autres techniques anciennes plus raisonnées d'exploitation de la ressource en eau dont nous pourrions nous inspirer aujourd'hui ?

L. P. Actuellement, l'un des principaux objectifs est de préserver la ressource en eau. À cet effet, différentes techniques, découvertes à la fois au cours de fouilles archéologiques ou mentionnées dans les sources écrites, pourraient être réhabilitées. Elles concernent notamment le captage des eaux de surface : construction de terrasses agricoles qui captent directement les eaux de pluies, mise en place de systèmes de collecte des eaux de ruissellement issues des versants dans des citernes ou directement dans des parcelles

agricoles, dérivation directe des eaux de crues des cours d'eau ou encore réduction du labour pour limiter le ruissellement et l'érosion des sols...

Dans les années 1980, on estimait déjà que le captage des eaux de pluie pouvait permettre une augmentation de la superficie agricole entre 3 et 5 % en milieu désertique. Au-delà d'une meilleure économie de l'eau, il est aujourd'hui clairement admis que ces techniques sont les plus appropriées pour augmenter la productivité des sols, préserver la ressource en eau en milieu semi-aride et aride et pratiquer une « irrigation résiliente ».

Elles ont par exemple favorisé le « verdissement du désert » du Negev de l'époque nabatéenne à la période byzantine. Après un abandon de près de 1 000 ans, la réhabilitation et la réutilisation de certains de ces systèmes depuis une cinquantaine d'années, notamment dans le Wadi Mashash, sont à l'origine du développement d'agroécosystèmes durables dédiés à la production alimentaire, de fourrage et de bois.

Un exemple à reproduire donc ?

L. P. À ce jour, ce type d'exemple de réhabilitation n'est pas légion. Car malgré leur efficacité et le travail effectué en amont pour comprendre leur fonctionnement, malgré l'implication d'associations ou d'équipes de recherche pour les préserver et les réhabiliter, cette démarche nécessite avant tout un investissement local. Quand cela est nécessaire, il nous faut donc transmettre nos savoirs aux populations locales, les sensibiliser à la question écologique, à la mémoire des pratiques, aux notions de risques et d'aléas et à l'importance de sauvegarder les réseaux et les systèmes hydrauliques. Intégrer le temps long dans la réflexion est un travail... de long terme. **II**

© C. J. ROBIN/ INSTITUT DE FRANCE / ARCHEOLOGIE.CULTURE.GOUV.FR



Ruines de la digue de Ma'rib au Yémen détruite par des crues torrentielles au VI^e siècle avant notre ère.

Le grand hamster d'Alsace en sursis

VIVANT



SOCIÉTÉS



En danger critique d'extinction depuis 2020, le grand hamster a vu les trois quarts de sa population mondiale disparaître en 50 ans. En cause, la monoculture intensive de céréales, la pression urbaine, ou encore l'installation de grands axes routiers infranchissables. En Alsace, seule région française où l'on peut le rencontrer, chercheurs, associations et agriculteurs se mobilisent pour sa sauvegarde. Parmi eux, les scientifiques de l'Institut pluridisciplinaire Hubert-Curien (IPHC)¹, à Strasbourg. Reportage.

TEXTES PAR LA RÉDACTION • PHOTOS NICOLAS BUSSEY/IPHC/CNRS IMAGES

1. Unité CNRS/Université de Strasbourg.



1. Éradiqué comme nuisible au début du XX^e siècle, protégé à partir de 1993, le grand hamster est en sursis. En cause, les monocultures trop étendues, mais aussi la pression urbaine et l'installation de grands axes routiers infranchissables.



2. Vous le sentez ce petit air de liberté ? Ce grand hamster (en latin, *Cricetus cricetus*) ne s'y trompe pas ! Il sera bientôt libéré dans un champ où poussent des cultures favorables à son habitat et à son régime alimentaire. C'est le département d'écologie, physiologie et éthologie de l'IPHC qui prend grand soin des hamsters.



3. C'est la nuit que le dispositif expérimental imaginé par les scientifiques s'anime, à Ittenheim (Bas-Rhin). Dans cet enclos de plus d'un hectare sont testées différentes combinaisons de cultures, et leurs impacts sur la reproduction du grand hamster sont analysés. L'enclos est un milieu semi-naturel contrôlé, protégé des prédateurs et des pesticides. Sa construction fait partie des mesures compensatoires imposées à Vinci, concessionnaire du « grand contournement ouest » de Strasbourg, une autoroute qui traverse une zone de protection stricte.



4. Chaque semaine en été, juste avant la tombée de la nuit – car le rongeur est nocturne –, des cages de capture sont dispersées autour des entrées de terriers (repérées par un piquet orange) dans les quatre parcelles qui composent l'enclos. L'objectif est de compter les hamsters et de contrôler leur état de santé. Pour suivre l'activité en continu, l'IPHC utilise une antenne de lecture de puce (anneau blanc) et un piège photo (boîte grise rectangulaire).

5. Attrapé grâce aux légumes friandises, chaque hamster est identifié – via sa puce –, pesé et mesuré. Les scientifiques relèvent son état général et le numéro de son terrier, avant de le relâcher dans sa parcelle. Ils évaluent ainsi la bonne santé des individus et leur taux de reproduction.



6. Autre action complémentaire, le renfort des effectifs de grands hamsters en Alsace. Oui, il est le seul hamster à vivre à l'état sauvage ! Avant le lâcher, scientifiques et volontaires, armés d'instruments bruyants, effarouchent les prédateurs du rongeur, principalement buses et renards.



7. Les hamsters sont transportés chacun dans une boîte, car l'animal est solitaire et plutôt agressif envers ses congénères. Le principe est de les lâcher, ici à Geispolsheim (Bas-Rhin), dans un champ où un agriculteur cultive des plantes sélectionnées pour répondre aux besoins des hamsters (nutrition et habitat).



8. Un pré-terrier est creusé pour que le hamster ne soit pas exposé aux prédateurs alors qu'il est perturbé par le voyage. Avec beaucoup de délicatesse, la cage de transport est disposée verticalement au-dessus du trou, puis la trappe est retirée pour que le hamster se glisse dans le trou sans heurt.

9. Le pré-terrier, profond de 1 mètre environ, abrite un peu de nourriture. Un « bouchon » de foin sera vite ajouté pour que le hamster reste caché jusqu'à la nuit tombée et en sorte aisément. Les plantes cultivées dans le champ lui assureront l'énergie et les réserves indispensables pour passer la période d'hibernation (octobre-avril).



Supraconductivité, la température monte



Lévitacion d'un aimant placé au-dessus d'une pastille de matériau supraconducteur refroidi dans de l'azote liquide à - 196 °C.

© JULIEN BOBROFF/CNRS IMAGES

MATIÈRE

PHYSIQUE La supraconductivité, ce sont des matériaux capables de conduire le courant électrique sans aucune résistance. Un phénomène quantique encore mystérieux et jusqu'ici cantonné aux très basses températures, mais tout cela pourrait changer prochainement.

PAR JULIEN BOURDET

Imaginez un monde dans lequel le courant circulerait sans perte dans les lignes à haute tension, où nos appareils électriques et électroniques ne consommeraient que très peu d'énergie et où nous voyagerions à très grande vitesse dans des trains lévitant au-dessus des rails, à l'abri des frottements. Cette alléchante perspective pourrait bien un jour devenir réalité grâce à la supraconductivité. Ce phénomène physique découvert il y a plus d'un siècle se manifeste dans certains matériaux par la disparition de toute résistance électrique – et donc de toute perte d'énergie. Cette propriété unique a déjà permis le développement d'applications majeures, comme l'imagerie par résonance magnétique (IRM) dans les hôpitaux ou encore les accélérateurs de particules pour la recherche en physique. Malheureusement, pour acquérir cette propriété extraordinaire, la plupart des matériaux supraconducteurs mis au point jusqu'ici doivent être refroidis à des températures extrêmes, proches du zéro absolu (- 273,15 °C), en faisant appel à des systèmes de réfrigération chers et encombrants. Cela a limité jusqu'à aujourd'hui leur utilisation à quelques applications de niche.

Mais les chercheurs n'ont pas dit leur dernier mot : dans les laboratoires du monde entier, ils tentent d'élucider les mécanismes à l'origine de la supraconductivité, et conçoivent et étudient de près de nouveaux matériaux prometteurs. Avec en ligne de mire la découverte de supraconducteurs à température ambiante, qui ne nécessiteraient donc plus aucune réfrigération. La supraconductivité pourrait alors enfin révolutionner notre quotidien.

Du phénomène étrange observé...


C'est en 1911 que cet état de la matière est mis en évidence. En refroidissant du mercure à - 269 °C grâce à de l'hélium liquide, le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes découvre alors que la résistance électrique du métal devient nulle. Une caractéristique surprenante puisque dans les conditions normales, même les fils électriques les plus conducteurs qui soient perdent une partie de leur énergie sous forme de chaleur. Par la suite, de nombreux autres

métaux (plomb, étain ou aluminium) et alliages métalliques supraconducteurs sont découverts – toujours à des températures frôlant le zéro absolu. Il faudra attendre la fin des années 1950, plus précisément 1957, pour que le phénomène soit enfin expliqué par trois physiciens américains qui proposèrent la théorie BCS, initiales de leurs noms respectifs : John Bardeen, Leon Neil Cooper et John Robert Schrieffer.

La supraconductivité trouve en fait son origine dans le comportement des électrons qui composent les atomes et, pour la comprendre, il faut avoir recours à la physique quantique qui décrit la matière à cette échelle. *« Il s'agit même d'une des rares manifestations à l'échelle macroscopique d'un effet de physique quantique »*, souligne Cyril Proust¹ du Laboratoire national des champs magnétiques intenses du CNRS. Explication : à mesure que la température baisse dans le matériau, les mouvements des atomes se réduisent jusqu'à générer des vibrations particulières de la structure cristalline qui poussent les électrons à s'associer d'abord par paires, puis tous ensemble pour former une onde collective qui occupe tout le matériau.

... aux premiers succès

Plus rien ne perturbe alors le mouvement des électrons, d'où la disparition de la résistance électrique. Mais le phénomène s'évanouit à nouveau au-dessus d'une certaine



Cryostat du laboratoire du physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes, découvreur de la supraconductivité en 1911.

1. Actuellement détaché au laboratoire international Frontières Quantiques (CNRS/Université de Sherbrooke).

“La supraconductivité est l'une des rares manifestations à l'échelle macroscopique d'un effet de physique quantique.”

température qualifiée de « critique », l'agitation thermique détruisant ce fragile équilibre. En plus de la disparition de la résistance électrique, les recherches révèlent au fil des ans une autre propriété étonnante : un supraconducteur expulse tout champ magnétique qu'on veut lui imposer. C'est l'effet Meissner, du nom de son découvreur. Grâce à ses deux propriétés remarquables, la supraconductivité ne tarde pas à trouver des applications. Il suffit en effet d'injecter du courant de forte intensité dans une bobine de fil supraconducteur pour qu'il génère un champ magnétique tout aussi important, sans risque de surchauffe. Ou encore qu'un aimant soit placé au-dessus d'un supraconducteur pour littéralement léviter.

Ces champs magnétiques intenses sont, entre autres, indispensables au fonctionnement des appareils d'IRM qui analysent les tissus des patients, de la spectroscopie par résonance magnétique utilisée par les scientifiques pour dévoiler la structure moléculaire d'un échantillon, des réacteurs expérimentaux de fusion nucléaire, comme Iter, actuellement en construction en France, et des accélérateurs de particules dans lesquels d'immenses aimants supraconducteurs dévient et focalisent les faisceaux de particules.

À ce titre, si le LHC du Cern, à Genève, utilisait des aimants conventionnels en cuivre, il ne mesurerait pas 27 kilomètres de circonférence mais 100, et il consommerait près de 25 fois plus d'énergie ! Autrement dit, il n'aurait pas pu voir le jour. Malgré ces premiers beaux succès, les scientifiques gardent les pieds sur terre. D'après la théorie BCS qui identifie clairement le mécanisme en jeu, ils savent en effet que pour devenir supraconducteur, un métal doit forcément être refroidi à très basse température. Très peu imaginent donc pouvoir mettre au jour une supraconductivité à une température plus élevée. Et encore moins à température ambiante !

Une découverte inopinée

Jusqu'à ce qu'une découverte vienne complètement changer la donne. En 1986, on identifie en effet de manière inattendue les premiers supraconducteurs dits « haute température critique » – comprenez à des températures plus élevées que celles observées jusque-là. Ces matériaux de synthèse sont des cuprates, des composés à base d'oxyde de cuivre. Et le



© LI ZHENG/XINHUA/VIA AIP

record de température de passage à la phase supraconductrice détenu par un cuprate (à base de mercure) est aujourd'hui de - 135 °C. Une température certes encore froide mais beaucoup plus facilement accessible grâce à l'azote liquide cette fois. Avec cette découverte, la communauté scientifique reprend espoir. Et si finalement la supraconductivité pouvait exister à température ambiante ?

Les chercheurs se mettent alors en quête de décrypter ce nouveau type de supraconductivité exhibée par les cuprates, l'idée étant ensuite de pouvoir l'améliorer et, pourquoi pas, de trouver des supraconducteurs à température ambiante. « *Les expériences ont montré assez vite qu'on avait affaire à une supraconductivité non conventionnelle : comme dans les métaux, c'est l'appariement des électrons qui conduit à l'apparition du phénomène mais contrairement à ce qui est décrit dans la théorie BCS, ce ne sont pas les vibrations des atomes qui constituent la colle entre les électrons* », explique Cyril Proust. Percer la nature de cette mystérieuse colle devient alors l'objectif numéro un, la question constituant même l'un des principaux sujets de recherche en physique de la matière condensée.

Le mystère des cuprates

Et pour avancer, théoriciens et expérimentateurs travaillent main dans la main, améliorant considérablement les techniques de mesure des matériaux et inventant de nouveaux concepts théoriques et de nouvelles approches numériques

2. Unité CNRS/ENSICAEN/Université de Caen Normandie.



Train à grande vitesse à lévitation magnétique mis en service dans la ville de Qingdao (Chine) en 2021. L'effet Meissner (expulsion de tout champ magnétique), au cœur même du fonctionnement de ce train, lui permet des pointes à 600 km/h.

pour les décrire. En trente ans, cette recherche a permis bon nombre d'avancées dans le domaine de la supraconductivité, et plus largement en physique. *« Mais force est de reconnaître que le mystère de la supraconductivité à haute température critique n'a toujours pas été résolu. Plusieurs explications sur son origine ont bien été avancées mais aucune ne fait aujourd'hui consensus »*, admet Alain Pautrat, du laboratoire de Cristallographie et sciences des matériaux². Si cette question reste encore ouverte, c'est parce que les cuprates sont des matériaux déroutants, à la physique complexe,

“ Force est de reconnaître que le mystère de la supraconductivité à haute température critique n'a toujours pas été résolu. Plusieurs explications sur son origine ont bien été avancées mais aucune ne fait aujourd'hui consensus. ”

même lorsqu'ils ne sont pas supraconducteurs. Initialement, un cuprate est un matériau totalement isolant. C'est en lui ajoutant ou en lui retirant des électrons par une modification chimique appelée « dopage » qu'il se transforme en un conducteur d'électricité puis en supraconducteur à plus basse température.

Effet de groupe

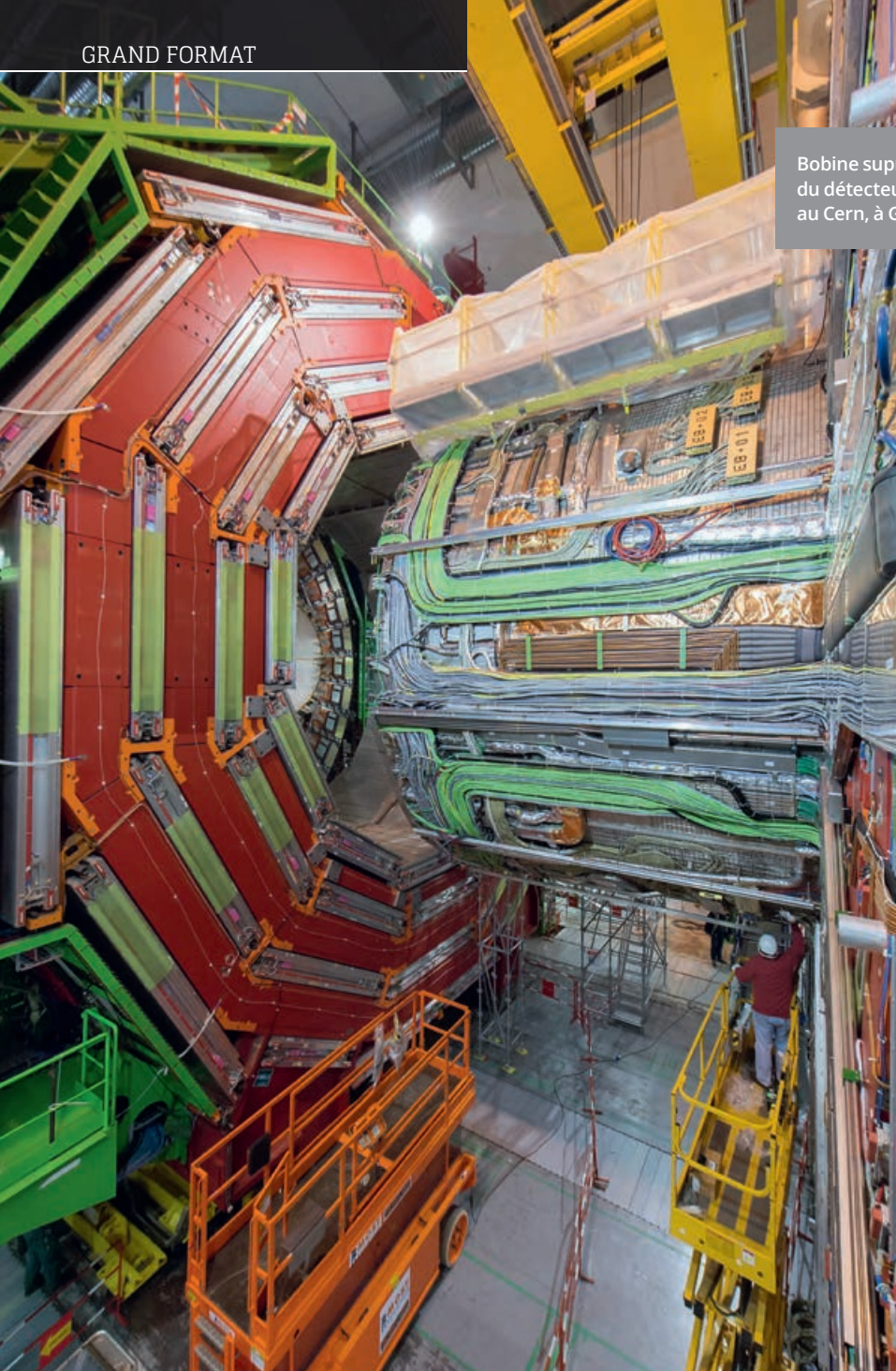
Contrairement à un métal où les électrons peuvent être considérés comme indépendants, dans un cuprate les électrons sont dits « fortement corrélés » : ils se gênent, se bloquent et ne se déplacent que collectivement, une situation qui rend leur description extrêmement difficile et qui fait que leur comportement nous échappe. Et pour venir compliquer encore plus les choses, les chercheurs savent aussi qu'à l'état isolant, un cuprate est un matériau magnétique. Si bien qu'aujourd'hui, deux scénarios dominent pour expliquer la supraconductivité de ces oxydes de cuivre.

Pour certains, ce serait ce même magnétisme – ou plutôt de petites fluctuations magnétiques qui resteraient à l'état de trace près de la température critique – qui fournirait la « colle » aux paires d'électrons. *« De nombreuses observations le suggèrent fortement, même si aucune preuve directe n'a encore été apportée »*, confie Cyril Proust, partisan de cette théorie. D'autres mettent en avant le fait que, sous l'effet de ces fortes corrélations, les électrons s'organisent sous différentes configurations ou ordres tous plus exotiques les uns que les autres. Ces différentes configurations pourraient entrer en compétition, avec pour conséquence l'apparition de la supraconductivité. *« Les expériences ont permis de bien caractériser ces ordres électroniques, mais leur diversité fait qu'il est encore difficile d'établir un lien de cause à effet avec la supraconductivité »*, reconnaît Alain Pautrat.

Un défi expérimental

Les chercheurs sont donc toujours dans l'attente de l'expérience ultime qui viendra trancher le débat. De son côté, Cyril Proust compte bien apporter sa pierre à l'édifice, lui qui a déjà permis de faire progresser le domaine. Depuis 2003, il soumet des échantillons de cuprates à des impulsions magnétiques très intenses, capables de supprimer leur supraconductivité. *« Ce faisant, nous dévoilons les propriétés que le matériau aurait sans l'établissement d'une phase supraconductrice. Ainsi, nous avons pu mettre en évidence tous ces ordres électroniques en compétition »*, explique le chercheur.

Et pour aller plus loin encore, Cyril Proust et son équipe préparent leur prochaine expérience : il s'agira cette fois d'exposer des cuprates à des champs magnétiques encore jamais atteints, de 200 teslas (soit 2 000 fois plus puissants que l'aimant collé sur votre frigo), seule manière de détruire



Bobine supraconductrice du détecteur CMS du LHC au Cern, à Genève.

© CYRIL FRÉSILLON/LHC/CNRS IMAGES

la supraconductivité là où la température critique est à son maximum et où le phénomène est le plus intense. « *Le défi expérimental est de taille mais il constitue une des clés pour résoudre ce mystère* », poursuit-il.

De nouvelles classes de matériaux

L'étude d'autres matériaux supraconducteurs à haute température critique pourrait elle aussi apporter son lot de découvertes. Car même si les cuprates font figure de stars en détenant les records de température, ils ne sont pas les seuls représentants de cette nouvelle classe de supraconducteurs. En 2008, on met ainsi en évidence la supraconductivité des pnictures, des composés à base de fer dont la

température de transition vers la phase supraconductrice est de -217°C . Moins complexes à décrire que leurs cousins à base d'oxyde de cuivre, les pnictures ont révélé que, dans leur cas, c'est probablement le seul magnétisme qui permet aux charges électriques de former des paires. Plus récemment encore, en 2018, ce sont les nickelates, à base d'oxyde de nickel, qui sont venus s'ajouter à la liste, affichant une température critique de l'ordre de -258°C .

Pour ces composés structurellement très proches des cuprates, et dont on soupçonnait qu'ils puissent être supraconducteurs depuis une vingtaine d'années, il semblerait cette fois que le magnétisme ne joue pas de rôle dans l'apparition de la supraconductivité. De quoi donner du grain à moudre aux théoriciens. « *Si l'on veut un jour comprendre la supraconductivité à haute température critique, il est primordial de comparer les différentes familles de matériaux. De cette manière seulement, on pourra acquérir une vision globale du phénomène et identifier les mécanismes les plus importants* », insiste Marie-Aude Méasson, de l'Institut Néel du CNRS.

Hydrures : les nouveaux prodiges

La maîtrise de la supraconductivité à haute température critique annonce une petite révolution pour les réseaux électriques et l'électronique. Mais il ne faut pas s'attendre à un bouleversement majeur tant qu'on ne saura pas se passer de dispositifs de refroidissement. La véritable révolution ne pourra se faire qu'à température ambiante. Heureusement, la supraconductivité n'est pas avare en rebondissement et si les cuprates n'ont toujours pas révélé leurs mystères, c'est désormais vers d'autres matériaux que tous les regards se tournent : les hydrures.

L'intérêt pour ces composés riches en hydrogène a été lancé en 2015 lorsqu'une équipe de chercheurs allemands montre que le sulfure d'hydrogène devient supraconducteur à -70°C , une température bien plus élevée que celle des cuprates. Néanmoins, le revers de la médaille, c'est que ce record s'établit à des pressions infernales : pour obtenir l'état supraconducteur, il faut en effet soumettre l'échantillon à une pression gigantesque de l'ordre de 2 millions de bars, soit 2 millions de fois celle de notre atmosphère ! Pour cela, les physiciens utilisent des cellules à enclumes de diamant – le matériau le plus dur qui soit. La réalisation n'en est pas moins importante : elle vient confirmer pour la première fois une prédiction faite en 1969 à partir de la théorie BCS, qui identifiait l'hydrogène métal-

3. <https://www.nature.com/articles/d41586-023-03398-4>

lique – à très haute pression – comme candidat à une supraconductivité à une température critique très élevée. Et encourage du même coup d'autres groupes à suivre cette voie. Si bien que ces dernières années une dizaine d'hydrures ont été synthétisés.

Buzz médiatiques et rétractations

Jusqu'à cette annonce exceptionnelle en mars dernier dans la revue *Nature* par une équipe américaine d'un composé fait d'hydrogène, de lutécium et d'azote, supraconducteur à 20,5 °C et à une pression de « seulement » 10 000 bars. Avant d'être finalement rétracté en novembre 2023 par *Nature* à la demande de ses auteurs principaux³, ce résultat a ébranlé la communauté scientifique : non seulement la température ambiante était atteinte mais la pression à appliquer aurait été largement plus accessible – ces gammes de pressions étant couramment mises en œuvre dans certains procédés industriels. « *Ces travaux paraissent les plus spectaculaires de ces vingt dernières années. En montrant que la température ambiante est un objectif atteignable, ils avaient le potentiel de relancer totalement le domaine. Mais il faut toujours rester prudent tant qu'un résultat n'a pas été reproduit ni vérifié* », commente Alain Pautrat.

Ainsi, soucieuses de ne pas crier victoire trop tôt, de nombreuses équipes de par le monde se sont immédiatement penchées sur ce nouveau matériau pour tenter de le synthétiser à leur tour et de confirmer le résultat. « *À ce jour, aucun des groupes qui ont reproduit l'expérience n'a observé de phase supraconductrice. C'est d'autant plus troublant que les conditions de pression sont relativement simples à mettre en œuvre* », note Marie-Aude Méasson. Ce qui met en doute la découverte. D'autant que des critiques se sont élevées

dans la communauté scientifique pour pointer du doigt des erreurs et des manques dans la publication. En particulier, la structure cristallographique du composé qui définit la proportion et l'organisation tridimensionnelle des atomes n'est toujours pas clairement identifiée. À cela s'ajoute le fait que cette même équipe s'était déjà vu retirer par *Nature* un autre article publié en 2020, lui aussi controversé, qui annonçait la découverte d'un premier hydrure supraconducteur à 15 °C. Devant tous ces éléments, certains scientifiques n'hésitent pas à parler de fraude. Le même buzz médiatique et finalement le même genre de critiques ont entaché l'annonce tonitruante cet été de la découverte des propriétés supraconductrices à température et pression ambiantes du matériau LK99 (*voir encadré ci-dessous*).

Des défauts prometteurs

Pour trancher définitivement le débat, certains chercheurs proposent une mesure bien précise. C'est le cas de Jean-François Roch et de son équipe du laboratoire Lumière-

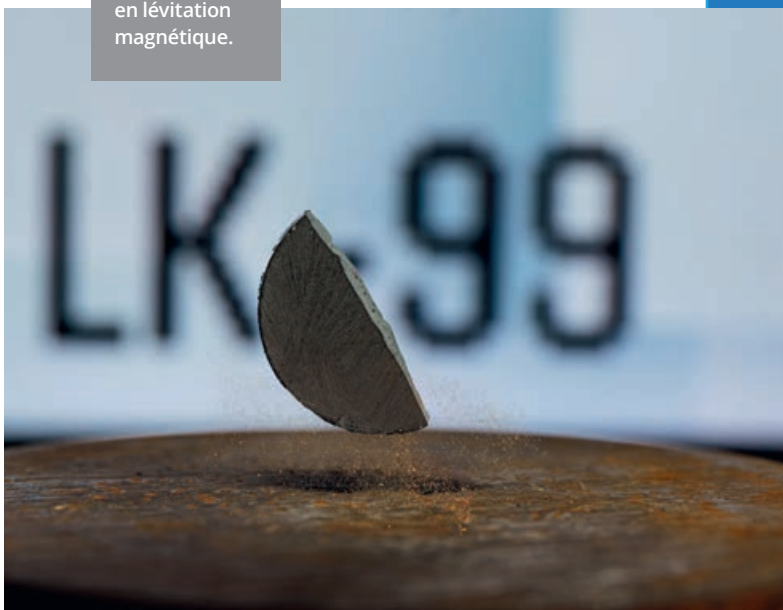
LK99, un candidat éconduit

Après une première annonce en mars dernier dans la revue *Nature* par une équipe américaine d'un matériau à base d'hydrogène, supraconducteur à température ambiante et à une pression de 10 000 bars, c'est au tour d'une équipe coréenne d'annoncer en juillet la mise au point d'un matériau supraconducteur, à température et pression ambiantes cette fois. Ce composé, baptisé LK-99, fait de groupements phosphates, de cuivre et de plomb, qui bat tous les records en matière de température et de pression, est donc potentiellement révolutionnaire. Mais tout comme les travaux des

chercheurs américains, ce résultat doit être pris avec une extrême prudence. Non seulement il n'a toujours pas été publié dans une revue scientifique mais aucune des tentatives d'autres groupes pour le reproduire n'a confirmé une quelconque supraconductivité. « *Les courbes de caractérisations physiques sont peu convaincantes et ne ressemblent pas à celles caractéristiques d'un matériau supraconducteur. Pour moi, ce n'est pas prometteur* », juge ainsi Alain Pautrat, du laboratoire Cristallographie et sciences des matériaux¹. Il ne faut donc pas crier victoire trop vite et il y a même fort à parier que ce résultat ne soit jamais confirmé. En effet, dans ce domaine où les enjeux économiques sont énormes, des annonces de supraconducteurs à température ambiante surviennent régulièrement, avant d'être démenties peu après. Sur la route vers le supraconducteur parfait, bien plus que le buzz, la patience et la véracité scientifique sont de mise. ||

1. Unité CNRS/ENSICAEN/Université de Caen Normandie.

Échantillon du matériau LK99 en lévitation magnétique.





En 2015, des chercheurs allemands ont montré que le sulfure d'hydrogène devenait supraconducteur à -70°C en soumettant le matériaux à d'énormes pressions grâce à des cellules à enclumes de diamants.

© THOMAS HARTMANN

matière aux interfaces⁴. Le physicien exploite les propriétés quantiques des centres NV du diamant, des défauts ponctuels au sein du cristal qui se comportent comme des atomes artificiels et qui sont extrêmement sensibles aux champs magnétiques environnants. « *L'idée est d'implanter ces centres NV sur la pointe des diamants qui composent les enclumes pour pouvoir mesurer l'effet Meissner dans le matériau, preuve directe de sa supraconductivité. Car jusqu'à présent, la mesure des propriétés magnétiques par des capteurs traditionnels s'est révélée extrêmement difficile dans de telles conditions de pression. Seuls les centres NV peuvent fournir une preuve de cet effet sans ambiguïté* », explique Jean-François Roch. Avec son dispositif, il serait ainsi possible de vérifier la supraconductivité du dernier hydrure en date, au centre de toutes les polémiques. Et des autres hydrures également qui font actuellement l'objet d'âpres débats au sein de la communauté scientifique.

Mais au-delà des controverses, ces nouveaux composés représentent aujourd'hui un des meilleurs espoirs pour pouvoir atteindre la supraconductivité à température ambiante. Certes, les pressions dantesques nécessaires à l'apparition de la supraconductivité constituent encore un véritable obstacle à leur utilisation dans la vie de tous les

jours. Mais pour certains, cet obstacle n'est pas insurmontable : de la même façon que le diamant qui, formé dans le manteau terrestre, conserve ses propriétés dans les conditions qui règnent en surface, il faudrait trouver des formes métastables d'hydrures, qui resteraient supraconducteurs quand on relâcherait la pression.

Les physiciens et les chimistes l'ont bien compris, eux qui travaillent main dans la main pour découvrir de nouveaux matériaux supraconducteurs par un savant mélange de théorie, de simulations numériques et en testant sans relâche de nouvelles combinaisons d'éléments. « *En parallèle des efforts théoriques, la recherche en supraconductivité est souvent une affaire d'intuition, d'empirisme scientifique et de chance parfois. Tout comme la découverte des cuprates était inattendue, une surprise est toujours possible dans la quête du supraconducteur ultime* », confie Alain Pautrat. La révolution est en marche. ||

4. Unité CNRS/Université Paris-Saclay/ENS Paris-Saclay/CentraleSupélec.

EN ACTION



Des pigments révèlent tout leur éclat, le vertige livre ses secrets et la sociologie se réinvente.



Les sucres, nouvelle arme contre les infections

VIVANT

Matière

BIOCHIMIE La glycobiologie, l'étude des fonctions biologiques des glucides, est un domaine de recherche à part entière, qui pourrait un jour mener à des traitements inédits contre les infections. **PAR KHEIRA BETTAYEB**

La pandémie de Covid l'a rappelé : développer de nouveaux anti-infectieux pour mieux contrôler les micro-organismes pathogènes demeure un enjeu majeur. Une discipline récente, encore méconnue du grand public, a décidé de relever ce défi en étudiant la biologie des glucides, plus connus sous le nom de « sucres ». « *Baptisée glycobiologie, cette branche de la biochimie pourrait mener à de nombreuses innovations radicalement nouvelles* », prévient Yann Guerardel, directeur de l'Unité de glycobiologie structurale et fonctionnelle¹ (UGSF), à l'université de Lille.

Glucose du sang, amidon de la pomme de terre ou du blé, cellulose des plantes, exopolysaccharides des « biofilms » bactériens, les glucides sont présents dans tous les domaines du vivant : animaux, végétaux, microbes... Ils sont parmi les molécules biologiques les plus abondantes sur Terre. Les biochimistes les classent en deux grands groupes : les glucides simples, dits aussi « oses » ou « monosaccharides », formés d'une seule molécule (ou monomère), comme le glucose ; et les glucides complexes, constitués de plusieurs oses, tels le saccharose ou l'amidon. Appelés également glycanes, c'est spécifiquement à

eux que s'intéresse la glycobiologie. Fait surprenant : malgré l'omniprésence des glycanes dans la nature, l'étude de leurs fonctions biologiques reste bien moins avancée que celle des acides nucléiques (qui forment l'ADN et l'ARN) et des protéines, auxquels s'intéressent respectivement la génomique et la protéomique.

La « matière noire » de la biologie

« *Par analogie avec la situation actuelle en cosmologie, les glycanes peuvent être considérés comme la "matière noire" de l'univers biologique : un composant majeur et critique qui n'a pas encore été pleinement incorporé dans le "modèle standard" de la biologie* », soulignent les chercheurs américains Ajit Varki et Stuart Kornfeld, dans un ouvrage consacré à cette discipline². Résultat : à ce jour en France, seuls trois laboratoires sont entièrement dédiés à la glycobiologie, dont deux sous tutelle du CNRS : l'UGSF de Lille et le Centre de recherches sur les macromolécules végétales (Cermav), à Grenoble. Car en plus de jouer un rôle crucial comme sources d'énergie, les glycanes sont également essentiels pour plusieurs autres grandes fonctions biologiques : bon

► Illustration d'un virus de la grippe. On peut voir les glycanes (en vert) des glycoprotéines spikes (en orange), qui lui permettent de se fixer à la paroi des cellules des voies respiratoires et de les envahir.

repliement des protéines, reconnaissance immunitaire ou communication intercellulaire. Ils sont également impliqués dans plusieurs processus pathologiques, notamment la capacité qu'ont les micro-organismes pathogènes à adhérer aux tissus, que les glycanes peuvent empêcher ou au contraire faciliter.

L'infection par le Covid, facilitée par un sucre

Par exemple, pour pénétrer les cellules des voies respiratoires (fosses nasales, gorge, trachée, bronches et bronchioles), le virus de la grippe se lie à un sucre présent sur ces cellules : l'acide sialique. Selon une étude japonaise menée sur des cellules cultivées en laboratoire et publiée en juin 2022³, cette molécule serait également essentielle à l'« accrochage » du virus du Covid-19, le SARS-CoV-2. D'où l'idée de tenter de mieux comprendre l'implication des glucides dans l'infection par différents pathogènes. Avec un but : identifier de nouvelles cibles thérapeutiques susceptibles d'aider à développer de nouveaux traitements qui empêcheraient ou limiteraient ce type d'adhésion et donc les infections.

À Lille, Yann Guérardel et son équipe s'intéressent notamment à la bactérie *Escherichia coli* adhérente-invasive (AIEC). Responsable d'infections intestinales, ce germe est soupçonné d'être une des causes de la maladie de Crohn, une pathologie inflammatoire chronique de l'intestin caractérisée entre autres par des douleurs abdominales et une diarrhée importante. Jusqu'ici, de nombreuses recherches ont démontré que l'invasion de la muqueuse intestinale par cette bactérie peut être limitée par la levure *Saccharomyces cerevisiae*, appelée aussi « levure de bière ». Mais la nature précise des molécules derrière ce pouvoir restait méconnue. Afin d'identifier les molécules impliquées, les chercheurs ont isolé plusieurs composants majeurs de *S. cerevisiae* et ont évalué leur activité anti-adhésive et anti-infectieuse contre la bactérie AIEC.

Une découverte déjà brevetée

Et bingo ! Ils ont pu identifier une fraction complexe constituée de polymères de glucose et de mannose. Celle-ci s'est avérée capable non seulement d'inhiber à 95 % l'adhésion des bactéries AIEC, mais aussi de diminuer drastiquement la colonisation de l'intestin des souris par ce pathogène. « Les glucides de cette fraction concurrencent ceux à la surface des cellules intestinales. Résultat, la bactérie s'attache sur les premiers au lieu des seconds. Ce qui empêche l'infection des

cellules », éclaire Yann Guérardel. Publiée en fin 2021⁴ et protégée par un brevet, cette découverte pourrait mener à un traitement innovant contre l'AIEC.

À Grenoble, depuis vingt ans, l'équipe d'Anne Imberty se concentre quant à elle sur un autre agent pathogène problématique : la bactérie *Pseudomonas aeruginosa*. Celle-ci provoque des infections pulmonaires graves chez les patients immunodéprimés ou atteints de mucoviscidose, une maladie génétique héréditaire qui entraîne une déficience respiratoire potentiellement létale. Problème, *P. aeruginosa* résiste aux traitements antimicrobiens actuels. D'où la nécessité de trouver de nouveaux médicaments actifs contre elle. *P. aeruginosa* infecte les cellules pulmonaires en se fixant – au moyen de deux protéines lectines (LecA et LecB) – à des glucides présents à leur surface appelés « mucines pulmonaires ».

Grâce à la technique de cristallographie aux rayons X, qui permet de déterminer la structure en trois dimensions d'une substance donnée, le groupe a étudié la structure des complexes moléculaires formés par ces deux lectines fixées aux mucines pulmonaires⁵. Avec une résolution proche de l'ångström (1 Å = 0,0000001 millimètre), ils ont pu identifier chacune des liaisons qui s'établit entre ces protéines et ces sucres.

Bientôt des plateformes pour accélérer la recherche ?

Ces travaux ont conduit par la suite au développement de nouvelles molécules susceptibles d'aider à contrecarrer la résistance de *P. aeruginosa* aux antibiotiques. « Nos travaux ont permis

à des chercheurs allemands de concevoir des composés capables de se fixer fortement à LecA et LecB. Ce faisant, ces produits empêchent la liaison de ces protéines aux mucines pulmonaires », explique Anne Imberty. Ainsi, dans des articles publiés en 2022 et début 2023, l'équipe allemande a rapporté avoir identifié deux molécules prometteuses : N β L Fucosylamides et le ligand sulfoné L2, capables de bloquer LecA et LecB, respectivement⁶. Reste maintenant à tester ces molécules chez l'humain. Ce qui devrait nécessiter encore au moins cinq années.

À l'avenir, les chercheurs en glycobiochimie espèrent voir développer des plateformes regroupant au même endroit des experts du domaine et des instruments permettant l'analyse des glucides (chromatographie, spectrométrie de masse...). Selon Yann Guérardel, il s'agit là d'« un objectif essentiel afin de rendre l'analyse des glycanes accessible à une plus large communauté scientifique et industrielle ». Peut-être de quoi accélérer le développement de nouveaux anti-infectieux. ||

“Les sucres sont impliqués dans plusieurs processus pathologiques, notamment la capacité qu'ont les micro-organismes pathogènes à adhérer aux tissus.”

1. Unité CNRS/Université de Lille. 2. *Essentials of Glycobiology*, 4th edition, A. Varki, R. D. Cummings, J. D. Esko et al., Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2022. 3. W. Saso et al., *PLOS Pathog*, 14 juin 2022. 4. A. Sivignon et al., *Carbohydr Polym.*, 1^{er} novembre 2021. 5. E. Mitchell et al., *Nat Struct Biol.*, décembre 2002 ; G. Cioci et al., *FEBS Lett.*, décembre 2003. 6. P. Maia et al., *J Med Chem*, octobre 2022 ; E. Zahorska et al., *Angew Chem Int Ed Engl*, février 2023.

Comment les humains ont volé le rouge aux plantes

MATIÈRE

SOCIÉTÉS

ARCHÉOLOGIE Au nord d'Israël, sur la côte orientale de la Méditerranée, s'est développée il y a entre - 13 000 et - 9 650 ans la culture natoufienne. Des chasseurs-cueilleurs qui, d'après de récentes découvertes, auraient pour la première fois utilisé des pigments rouges d'origine organique.

PAR MEHDI HARMI

« Cela a été une grande surprise de découvrir des pigments d'origine organique si anciens et si bien conservés », confie Laurent Davin, archéologue au laboratoire Technologie et ethnologie des mondes préhistoriques¹ et à l'Université Hébraïque de Jérusalem, et coauteur d'une étude parue dans la revue *PLOS ONE*². Datés aux alentours de 15 000 ans avant la période actuelle, ces colorants non minéraux ont été retrouvés sur des perles et des parures provenant de la grotte de Kebara (Mont Carmel, Israël), conservées depuis près de cent ans au musée Rockefeller de Jérusalem. Certes, ces artefacts natoufiens étaient connus mais n'avaient jamais été étudiés, les spécialistes avaient donc toujours cru que le rouge sur les coquillages, dents et autres os des parures avait une origine minérale. En l'occurrence de l'ocre. Colorant minéral « roi » puisqu'« utilisé depuis au moins 300 000 ans par différentes espèces d'homininés. L'utilisation récurrente et quotidienne de l'ocre par notre espèce a commencé il y a environ 140 000 ans en Afrique », détaille Laurent Davin.

Symbolique d'un rouge intense

La découverte a nécessité l'emploi de technologies d'analyse de pointe comme la microscopie à balayage électronique et la spectrométrie Raman, effectuées par Ludovic Bellot-Gurlet, du laboratoire Monaris³ et Julien Navas, du Conservatoire national des arts et métiers. « La forte présence de carbone et d'oxygène ne laissait que très peu de doute sur l'origine organique des pigments rouges. La spectrométrie Raman nous a aidés à déterminer de quel type d'organismes étaient issus ces pigments », explique Laurent Davin. En l'occurrence, le rouge des Natoufiens provenait de plantes typiques de la flore méditerranéenne de la famille des Rubiacées, comme la garance.

▼ Perles d'os ovales avec traces de pigments rouges datées de la période du Natoufien ancien (13050/12550 à 11550 av. J.-C.)



©LAURENT DAVIN/ CC BY

Le « rouge natoufien » n'était pas facile à obtenir. « Il fallait dans un premier temps creuser, s'emparer des racines, les sécher et les réduire en poudre qui, par la suite, était bouillie. Puis elle devait macérer pendant plusieurs jours en fonction de la teinte souhaitée », partage l'archéologue. Un processus long et complexe comparé à la transformation de l'ocre qui ne demande qu'à racler ou broyer la pierre pour en tirer sa couleur. En plus du temps nécessaire à sa confection, le pigment d'origine organique demande une connaissance pointue de l'environnement et surtout le développement de technologies propres à son extraction. « Cela veut aussi dire qu'il a fallu passer par beaucoup d'expérimentations pour parvenir à ce résultat », s'enthousiasme Laurent Davin.

Mais pourquoi les Natoufiens ont-ils développé des pigments organiques compliqués à obtenir alors qu'ils avaient à portée de main de l'ocre en abondance ? Pour Laurent Davin, c'est « la question fondamentale », inhérente à sa découverte. Pour y répondre, l'archéologue estime qu'il faut remettre dans le contexte préhistorique l'utilisation des pigments et plus particulièrement celle de l'ocre. À cette époque, l'ocre avait deux utilisations possibles : soit dans des tâches domestiques comme le dégraissage des peaux d'animaux en vue d'en faire du cuir, soit dans un but symbolique pour colorer l'habitat, le corps ou des objets. « Même si, encore aujourd'hui, on ne sait pas vraiment à quel symbole est associé le rouge », livre-t-il.

Selon l'archéologue, « la réponse pourrait se trouver dans l'intensité du rouge organique comparé à l'ocre minéral. C'était peut-être une manière pour les Natoufiens de montrer que leurs parures étaient plus rouges que d'autres groupes humains vivant dans la région ». Ces derniers dénotaient

SPECTROMÉTRIE RAMAN

Procédé non destructif qui utilise la lumière pour caractériser la composition moléculaire de la surface d'un matériau.

1. Unité CNRS/Université Panthéon-Sorbonne/Université Paris-Nanterre. 2. Davin, L., Bellot-Gurlet, L. et Navas, J., « Plant-based red colouration of shell beads 15 000 years ago in Kebara Cave, Mount Carmel (Israel) », *PLOS ONE*, 2023. DOI 10.1371/journal.pone.0292264 3. De la Molécule aux nano-objets : réactivité, interactions et spectroscopies (CNRS/Sorbonne Université).

également d'un certain raffinement mais aussi de subtils détails destinés à ceux qui en saisissaient la portée. Ainsi, les coquillages utilisés dans des parures n'avaient pas toujours la même teinte, ni la même forme, « *certains étaient découpés, d'autres se trouvaient dans des positions différentes du reste de la parure par exemple* », illustre le chercheur.

Aux prémices de la sédentarité

Cette découverte renseigne tant sur celles et ceux qui se servaient de ces pigments organiques que sur leur culture. En effet, pourquoi mettre au point un tel procédé d'extraction chronophage ? L'explication est simple : les Natoufiens étaient des chasseurs-cueilleurs... sédentaires. « *Ils font clairement partie des premières sociétés sédentaires au monde. On retrouve sur leur territoire, qui s'étend du sud de la Turquie au Sinai, les vestiges des premiers villages de l'humanité* », révèle Laurent Davin. Les Natoufiens avaient donc du temps à consacrer à autre chose qu'à l'unique prédation à laquelle s'adonnaient leurs ancêtres.

Le bouleversement dans l'organisation sociale de la société natoufiennne a été majeur. « *On pense que c'est cette sédentarité qui a provoqué un changement au niveau de la transmission de l'identité, à travers les parures par exemple, mais aussi de la représentation des identités individuelles et communes*, indique Laurent Davin. *Les Natoufiens sont à l'origine de ce qui va transformer fondamentalement la vie de notre espèce. Car une fois que les Homo sapiens se sont sédentarisés, ont démarré les processus qui ont amené à l'agriculture puis à l'élevage, encore utilisés de nos jours dans toutes les sociétés humaines.* »

Que ce soit le pourpre phénicien, issu du mollusque *Murex brandaris* utilisé dans toute la Méditerranée antique, le rouge carmin, extrait de la cochenille (*Kermes vermilio*), que l'on retrouve aujourd'hui dans l'alimentation, ou du rouge garance utilisé dans la tombe de Toutankhamon, le Suaire de Turin, les peintures de Van Gogh ou pour teinter les pantalons de l'armée française durant la Première Guerre mondiale, les Natoufiens ont lancé une mode qui n'est pas près de s'estomper. ||

▼ Réplique expérimentale de perles en coquillages avec le colorant organique rouge natoufien à base de racines de Rubiacées.



©LAURENT DAVIN/ CC BY

En bref

Le Comets rend son avis sur les campagnes d'opportunité

Le 20 octobre, le Comité d'éthique du CNRS, saisi par son président-directeur général, a rendu son avis sur les campagnes de recherche dites « d'opportunité », notamment dans les régions polaires.

Pour en savoir plus : <https://bitly.ws/33aAC>

Former le secteur public à la transition écologique

À la requête de l'État, la Mission programmes nationaux du CNRS va coordonner une partie de la formation à la transition écologique des cadres de l'État (les modules « Conférences-débats » et en partie « Visites de terrain ») en mobilisant et en s'appuyant sur l'ensemble de la communauté scientifique.

Le premier produit équipé d'une batterie sodium-ion commercialisé

Depuis septembre, Tiamat, start-up spin-off du CNRS, commercialise chez Leroy Merlin le premier produit grand public alimenté par la technologie de batterie sodium-ion : un tournevis sans fil. Une première mondiale.

De nouveaux partenariats avec l'Asie de l'Est

Le 3 octobre, lors d'un voyage au Japon, Antoine Petit, président-directeur général du CNRS, a inauguré le French-Japanese Laboratory of Mathematics and their Interactions, un nouveau laboratoire de recherche international en partenariat avec l'université de Tokyo. Les 17, 18 et 19 octobre, c'était au tour de l'organisme français d'accueillir trois délégations scientifiques chinoises en son siège parisien. La semaine s'est conclue par le renouvellement de l'accord-cadre unissant le CNRS et l'Académie des sciences de Chine.

Le CNRS et la propriété intellectuelle

La propriété intellectuelle, dont la forme la plus courante est le brevet, protège l'investissement dans l'innovation. Mais de l'invention née au laboratoire à un produit commercialisé, il y a tout un parcours durant lequel le CNRS s'engage pleinement aux côtés de partenaires industriels et de start-up.

PAR MAXIME LEROLLE

Figurant parmi les dix plus gros contributeurs de brevets en France, le CNRS a déposé l'an dernier 354 demandes à l'Institut national de la propriété industrielle (INPI). Ces nouveaux savoir-faire, logiciels, techniques ou encore molécules agrandissent le patrimoine du CNRS qui s'élève à environ 9 000 familles de brevets, détenues dans leur immense majorité en copropriété. « *La propriété intellectuelle est un socle*, insiste Emmanuelle Le Coz, à la tête de la direction Propriété intellectuelle de CNRS Innovation¹. *Le CNRS n'ayant pas vocation à commercialiser les produits issus de ses technologies, il opère un transfert vers les industriels, par exemple par le biais d'un droit de licence. La propriété intellectuelle sécurise les investissements des entreprises qui transformeront l'innovation en produit sur le marché. Elle alimente également la recherche internationale car breveter, c'est aussi publier. Le contenu d'un brevet est en*

effet obligatoirement rendu public au bout de dix-huit mois. » Parmi tous les brevets codétenus par le CNRS, un premier tiers est sous la responsabilité d'un autre organisme public de recherche, un second sous celle d'entreprises, tandis que la dernière part est gérée directement par CNRS Innovation et les treize Sociétés d'accélération du transfert de technologies (SATT). Ce système attribue un mandataire unique à chaque brevet et réduit drastiquement le nombre d'interlocuteurs, souvent issus de plusieurs tutelles, pour les industriels.

Évaluer...

Mais comment les découvertes en laboratoire deviennent-elles de la propriété intellectuelle ? « *Le dépôt de nouveaux brevets se fait via l'avis d'un comité décisionnel hebdomadaire*, précise Emmanuelle Le Coz. *Avec les directeurs de différentes sections spécialisées, comme la physique ou la chimie, nous étudions les déclarations d'inventions des chercheurs.* » Ce comité évalue d'abord le potentiel juridique du brevet, soit ses chances d'être validé par l'INPI et, si besoin, ses équivalents internationaux, puis ses apports techniques et économiques. « *Certaines inventions sont brevetables mais présentent peu d'intérêt si elles se noient dans un océan de solutions très proches déjà disponibles sur le marché* », souligne Emmanuelle Le Coz.

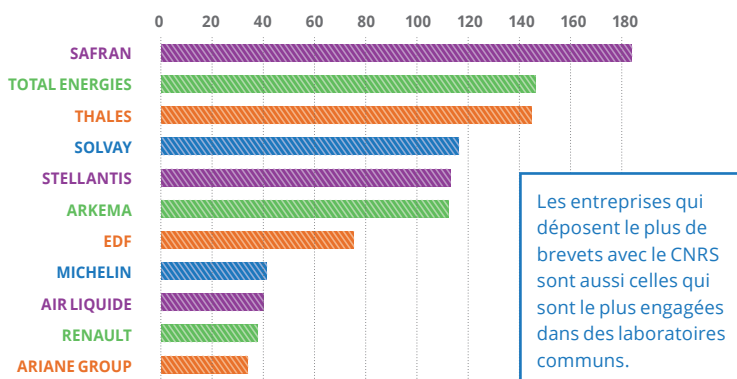
Suit une phase de recherche d'industriels pour prendre et négocier une licence sur ces brevets, sous la houlette de Benjamin Camescasse, directeur licensing à CNRS Innovation. « *Tous les brevets qui sortent d'un laboratoire CNRS ont vocation à être exploités mais, comme ils sont encore loin du marché, nous devons créer des liens forts avec les industriels pour les y amener*, explique-t-il. *Une molécule obtenue en laboratoire aura par exemple besoin de développements pour être produite en masse en usine.* »

...et transférer aux entreprises pour transformer

Les programmes de prématurité du CNRS et de maturation des SATT accompagnent cette transition et confrontent l'invention aux réalités du marché. « *Dans les faits, ce n'est pas un chercheur isolé qui va soudainement avoir une idée que l'on valorise ensuite avec un tiers sorti de nulle part : les inventions qui sortent de nos laboratoires sont*

Principales entreprises déposant avec le CNRS

Nombre de familles de brevets déposées avec le CNRS sur la période 2012 - 2021



Source : CNRS



© FRÉDÉRIQUE PLAS / INMG / CNRS IMAGES

▼ Spécialiste en biologie du développement, Valérie Castellani (à droite), ici à l'Institut NeuroMyoGene avec Loraine Jarrosson, ingénieure d'études, a cofondé la start-up Oncofactory. La chercheuse a mis au point une technique brevetée permettant de développer une médecine personnalisée et d'expérimenter des candidats médicaments dans le domaine de l'oncologie.

souvent le fruit de collaborations entre le CNRS et un industriel, souligne Benjamin Camecasse. Nous y réfléchissons en amont pour identifier les verrous technologiques à lever et l'interlocuteur industriel pour le transfert technologique. »

La valorisation passe toujours par la négociation d'un contrat de licence, qui donne un droit d'exploitation du brevet dans un domaine et un territoire particuliers en vue d'une commercialisation. Si les liens sont déjà forts, réguliers et anciens, le CNRS et l'entreprise peuvent signer un contrat-cadre afin de fluidifier ces échanges. Celui qui lie Safran et le CNRS a ainsi été renouvelé à trois reprises depuis 2014. « La propriété intellectuelle est un élément essentiel de notre stratégie de différenciation, basée sur notre capacité à l'innovation, souligne Jean-Marc Brunel, directeur de la Propriété intellectuelle du groupe Safran. Le brevet est d'ailleurs le meilleur instrument juridique pour protéger nos investissements dans l'innovation. Le nombre de co-dépôts que nous effectuons, avec le CNRS et d'autres partenaires, est révélateur de l'efficacité et du dynamisme de ce système. »

Alimenter les stratégies de développement

Avec 931 brevets, Safran est en effet le premier déposant de France pour la seconde année consécutive. Ses liens avec le CNRS sont suffisamment forts pour qu'un comité de pilotage et un comité stratégique se réunissent régulièrement sur les questions de propriété intellectuelle. Ils partagent même la tutelle de centres de recherche,

comme le Laboratoire des composites thermostrostructuraux² qui, à lui seul, représente une quarantaine de co-dépôts par an.

D'autres grands groupes collaborent avec le CNRS. « Chez Thales, nous avons une forte tradition de relations avec le monde académique, appuie Philippe Valéry, adjoint au directeur technique du groupe, en charge des accords et des partenariats de recherche. Notre accord-cadre avec le CNRS remonte à 1985 et a été régulièrement reconduit et complété depuis. Sous son égide, nous avons encadré ensemble plus de mille thèses. » Cette relation s'illustre par la cogestion de laboratoires tels que l'Unité mixte de physique CNRS/Thales, installée à Palaiseau depuis 1995, ou le laboratoire international de recherche Cintra³, inauguré à Singapour en 2009 dans le domaine des nanotechnologies.

Ces exemples illustrent comment, du laboratoire au marché et du CNRS aux entreprises, la propriété intellectuelle accompagne et protège l'innovation. Un système vertueux que le CNRS a su rationaliser et équilibrer au fil des années. II

1. CNRS Innovation, créée en 1992, est la structure nationale de valorisation et de transfert de technologie du CNRS. 2. Unité CNRS/Safran/CEA/Université de Bordeaux. 3. Unité CNRS/Thales/Université technologique de Nanyang.

Comprendre les

VIVANT

NEUROLOGIE Troisième motif de consultation médicale, les vertiges et leurs causes sont de mieux en mieux compris. De nombreuses pistes sont désormais explorées pour soulager les patients.

PAR LAURE DASINIÈRES

Impression que notre corps glisse ou que le décor et les objets tournent autour de nous, le vertige est quelque chose de relativement courant qui peut se révéler un véritable handicap dès lors qu'il devient chronique. En France, près de 300 000 personnes sont concernées par ces troubles souvent causés par des atteintes du système vestibulaire.

Logé dans l'oreille interne et protégé par un coffre-fort osseux très épais (l'os temporal), ce système vestibulaire est un système sensoriel très sensible et très perfectionné. Il informe le cerveau de tous les micro-déplacements et micro-accélération de notre tête. Il encode différents paramètres tels que l'amplitude et la fréquence de nos mouvements. Ces codages binaires sont ensuite envoyés via les fibres du nerf vestibulaire vers le tronc cérébral, le cervelet et le cerveau où ces informations sont utilisées dans tout un éventail de fonctions dont les réflexes posturaux et l'équilibre, la stabilisation du regard ou encore l'orientation et la perception du corps dans l'espace.

Une illusion de mouvement du corps

« À proprement parler, le vertige est une illusion de mouvement du corps et/ou de l'environnement autour de soi. Il donne le sentiment que le corps ou les choses autour tournent, bougent, se déplacent », expose Christophe Lopez, neuroscientifique au Laboratoire de neurosciences cognitives¹ (LNC) et coordinateur scientifique du projet Vestiself soutenu par l'Agence nationale de la recherche, qui étudie les liens entre système vestibulaire et conscience corporelle. « Il existe plusieurs types d'illusions de mouvement : sensation de rotation qui donne l'impression d'être dans un manège, sensation de translation qui peut donner l'impression que l'on chute ou que l'on flotte dans la pièce », précise le chercheur.



Christian Chabbert, également chercheur au LNC et fondateur du groupement de recherche Vertige, souligne que d'autres troubles sont fréquemment associés, rendant difficiles les activités de la vie quotidienne : « La personne qui en souffre peut avoir des pertes d'équilibre, chuter et avoir des pertes de mémoire spatiale. » Le système vestibulaire n'est pas uniquement impliqué dans des actions somme toute assez réflexes, comme tenir debout. « Il contribue également à des choses autrement plus élaborées et joue sur les représentations de l'espace, du corps et le sens du soi. Et puisqu'il permet de coder

1. Unité CNRS/Aix-Marseille Université.

vertiges



l'orientation du corps et nous donne des informations sensorielles pour nous repérer dans l'espace, mémoriser les trajets, etc., il contribue en somme à la navigation spatiale», explique Christophe Lopez. Et le neuroscientifique de poursuivre : « Le système vestibulaire donne également des informations pour se représenter son corps, sa taille, sa longueur ou son volume. Les astronautes, qui, dans l'espace et donc en apesanteur, perdent des fonctions de leur oreille interne liées à la gravité, peuvent avoir l'impression que leur corps est plus long ou plus court qu'il ne l'est réellement. »

De tels phénomènes se retrouvent en clinique : lorsque le système vestibulaire est dysfonctionnel, l'oreille interne « dit » au cerveau que les choses tournent, alors que les autres capteurs sensoriels (vision, toucher...) « disent » le contraire. Les personnes peuvent par exemple avoir l'impression que leur cou s'allonge. Elles peuvent aussi avoir des référentiels mélangés, être désorientées, ne plus savoir distinguer le haut et le bas, la gauche et la droite.

Comorbidités psychiatriques et hormonales

À ces perturbations sensorielles s'ajoutent souvent des étourdissements et des nausées, ainsi que des difficultés à fixer le regard pendant le mouvement. « *Les vertiges sont une forme de handicap invisible qui suscite beaucoup de détresse chez les personnes qui en souffrent* », commente Christophe Lopez. C'est d'autant plus vrai que des études récentes montrent combien vertiges/troubles vestibulaires et santé mentale sont intimement liés. « *Il existe des liens très étroits entre anxiété et vertiges. D'une part, les personnes qui ont des vertiges peuvent développer un syndrome anxiodépressif notamment parce qu'ils en viennent à redouter de sortir, d'être vus en train de tituber ou de chuter. D'autre part, les syndromes anxiodépressifs peuvent se manifester par des vertiges, une instabilité, etc.* », explique le chercheur. Il ajoute : « *Nous avons pu documenter le lien entre venir consulter pour des vertiges et souffrir de comorbidités psychiatriques. Par exemple, outre le fait d'avoir plus de chance de développer un syndrome anxiodépressif, les personnes qui consultent sont plus susceptibles que d'autres d'avoir un score élevé de dépersonnalisation, un type de troubles dissociatifs. Il y a là une combinaison de facteurs psychologiques et otoneurologiques.* » Des découvertes récentes rassurantes pour des patients qui ont longtemps été catalogués « psychiatriques » quand bien même leurs difficultés sont la conséquence d'un trouble sensoriel.

« *Des études ont récemment mis en évidence que le système vestibulaire est aussi impliqué dans la régulation du système hormonal, de la densité osseuse, des prises alimentaires et du sommeil*, explique Christian Chabbert qui travaille précisément sur les questions hormonales. *Au sein de notre équipe, nous avons fait le constat d'une comorbidité*

“ Le système vestibulaire joue sur les représentations de l'espace, du corps et le sens du soi. ”

entre vertiges et états hormonaux altérés (notamment en période prémenstruelle, en début de grossesse ou encore en préménopause), ainsi qu'avec le diabète et l'hypothyroïdie. »

Et le chercheur de poursuivre : « De manière assez surprenante, nous avons découvert qu'il existe des récepteurs hormonaux dans le vestibule. Un des axes de recherche actuels est de mieux comprendre les relations entre vertiges et hormones. Nous démarrons une étude clinique multicentrique qui vise à identifier les biomarqueurs sanguins associés aux épisodes aigus de vertiges, et qui pourrait permettre à l'avenir de mieux diagnostiquer les vertiges et leurs causes. Il s'agit de réaliser un dosage hormonal chez des patients en crise, et un mois après la crise. »

De l'identification des causes à la rééducation

Comprendre les liens entre vertiges et ménopause ou entre vertiges et diabète permettra de mettre en place des solutions ciblées afin de mieux prendre en charge les patients. « Les traitements des vertiges dépendent évidemment en premier lieu des causes de ces vertiges », signale Pierre Denise, praticien hospitalier au CHU de Caen, physiopathologiste de l'équilibre et des vertiges. Et c'est peu dire que ces causes sont nombreuses : « Les vertiges peuvent être causés par toutes sortes d'atteintes au niveau des capteurs de l'oreille interne, du nerf vestibulaire et/ou des nombreuses régions du cerveau qui traitent les informations qui proviennent de l'oreille interne », détaille Christophe Lopez.

Ces atteintes peuvent être causées par : un accident ischémique au niveau de l'oreille interne ou des régions vestibulaires ; une maladie de Ménière – qui correspond à des changements de pression des liquides qui se trouvent dans l'oreille interne ; une névrite – une inflammation du nerf vestibulaire causée par une infection virale ; une tumeur sur le nerf vestibulaire (neurinome) ; un accident vasculaire cérébral (AVC) ; de l'épilepsie ou encore des traumatismes, par exemple une chute provoquant une fracture de l'os qui entoure l'oreille interne.

“Des études récentes montrent combien vertiges/troubles vestibulaires et santé mentale sont intimement liés.”

À cette liste déjà longue s'ajoute l'ingestion de substances dites « ototoxiques » que l'on retrouve dans certains composés pharmaceutiques comme des antibiotiques ou des antitumoraux, certains aliments comme le manioc ou encore l'alcool. Ce dernier, consommé abusivement, peut donner l'impression que tout tourne autour de soi. Il agit



© CHES/DE PRADA THIERRY, 2021

directement dans l'oreille interne où il vient modifier les propriétés des liquides qui s'y trouvent. Mais souvent, traiter la cause ou la supprimer ne suffit pas à faire disparaître les vertiges, comme l'explique Pierre Denise : « Dès lors que la cause a été traitée mais qu'il y a une mauvaise récupération et que les vertiges persistent, la rééducation vestibulaire par un kinésithérapeute spécialisé reste le traitement de choix. Celle-ci vise à ce que le patient réorganise son système nerveux central pour recouvrer ses capacités d'équilibre à partir d'autres modalités sensorielles : proprioception, vision, sensibilité cutanée, viscéroception ».

Le physiologiste ajoute qu'« il existe aussi – c'est encore une thérapeutique qui en est à ses débuts – des méthodes pour aider la régénération des cellules sensorielles du système vestibulaire – les cellules cillées –, lorsque celles-ci sont atteintes ». De son côté, Christophe Lopez signale que « certaines personnes peuvent trouver une aide à consulter d'autant que des psychiatres ont développé des techniques de thérapies comportementales et cognitives qui semblent être un outil intéressant pour une partie des patients ».

Des pistes grâce aux astronautes

Étudier comment la privation de gravité affecte le système vestibulaire des astronautes en apesanteur est une des pistes actuelles pour améliorer la prise en charge des patients atteints de vertiges d'origine vestibulaire mais aussi de ceux qui souffrent de vestibulopathie bilatérale – c'est-à-dire d'une atteinte vestibulaire des deux côtés. « Ces derniers, précise Pierre Denise, ne souffrent pas de



▼ Pour simuler l'absence de gravité, des volontaires sont placés en immersion sèche. Une situation semblable à ce que vivent les astronautes dans la Station spatiale internationale.

vertiges mais d'un manque d'équilibre en marchant, surtout dans l'obscurité, les yeux fermés ou en se levant/marchant sur un sol inégal, mou ou bancal. Ils souffrent aussi d'une oscillopsie résultant d'une instabilité oculaire associée à des mouvements de la tête. À ces symptômes caractéristiques s'ajoutent des troubles du sommeil, de l'orientation, de la mémoire ainsi que de l'anxiété. »

Dans une démarche de science participative, le physiologiste et son équipe collaborent avec l'Association française de vestibulopathie bilatérale idiopathique, afin d'apprendre à mieux comprendre cette pathologie et à évaluer l'efficacité de manœuvres et des entraînements pour améliorer les symptômes des patients. « *Nous espérons aussi que ce que nous apprenons des astronautes pourra servir pour améliorer la prise en charge des patients atteints de vestibulopathie bilatérale* », conclut-il. C'est donc des étoiles que viendront peut-être les prochains traitements des vertiges et troubles de l'équilibre d'origine vestibulaire. ||

À voir

Notre reportage : « Le système vestibulaire, un sixième sens méconnu »



En bref

Les 10 instituts du CNRS se dotent de noms d'usage

Cette décision, actée le 20 octobre, vise à affirmer l'unité de l'organisme et à faciliter la compréhension de son périmètre scientifique. En parallèle, le CNRS a remanié son logo et conçu une nouvelle identité visuelle.

Le CNRS présent à la COP28

Une délégation officielle du CNRS, emmenée par son président-directeur général Antoine Petit, s'est rendue à Dubaï pour la 28^e Conférence des Parties (COP28) organisée du 30 novembre au 12 décembre. Pour la seconde année consécutive, l'organisme a été notamment impliqué dans un pavillon dédié à l'Océan et aux enjeux climatiques.

ERC Synergy et Starting Grants

Le CNRS est l'institution hôte de vingt-trois nouvelles bourses accordées par le Conseil européen de la recherche (ERC). Les vingt lauréats des bourses Starting, dédiées aux jeunes chercheurs et chercheuses, vont percevoir 1,5 million d'euros. Quant aux trois bénéficiaires des bourses Synergy, conçues pour des groupes de 2 à 4 scientifiques, ils disposeront d'un budget d'un montant maximal de 10 millions d'euros.

Lire sur CNRS Info : <https://bitly.ws/33az8>

La science au secours des pôles

Du 8 au 10 novembre à Paris, lors du One Planet Polar Summit, scientifiques, diplomates et politiques ont échangé sur les moyens de mieux connaître les pôles et les glaciers afin de mieux les préserver. Ce sommet avait également pour ambition de renouveler les collaborations internationales sur la cryosphère.

Une nouvelle station de recherche en Guyane

Le 10 octobre, Antoine Petit, président-directeur général du CNRS, a inauguré une nouvelle station de recherche dans l'Ouest guyanais, dédiée à l'étude de l'écosystème de la région et à la co-construction de connaissances avec les communautés locales.

Sous les Alpes, 40 ans de recherche dans un laboratoire extrême

MATIÈRE

UNIVERS

Le Laboratoire souterrain de Modane (LMS), en Savoie, a célébré ses 40 ans le 17 octobre. Comment est né ce laboratoire atypique ?

Reynald Pain. Tout a commencé avec un besoin très particulier des chercheurs et chercheuses en physique des particules. Les théories de physique fondamentale (*voir encadré*) prédisent en effet que le proton, cette particule constituant les noyaux de tous les atomes, n'est pas éternel et peut se désintégrer en particules plus légères. On devrait donc pouvoir mesurer son temps de vie. À la fin des années 1970, les progrès des développements technologiques nécessaires et les premières estimations de ce temps de vie ont convaincu la communauté scientifique internationale de construire des détecteurs qui en seraient capables.

Mais, pour étudier ces phénomènes extrêmement rares, il est nécessaire de se protéger de tout ce qui pourrait constituer un bruit de fond parasite, en particulier des rayons cosmiques et de la radioactivité naturellement présente à la surface de la Terre. C'est pourquoi le CNRS et le CEA¹ se sont associés pour créer ce laboratoire sous 1 600 mètres de roche, en plein cœur des Alpes, en profitant de la construction du tunnel du Fréjus. La roche sert alors d'écran protecteur. Appuyés par des équipes des laboratoires des universités de Wuppertal et d'Aix-la-Chapelle, à l'époque en Allemagne de l'Ouest, ils y ont construit un grand détecteur



© E. BLAS / COURTESY

ENTRETIEN Situé au milieu du tunnel du Fréjus qui relie la France et l'Italie, le Laboratoire souterrain de Modane fête 40 ans de recherche en physique fondamentale, et s'ouvre désormais à d'autres disciplines. Le point avec Reynald Pain, directeur de CNRS Nucléaire & Particules.

PROPOS RECUEILLIS PAR SOPHIE FÉLIX

souterrain. Le LSM est resté, depuis son ouverture en 1982, le laboratoire de physique fondamentale le plus « profond », si l'on peut dire, d'Europe.

Quelles recherches y sont-elles menées ?

R. P. Au-delà des recherches autour de la durée de vie du proton, plusieurs domaines de la physique fondamentale peuvent bénéficier des conditions d'isolation que représente un laboratoire souterrain, mais aussi de l'expertise technique avancée qui y est développée. Le LSM étudie ainsi la nature des neutrinos – ces particules si élusives que 60 milliards d'entre elles traversent chaque centimètre carré de notre planète par seconde, sans laisser la moindre trace –, depuis l'expérience NEMO à la fin des années 1980 jusqu'à son itération actuelle SuperNEMO. Celle-ci implique vingt et une institutions de neuf pays et cherche à déterminer si le neutrino est identique à son antiparticule, ce qui ouvrirait des pistes importantes de recherche au-

delà du modèle standard de la physique des particules. Ces expériences ont déjà permis de donner des limites sur la masse du neutrino.

Plus récemment, les équipes du laboratoire s'intéressent aussi à la recherche de la matière noire, notamment sous la forme de particules nouvelles nommées « WIMPs » (*pour Weakly interacting massive particles, Ndlr*). Les expériences menées en souterrain à Modane, comme EDELWEISS, ont également posé des limites sur la masse possible de ces particules candidates pour expliquer cette matière hypothétique, invisible, interagissant très peu avec la matière ordinaire mais représentant l'essentiel de la densité totale de matière de l'Univers.

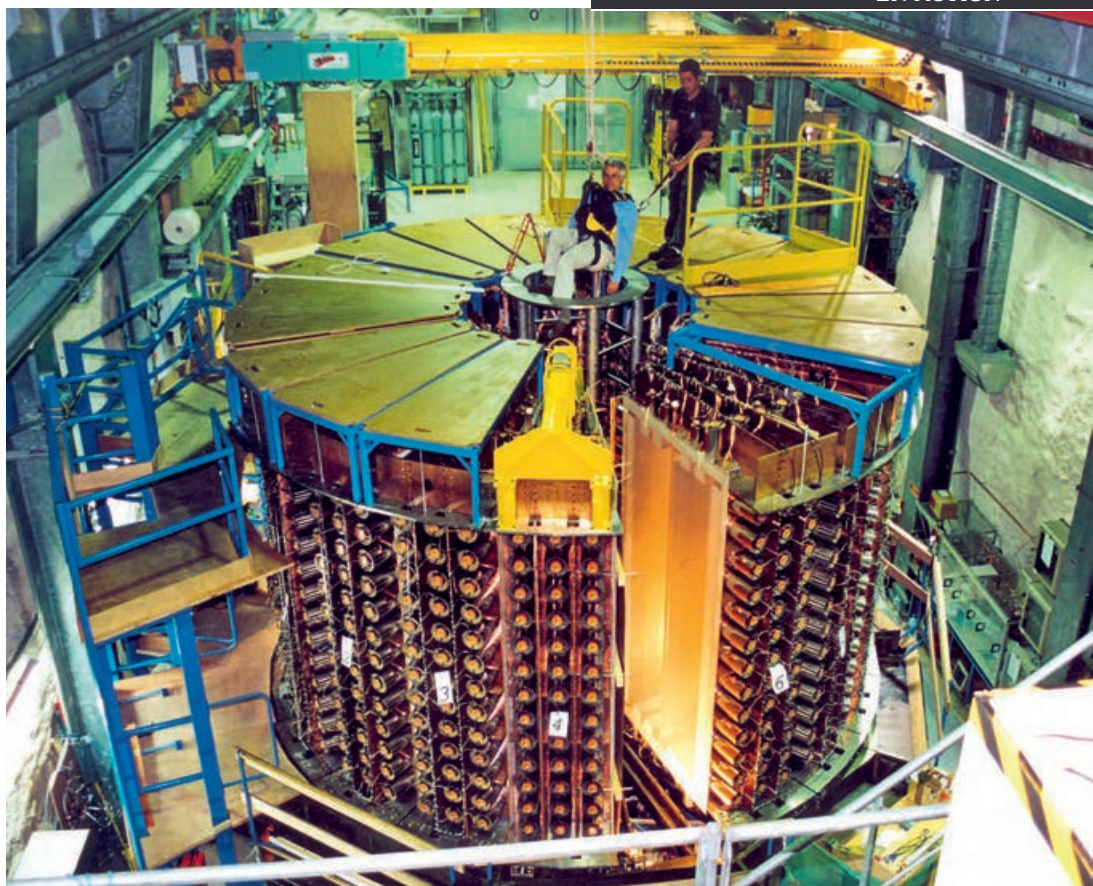
Qu'envisagez-vous pour le futur du laboratoire ?

R. P. Aujourd'hui, des collaborations internationales se sont constituées autour d'expériences pour découvrir la matière noire, avec des technologies basées sur l'argon ou le xénon liquides. Le CNRS y est impliqué mais

1. Aujourd'hui, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. 2. Depuis 2019, le LSM est une plateforme hébergée du Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (CNRS/Univ. Grenoble Alpes). 3. Les contrats de plan État-Région constituent un outil de développement entre l'État et les Régions, par la mise en œuvre de projets structurants.

Le LSM n'est aujourd'hui pas assez spacieux pour accueillir ces très grandes expériences. Il se penche donc sur le développement de nouvelles techniques de détection qui nécessitent moins de volume et sur lesquelles la France a une forte expertise, notamment en cryogénie. Le projet Tesseract par exemple, proposé en collaboration avec l'université de Berkeley aux États-Unis, a ainsi pour ambition de tester des domaines de masse de matière noire jamais encore explorés. En physique des neutrinos, le laboratoire poursuit également des recherches plus risquées et exploratoires, développant par exemple davantage la technique de détection originale déjà démontrée en 2020 à Modane par l'expérience Cupid-Mo. Dans ces domaines, le LSM, devenu une sorte de centre de développement technologique pour les expériences de demain, nous réserve des surprises.

Mais nous souhaitons développer encore davantage ce laboratoire. D'autres domaines scientifiques attendent de bénéficier de cet environnement particulier, extrême même, avec un très bas bruit de fond cosmique et un environnement de très faible radioactivité. Par exemple la biologie, pour étudier l'influence de la radioactivité, ou plutôt de son absence sur des cellules vivantes – la vie peut-elle se passer de radioactivité ? –, ou encore la micro-électronique ou les développements de qubits pour l'informatique quan-



© LSM COLLABORATION NEMO3

► Le détecteur NEMO3, installé au LSM et dédié à l'étude des neutrinos, a fonctionné de 2000 à 2011.

tique. Le LSM s'organise donc pour étendre son rôle de plateforme nationale² au service de différentes communautés de recherche, au-delà de la physique fondamentale. Cela a été reconnu par son inscription sur la dernière feuille de route nationale des infrastructures de recherche, ce qui permet aussi d'augmenter la visibilité de ce laboratoire unique au niveau européen et international.

Le LSM entretient également des relations cruciales avec le tissu socio-économique local.

R. P. Tout à fait. Et en premier lieu, avec la société du tunnel du Fréjus, dont les équipes sont dépendantes notamment lorsqu'il faut arrêter la circulation pour permettre l'accès au laboratoire (*qui se fait par l'abri anti-incendie n°6, situé exactement au centre du tunnel, Ndlr*), ou pour toutes les questions de sécurité inhérentes à un laboratoire souterrain. Avoir une activité scientifique de recherche fondamentale est apprécié par les autorités locales – Région, Département, etc. – qui la soutiennent, notamment dans les contrats de plan État-Région³. Elles étaient d'ailleurs présentes à la célébration des 40 ans du laboratoire. Depuis 2009, le LSM a aussi ouvert un espace de médiation scientifique accessible au grand public, dans ses locaux de surface non loin du tunnel. Il est ainsi devenu un espace culturel et scientifique connu et reconnu dans le paysage local. ▮

La durée de vie du proton, question fondamentale

Depuis les années 1960, une théorie fondamentale unifie deux des quatre forces agissant sur la matière dans l'Univers : l'interaction faible, responsable de la désintégration radioactive spontanée des particules, et l'interaction électromagnétique. C'est la force électrofaible, objet du prix Nobel de physique de 1979. Mais pourquoi s'arrêter là ? Les scientifiques cherchent à associer également l'interaction forte qui structure le noyau des atomes. Cette théorie dite de « grande unification » prédit notamment que le proton a une durée de vie finie, au terme de laquelle il se désintègre en particules plus légères. Mesurer ce temps de vie contribuerait donc à valider cette théorie. Si les expériences menées au LSM n'ont, à ce jour, pas observé de telle désintégration, elles ont permis de donner une limite basse au temps de vie du proton, qui se situe bien au-delà de l'âge de l'Univers.

► Pour en savoir plus : <https://50ans.in2p3.fr/timeline-lsm/>



Une IA décèle les premiers signes de la sclérose en plaques

© NEW AFRICA /STOCK.ADOBE.COM

VIVANT



NUMÉRIQUE



Elle apparaît surtout chez de jeunes adultes, entre 25 et 35 ans, et toucherait plus de 115 000 personnes en France, avec 5 000 nouveaux diagnostics réalisés chaque année¹. La sclérose en plaques (ou SEP) est une maladie inflammatoire, auto-immune et neurodégénérative qui affecte le cerveau et la moelle épinière. L'inflammation détruit la myéline, qui ne peut alors plus assurer son rôle de gaine protectrice pour les axones des neurones. Une perte qui affecte particulièrement la transmission de l'information transitant de cellule nerveuse en cellule nerveuse. Cette maladie chronique réduit les facultés motrices, visuelles, sensibles et cognitives, en fonction de la taille et de l'emplacement des lésions qu'elle inflige. Des soins existent pour limiter l'avancée de la pathologie, mais elle ne peut pas encore être guérie.

Retracer l'évolution des structures cérébrales

L'étude et le suivi de la sclérose en plaques sont compliqués du simple fait que les patients passent des examens d'IRM (imagerie par résonance magnétique) seulement au moment où ils ressentent les premiers symptômes. Ce problème est récurrent pour les maladies neurodégéné-

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE Afin de mieux comprendre le développement de la maladie et de poser un diagnostic avant l'apparition de premiers symptômes, des chercheurs développent des méthodes statistiques et d'intelligence artificielle (IA) pour construire des modèles d'évolution des structures cérébrales.

PAR MARTIN KOPPE

ratives, où plusieurs structures cérébrales sont déjà atteintes sans que l'on ne sache depuis quand ni comment. Un puzzle qui n'effraie pas Pierrick Coupé, directeur de recherche au CNRS, au Laboratoire bordelais de recherche en informatique², qui travaille sur l'analyse et le traitement d'imageries biomédicales dans le cadre de maladies neurodégénératives telles que la SEP ou la maladie d'Alzheimer. Le chercheur s'intéresse depuis 2019 aux modèles dits « lifespan », couvrant toute la durée de vie. Une approche qui permet de situer les phénomènes chronologiquement. « Comme personne ne passe d'IRM de

1. <https://www.arsep.org/fr/159-la-sep.html> 2. Unité CNRS/Bordeaux INP/Université de Bordeaux. 3. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/hbm.26464> 4. onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hbm.25850

► **Examen des images IRM d'un patient atteint de sclérose en plaques, maladie auto-immune et neurodégénérative qui touche le cerveau et la moelle épinière.**

manière régulière de sa naissance à sa mort, des modèles ont été construits à partir d'une dizaine de milliers d'IRM de cerveaux d'individus uniques et de tout âge, explique Pierrick Coupé. Il est alors possible d'estimer des trajectoires moyennes du volume des structures cérébrales tout au long de la vie, à la manière des courbes de suivi du poids et de la taille chez les enfants. » Ces travaux, décrits dans la revue *Human brain mapping*, étaient initialement destinés à l'étude du vieillissement normal du cerveau. Mais Pierrick Coupé et ses collègues en ont détourné le principe pour étudier des pathologies telle la maladie d'Alzheimer. Ils ont ainsi montré que les courbes du volume de l'hippocampe, structure essentielle pour la mémoire, divergent de son vieillissement habituel dès quarante ans ³.

Un traitement massif d'imageries médicales

Pour la sclérose en plaques, les chercheurs ont analysé les IRM cérébrales de près de 41 000 sujets, dont plus de 2 500 patients issus de la base de données de l'Observatoire français de la sclérose en plaques (Ofsep). « La sclérose en plaques est plutôt décrite comme une maladie inflammatoire, mais nous l'avons regardée sous l'angle de la neurodégénérescence, explique Pierrick Coupé. Nous voulions en particulier vérifier si des structures étaient atteintes de façon précoce et spécifique par la maladie. »

Le but est donc d'identifier toutes les parties du cerveau et de surveiller l'évolution de leur volume au fil de la vie des individus, qu'ils souffrent de sclérose en plaques ou non. Ici, il ne s'agit plus de développer un outil, mais bien de créer de la connaissance. « Une segmentation fine du cerveau sur des images IRM demande deux semaines de travail à une personne formée spécialement pour, déplore Pierrick Coupé. Avec 41 000 cerveaux à analyser, ce travail serait tout bonnement impossible sans IA. »

Les chercheurs ont donc développé une IA collective, où de nombreux réseaux de neurones travaillent de concert afin de converger vers un résultat précis et robuste. Ainsi, 250 réseaux de neurones analysent l'image simultanément. Une approche empruntée à la manière qu'ont les humains de traiter les sujets complexes. « Nous nous sommes inspirés d'un système parlementaire bicaméral, explique Pierrick Coupé. Les réseaux de neurones sont organisés comme deux chambres d'un parlement : l'une analyse à faible résolution tandis que l'autre affine ses résultats. Elles communiquent pendant tout le processus jusqu'à converger sur un consensus découlant sur la discrimination des structures

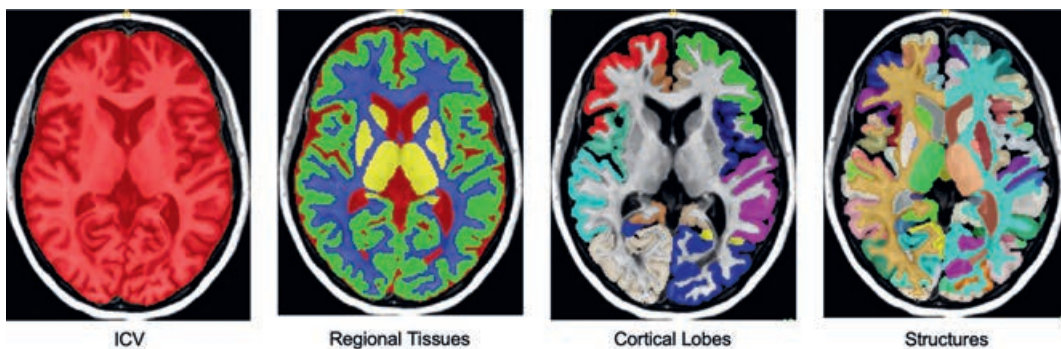
cérébrales les unes par rapport aux autres. La principale difficulté de gérer une grande quantité de données réside dans le contrôle de la qualité des données, et certains réseaux de neurones sont uniquement chargés de vérifier la qualité des analyses. » L'IA segmente le cerveau puis traite la masse de données ainsi obtenues à partir des 41 000 sujets. Ces segmentations permettent ensuite d'inférer la trajectoire de l'évolution moyenne du volume de chaque structure cérébrale au cours de la vie. Pour chaque structure, une trajectoire de l'évolution normale et une trajectoire pathologique sont construites afin d'estimer le moment où les deux modèles divergent.

Des conclusions que l'on peut expliquer

Ces travaux ont montré que le thalamus, impliqué dans le traitement des informations sensibles et sensorielles, était la première structure impactée par la sclérose en plaques. Le putamen, qui joue un rôle dans la régulation des mouvements et l'apprentissage, commence à se dégrader en moyenne quatre ans plus tard. Le tronc cérébral, qui régule notamment le rythme cardiaque et la respiration, est quant à lui affecté environ neuf ans après le thalamus. Autrement dit, les résultats obtenus par Pierrick Coupé et ses collègues ont permis de comprendre que plusieurs structures cérébrales étaient bien affectées plusieurs années avant l'apparition des premiers symptômes de la sclérose en plaque qui, en moyenne, sont décelés plus de dix ans après les premiers signes de neurodégénérescence.

Ces résultats soulignent l'importance prise par l'intelligence artificielle dans l'étude et le diagnostic de diverses pathologies, grâce au traitement massif d'imageries médicales. Le fait que les présents travaux se basent sur des IA qui utilisent une segmentation cérébrale lisible par les humains a son importance, car cela signifie que leurs conclusions sont explicables. En effet, de nombreuses IA parviennent à des résultats corrects en apparence, mais sans que l'on ait accès à leur cheminement. Cela limite les chances de se rendre compte d'un problème si jamais elles se trompent. Il est aussi évidemment peu souhaitable de poser un diagnostic à partir d'algorithmes qui ne peuvent expliquer ou justifier leurs choix. ▮

► **Segmentations des structures cérébrales à partir d'une IRM dans le cadre du diagnostic de la maladie d'Alzheimer réalisées avec le logiciel d'apprentissage profond AssemblyNet développé par les chercheurs.**



© PIERRICK COUPÉ ET AL. "HIPPOCAMPAL-AMYGDALO-VENTRICULAR ATROPHY SCORE: ALZHEIMER DISEASE DETECTION USING NORMATIVE AND PATHOLOGICAL LIFESPAN MODELS" (2022)

« La sociologie doit renouer avec l'esprit scientifique »



SOCIÉTÉS

ENTRETIEN Pour le sociologue Bernard Lahire, il est temps pour la sociologie d'identifier les structures fondamentales des sociétés

humaines comme autant de mécanismes aussi incontestables que les lois de la physique ou de la biologie. Une proposition audacieuse rendue possible par l'observation des sociétés non humaines.

PROPOS RECUEILLIS PAR FRANCIS LECOMPTÉ

C'est un véritable pavé dans la mare que lance Bernard Lahire avec la publication des *Structures fondamentales des sociétés humaines*. En près de mille pages, le sociologue, directeur de recherche au CNRS¹, remet en question pas moins de 150 ans d'une pratique sociologique selon lui fourvoyée dans l'hyperspécialisation et coupée des sciences du vivant. Lui-même s'est consacré depuis une trentaine d'années à de multiples travaux allant de l'échec scolaire à l'action politique, en passant par l'illettrisme et la création artistique. Mais avec la tentation, ressentie dès l'écriture de sa thèse, d'élargir le champ de ses enquêtes à d'autres disciplines comme l'histoire, la psychologie ou la linguistique, et le besoin de réfléchir au statut même des sciences sociales. Les propositions qu'il fait aujourd'hui pour révolutionner la sociologie sont le fruit de ces années de réflexion.

1. Centre Max-Weber (CNRS/ENS Lyon/Université Jean Monnet/Université Lumière Lyon 2).

Vous appelez la sociologie à transgresser ses frontières, mais d'où lui vient l'hyperspécialisation que vous lui reprochez ?

Bernard Lahire. Les premiers sociologues avaient compris que, s'ils voulaient donner une légitimité universitaire à leur discipline, il fallait lui trouver une spécificité. Émile Durkheim, qui pouvait pourtant poser des questions à la frontière de la psychologie et de la sociologie par exemple, a opéré ce travail de fermeture de la sociologie sur elle-même. Il a essayé d'en définir le territoire pour ne pas gêner les psychologues, en leur disant en substance : l'individu, c'est votre objet, le collectif, c'est le nôtre. Ce qui était une erreur originelle, et je l'ai d'ailleurs beaucoup critiqué sur cet aspect, parce que, pour moi, l'individu est fondamentalement social, et le social ne se réduit donc pas au collectif. Durkheim a aussi eu des positions très tranchées vis-à-vis de la biologie : pour lui, les animaux sont du côté de l'instinct et préprogrammés à agir,

alors que les humains sont du côté de l'apprentissage. Pourtant, bien avant l'émergence de l'éthologie, le sociologue Alfred Espinas défendait dès 1877 l'idée que le social n'est pas une spécificité humaine, en publiant une thèse sur les sociétés animales. Mais il a eu raison trop tôt. L'essentiel, pour les sociologues, était de constituer une discipline universitaire et celle-ci ne pouvait l'être qu'autour de la vie en société des humains.

Vous regrettez notamment que les sciences sociales, à l'inverse des autres disciplines scientifiques, ne s'autorisent pas à formuler de grandes lois générales, comme celle de la gravité en physique ou de l'évolution en biologie...

B. L. J'étais de plus en plus gêné par cette idée que les sciences sociales seraient « vouées à rester éternellement jeunes », comme le disait Max Weber. L'expression est devenue un mantra pour de nombreux sociologues : puisqu'on travaille sur un matériau historique qui ne cesse de bouger, on ne peut pas faire de la science comme dans les autres disciplines, et notamment pratiquer l'expérimentation. Je ne voyais pas pourquoi nous serions, nous sociologues, historiens ou anthropologues, incapables de formuler des lois ou des principes généraux, ou de poser les grands acquis de nos disciplines après plus



© ENGELAC/STOCK.ADOBE.COM

d'un siècle de recherches sans repartir à chaque fois de zéro. Au même titre que la loi de la gravité permet de ne pas avoir à vérifier tous les matins que certains objets ne restent pas suspendus en l'air pendant que les pommes, elles, tombent... Certaines disciplines comme la cosmologie ou la biologie évolutive ne sont pour l'essentiel pas des sciences expérimentales. Comme les sciences sociales, elles font de l'observation, et pourtant elles parviennent à énoncer de grands principes généraux.

Ce qui vous conduit à dire: en sciences sociales, l'esprit scientifique doit reprendre le contrôle. Comment y parvenir ?

B. L. Par la méthode comparative. Comparer systématiquement des sociétés très différentes est le meilleur moyen de faire apparaître les invariants et les traits spécifiques à chaque type de société. L'étape suivante, et la plus radicale, c'est de comparer les sociétés humaines avec des sociétés non humaines. Nous

sommes capables de dégager facilement les structures fondamentales de certaines sociétés animales, par exemple les pratiques exogamiques des chimpanzés, où les femelles partent dans un autre groupe pour se reproduire, parce que nous les observons de l'extérieur.

Mais nous sommes rarement capables d'identifier les structures fondamentales de nos sociétés humaines, parce que nous avons le nez collé sur leurs variations. Il faut par conséquent trouver le moyen de les observer de l'extérieur, en les comparant avec d'autres sociétés animales non humaines. En entamant ce travail et en lisant les éthologues, j'ai découvert que, dans de nombreuses sociétés de mammifères, il y a un évitement de l'inceste, alors que Freud et Lévi-Strauss prétendaient que le tabou de l'inceste est ce qui singularise l'humanité. Par ce travail de comparaison, on s'aperçoit ainsi que certaines lois fonctionnent dans plusieurs espèces et ne concernent pas uniquement la nôtre.



À lire:
Les Structures fondamentales des sociétés humaines
Bernard Lahire,
La Découverte,
2023, 972 p.

Comment passe-t-on de ces observations du vivant à des lois sociologiques ?

B. L. En montrant que certaines propriétés biologiques que nous avons héritées de l'évolution ont des conséquences sociales fondamentales. Ainsi, le fait de mettre au monde des petits qui ont un développement extrêmement lent et dont les adultes sont obligés de s'occuper longuement conduit à des espèces attentives aux autres, habituées à apporter soin et entraide. Quand la progéniture est particulièrement demandeuse, on voit aussi s'installer des phénomènes de monogamie, chez les oiseaux notamment, parce que la mère ne peut pas tout faire toute seule et laisser ses petits sans surveillance. Une division du travail s'installe ainsi entre le père et la mère, avec un peu plus de collaboration que chez d'autres espèces.

Chez l'humain, il faut ajouter à cela la dépendance très longue, très forte et énergivore de l'enfant vis-à-vis de ses parents. Cela conduit même à

avoir recours à des « parents » extérieurs au couple. L'accouchement particulièrement difficile et risqué ne peut être lui aussi qu'un accouchement socialisé ou collectif. Il y a donc un grand nombre de pressions qui poussent à faire groupe et à s'entraider. Mais la dépendance longue et forte des enfants humains instaure aussi un rapport de domination parents-enfants, et cela constitue un mécanisme majeur qui a structuré les sociétés humaines. Ce qui est, au départ, de la biologie se traduit en définitive par un fait social : il y a de la domination dans toutes les sociétés, dans les rapports entre les sexes, dans les mondes économique, politique, magico-religieux, etc.

Dans votre livre, vous formulez seize lois universelles et dix lignes de force comme autant de traits humains...

B. L. Je précise d'abord que cette liste n'a rien d'exhaustif et qu'elle demande à être enrichie. À titre d'exemple, on constate que toutes les sociétés humaines ont une dimension économique et des modes de production, comme Marx le faisait remarquer. Malgré les formes extrêmement différentes que prennent ces modes de production, ils constituent une dimension sociale présente depuis le début de l'humanité, comme le sont aussi la domination, le sacré, l'expression symbolique... Je formule aussi, par exemple, la loi « Westermarck », du nom d'un anthropologue finlandais, sur l'évitement de l'inceste. On retrouve cette loi dans toutes les sociétés, mais elle a des conséquences sociales différentes selon le type de société, et même selon le type de groupe dans une société donnée, de la même façon que la loi de la gravité fonctionne partout de la même manière, mais ne produit pas toujours les mêmes effets : étant donné les forces de frottement, un avion ne tombera pas de la même manière qu'une plume.

À énoncer de grandes lois, n'y a-t-il pas beaucoup à perdre en abandonnant la statistique et la

“Je ne vois pas pourquoi nous serions, nous sociologues, incapables de formuler des lois ou des principes généraux après plus d'un siècle de recherches.”

précision de la mesure chères à la sociologie ?

B. L. Ce n'est évidemment pas le but ! Trouver le bon curseur n'est certes pas facile : si l'on est trop généraliste, on ne dit plus rien, et si on est trop particulier, cela ne sert plus scientifiquement à rien. Les sciences sociales vont bien sûr continuer à faire des monographies très détaillées sur telle réalité, à tel endroit, dans tel type de société. Mais, comme en physique ou en biologie, le but est d'énoncer les acquis sur lesquels nous pouvons nous appuyer pour travailler. Les statistiques permettent de repérer certaines régularités, mais « régularité » ne veut pas dire nécessairement « loi ».

Concernant l'échec scolaire, par exemple, quand on s'appuie sur les statistiques, on voit bien que les enfants héritent des propriétés sociales de leurs parents. Mais ce ne sont que des constats, des régularités statistiques. Alors que formuler une

loi de conservation-reproduction-extension, cela suppose de rassembler beaucoup de travaux qui repèrent ce type de régularités, touchant à des questions culturelles, économiques, etc., dans des sociétés très différentes, et cela permet de se rendre compte que c'est un mécanisme qui fonctionne dans toutes les sociétés. Les lois générales ne sont donc en rien un frein à la découverte de phénomènes précis, mais au contraire une aide, qui permet de structurer l'étude de la réalité historique. Même si un événement a toujours une part d'aléatoire, il est toujours un précipité d'un certain nombre d'éléments structurés par des lois. Si nos disciplines ne mettent pas au jour ces lois, elles ne peuvent véritablement prétendre au statut de science. **II**

▲ Les femelles chimpanzés partent dans un autre groupe pour se reproduire. Des pratiques exogamiques que les sociologues ont plus de mal à identifier comme un fait structurant dans les sociétés humaines.

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



LES IDÉES



*Où les mathématiques s'exposent
enfin et où l'on plonge dans les codes
d'un gang international.*

Une maison pour faire rayonner les maths

“ La Maison Poincaré vise à contrecarrer l'idée que les mathématiques sont difficiles et sélectives. Et à montrer qu'elles peuvent être des sources de découverte, voire d'amusement », explique le mathématicien Gabriel Peyré, directeur de recherche au CNRS, au Département de mathématiques et applications de l'ENS¹, et l'un des 8 ambassadeurs et 6 ambassadrices du projet. Le musée a ouvert ses portes le 30 septembre 2023, dans l'ancien laboratoire de Jean Perrin, prix Nobel de physique en 1926 et artisan majeur de la création du CNRS.

Rendre les maths vivantes

Le projet avait été lancé en 2011 par l'équipe de direction de l'Institut Henri Poincaré² (IHP), alors menée par le mathématicien Cédric Villani. « Notre ambition est de participer au dialogue entre les mathématiques et la société », assure la mathématicienne Sylvie Benzoni, directrice actuelle de l'IHP qui porte le projet depuis 2018.

Dans ce haut lieu de l'histoire des sciences rénové, représentant plus de 2 000 m² au sein du campus Curie dans le 5^e arrondissement parisien, les visiteurs et visiteuses peuvent explorer les maths dans tous leurs états : concepts, applications, interactions avec d'autres disciplines scientifiques ou artistiques. L'idée est ainsi de « contribuer à sensibiliser tous les publics – grand public, jeunes, politiques, journalistes, etc. – à l'importance des mathématiques dans les technologies d'aujourd'hui et les questions d'actualité, du développement durable à la gestion des épidémies, en passant par les sciences du climat », détaille la directrice, également ambassadrice du projet. Les mathématiques sont une discipline « multi et transdisciplinaire, en lien avec de nombreuses autres disciplines » et représentent « le fleuron de la recherche française », confirme Élodie Christophe, responsable de la Maison Poincaré, soulignant ainsi « l'importance du soutien du CNRS au projet ».

Les dispositifs présentés sont conçus pour être accessibles aux personnes malvoyantes (éléments tactiles, fiches d'information disponibles en français, anglais et

NUMÉRIQUE

SOCIÉTÉS

Les mathématiques ont enfin leur musée ! La Maison Poincaré a ouvert ses portes cet automne. Un lieu pour découvrir les maths et leurs applications de manière ludique et interactive, en lien étroit avec la recherche.

PAR SOPHIE FÉLIX ET MATTHIEU STRICOT

braille), aux personnes atteintes de daltonisme (choix des couleurs), et aux personnes à mobilité réduite. Parmi ces dispositifs, « Holo-Math » propose une expérience interactive immersive et collective en réalité « mixte » – où les objets numériques viennent se surimposer à la réalité et interagissent en temps réel – permettant de visualiser, avec l'aide de médiateurs et médiatrices, des concepts mathématiques comme, dans un premier temps, le mouvement aléatoire de particules dans un fluide dit « mouvement brownien ».

Des jeux pour visualiser et comprendre

De son côté, Sylvain Faure, ingénieur de recherche au Laboratoire de mathématiques d'Orsay³, autre ambassadeur de la Maison Poincaré, s'intéresse à l'étude des mouvements de foule, thème pour lequel il a développé certains des jeux interactifs de l'espace « Modéliser » du musée. Dans l'un d'eux, des individus doivent évacuer une

“Les mathématiques sont une discipline moderne, qui se réinvente et va au-delà des apprentissages scolaires.”

1. Unité CNRS/ENS-PSL. 2. Unité CNRS/Sorbonne Université. 3. Unité CNRS/Université Paris-Saclay. 4. Unité CNRS/Aix-Marseille Université/Centrale Marseille.



© INSTITUT HENRI-POINCARÉ, PARIS/ATELIER NOVEMBRE, DUBAMA/THIBAUT VOISIN

pièce. « *Le joueur peut agir de deux façons : d'abord, en réglant la proportion de gens polis, qui font attention à ne pas pousser les autres. Ensuite, sur la table, il peut poser un disque, un rectangle et un triangle, et observer quels objets peuvent canaliser ou débloquer une foule* », détaille-t-il. Un autre jeu simule des mouvements collectifs. On dispose d'un troupeau de moutons plus ou moins paniqués que l'on doit faire sortir du pré en manipulant son chien de berger... De quoi mieux comprendre le rôle de la modélisation à travers une activité ludique.

Les mathématiques jouent également un rôle fondamental dans l'univers numérique. C'est par exemple grâce à elles que l'on peut compresser nos photos en format

► Dans l'atrium du musée, l'espace « Connecter » propose la carte « métro mathématique », qui présente des domaines de la discipline et leurs innombrables connexions.

Jpeg pour les partager sur Internet. Pour traduire ce concept, Gabriel Peyré a conçu la borne interactive « Compressez-vous ! » de l'espace « Modéliser » : « *La personne se prend en photo et teste différentes méthodes de compression avant d'observer leurs résultats. En parallèle, elle reçoit des explications sur les maths qui régissent cela* », explique-t-il.

Inspirer les jeunes

Autre application des maths dans l'informatique : l'intelligence artificielle (IA). La Maison Poincaré en a fait le sujet de sa première exposition thématique, qui vient compléter les espaces permanents. « *L'IA apporte de nouveaux questionnements aux maths à travers de nouvelles méthodes, qui apportent à leur tour de nouvelles interrogations aux mathématiciennes et mathématiciens, les obligeant à améliorer leurs théories et leurs méthodes. C'est un cercle vertueux, admet Gabriel Peyré. Un grand nombre de métiers sont appelés à être davantage impactés par l'IA. Notamment dans le domaine de la santé, afin de détecter des tumeurs ou analyser le génome, par exemple. Nous avons donc besoin de jeunes mathématiciennes et mathématiciens passionnés pour travailler là-dessus. J'espère que la Maison Poincaré fera naître de nouvelles vocations.* »

► Dans la salle Alice – en référence au roman *Les aventures d'Alice au pays des merveilles*, de Lewis Carroll – une expérience de réalité virtuelle nommée « Holo-Math » permet d'interagir sur des objets représentés en 3D et expérimenter en direct les résultats de calculs sophistiqués.



© INSTITUT HENRI-POINCARÉ, PARIS / ATELIER NOVEMBRE, DUBAMA / THIBAUT VOISIN

Pour inspirer les jeunes générations – la programmation s'adressant en particulier aux élèves à partir de la classe de quatrième –, le musée a ainsi fait le choix de « présenter autant de femmes que d'hommes, représentatifs des mathématiciennes et mathématiciens du monde entier », affirme Sylvie Benzoni. On y retrouve par exemple le portrait de l'Indien Srinivasa Ramanujan, à l'héritage considérable en analyse et en théorie des nombres ; ou bien celui de la Médaille Fields iranienne Maryam Mirzakhani, dont les travaux exceptionnels sur les géométries complexes furent stoppés net par le cancer... Des histoires qui s'attaquent à la mauvaise réputation des maths. « Nous espérons que cet espace plaisant autour des maths pourra motiver les jeunes à se lancer dans des études, voire des carrières mathématiques », indique Christophe Besse, directeur de CNRS Mathématiques, qui soutient fortement le projet.

Le musée aura aussi pour ambition de « sensibiliser le public sur le fait que les mathématiques sont une discipline moderne, qui se réinvente et va au-delà des apprentissages scolaires ». Sont donc prévus toutes sortes d'événements visant des publics variés : des rencontres à l'heure du thé pour permettre au public de « participer à l'ambiance créatrice de la recherche en mathématiques » et de la « toucher du doigt » autour d'un tableau et de quelques gâteaux, selon Sylvie Benzoni ; des nocturnes pour sensibiliser les jeunes étudiants et jeunes actifs ; des rencontres rassemblant mathématiques et autres disciplines ; des conférences cartes blanches pour que les chercheurs et chercheuses qui accueillent ou participent à la programmation scientifique à l'Institut Henri Poincaré exposent leur sujet auprès du grand public, etc.

Une autre manière de mettre les mathématiques à portée du public passe par l'art. C'est l'angle exploré par Patrice Le Gal, directeur de recherche au CNRS, à l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre⁴,



▼ Dans la grande galerie, le thème « Foules et fluides » est l'un des trois thèmes utilisés pour faire le lien entre les mathématiques et les autres sciences, via des jeux et des manipulations interactives.

également ambassadeur du projet. Au sein de la Maison Poincaré, il a conçu une visualisation du soliton, un concept mathématique qui désigne une onde solitaire et qui permet de modéliser de nombreux phénomènes – des raz de marées jusqu'aux ondes porteuses en télécommunication. « Notre approche met la médiation au cœur du musée – les visites guidées sont un vrai plus – et vise à mettre le public en contact direct avec des scientifiques », soutient Élodie Christophe.

Un espace double

En effet, le bâtiment comprend aussi, dans les étages, 1 100 m² réservés aux activités scientifiques de l'Institut Henri Poincaré : séminaires et colloques, accueil de scientifiques du monde entier avec le programme Research in Paris, etc. – des activités qui se développent fortement et pour lesquelles le bâtiment historique, situé juste en face et nommé en hommage au mathématicien Émile Borel, commençait à sembler étroit.

L'IHP représente ainsi l'un des lieux importants de rencontres mathématiques pour le CNRS, qui le soutient de longue date avec des personnels permanents et a contribué au projet de rénovation du bâtiment. « Les rencontres sont fondamentales pour la recherche en mathématiques, et notamment à l'IHP, institut reconnu par les mathématiciennes et mathématiciens de France et du monde entier », raconte Christophe Besse, évoquant les nombreux espaces de discussion et d'interaction « plus grands et plus agréables » que propose le nouveau bâtiment Perrin. « La Maison Poincaré va permettre au grand public de se mêler à cet environnement scientifique de haut niveau et de découvrir les mathématiques en train de se faire », résume le directeur. ▮

➕
À écouter « Tête-à-tête Chercheuse(s) », un podcast de Nathalie Ayi, mathématicienne ambassadrice de la Maison Poincaré.



► Une galerie de portraits est installée dans l'ancien bureau de Jean Perrin, qui met notamment en valeur la physicienne et chimiste Yvette Cauchois.



À lire

Histoire des sciences

Si pour la nouvelle année vous cherchez un calendrier original, il est tout trouvé ! À chaque jour son anecdote scientifique aussi succincte que bouleversante dans notre compréhension du monde. Qu'il s'agisse de la découverte de la masse de l'électron ou de celle de la nature de la foudre par Benjamin Franklin, en passant par la première datation de l'âge de la Terre, Denis Guthleben, historien au CNRS, nous propose de la lecture pour toute une année.

L'Odyssée de la science en 366 jours, Denis Guthleben, Dunod, sept. 2023, 376 p., 16,90 €.



L'âge d'or des astéroïdes

Depuis que l'on connaît le rôle joué par l'impact d'un corps de près de 10 km de diamètre dans la disparition des dinosaures, les astéroïdes ne sont plus considérés comme de simples cailloux volants mais comme des acteurs importants de l'histoire de la Terre et du Système solaire. L'astrophysicien Patrick Michel, qui a participé aux principales missions récentes d'exploration d'astéroïdes, nous révèle dans cet ouvrage ce que l'on sait de ces corps, de leur origine et de leur éventuelle exploitation : de leur rôle dans la présence d'eau sur Terre à l'inventaire de leurs ressources minérales, en passant par la possibilité de les dévier pour éviter un impact catastrophique avec notre planète.

À la rencontre des astéroïdes. Les missions spatiales et la défense de la planète, Patrick Michel, préface de Jean-François Clervoy, Odile Jacob, octobre 2023, 380 p., 25,90 €.



Aventure spatiale

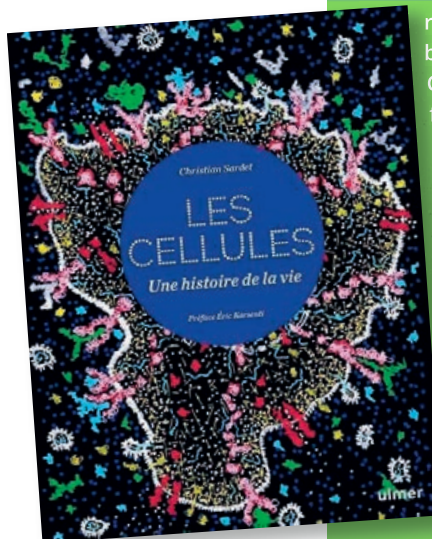
Dans ce livre riche en photos, Mathieu Grousson retrace le parcours du télescope spatial Euclid, du moment où il a été imaginé jusqu'à son lancement vers le point de Lagrange 2, en juillet 2023. Là, pendant six années, Euclid aura pour mission de cartographier une large portion du ciel et tentera d'apporter des explications aux mystères qui entourent l'origine de l'expansion de l'Univers en mesurant la distribution de la matière noire.

Euclid. Lumière sur l'énergie noire, Mathieu Grousson, Actes Sud, coll. « Nature », juin 2023, 216 p., 36 €.

Voyage au cœur de la cellule

Entre livre d'art et ouvrage de vulgarisation, ce livre richement illustré est l'œuvre d'un passionné de biologie cellulaire. Depuis le début de sa carrière, Christian Sardet cherche à mieux comprendre le fonctionnement des cellules, ces structures irréductibles du vivant et s'émerveille de leur diversité : ou comment la toute première cellule, ancêtre de toutes les autres, LUCA (*Last universal common ancestor*), a évolué pour former tous les organismes vivants. Christian Sardet, qui a fait partie de l'aventure Tara Océans et a contribué à révéler le monde fascinant du plancton océanique, possède aussi des talents d'artiste : il signe l'intégralité des dessins aux coloris vifs qui ponctuent l'ouvrage.

Les Cellules. Une histoire de la vie, Christian Sardet, préface d'Éric Karsenti, Éditions Ulmer, nov. 2023, 224 p., 35 €.



Le journalisme mis à l'épreuve

Dans cet ouvrage format poche, à travers une douzaine de contributions, un collectif de journalistes et de chercheurs analyse le rapport du journalisme à la vérité dans notre société en transformation, entre retour de la propagande et guerre informationnelle. Après notamment l'élection de Donald Trump ou l'« opération spéciale » en Ukraine, « et si, finalement, l'information des journalistes paraissait ne plus être nécessaire ? Et si, finalement, le règne de la "com" l'avait emporté au profit de tous les bonimenteurs ? », s'interrogent les auteurs.

Journalisme et « post-vérité », Alexandre Joux (dir.), coll. « Les Essentiels d'Hermès », CNRS Éditions, sept. 2023, 224 p., 10 €.



Los Ñetas, un gang très politique

SOCIÉTÉS



© MATTHEU PONCHEL

ENQUÊTE « *Nous sommes un gang, mais pas comme tu l'imagines : nous sommes des révolutionnaires.* »

De quoi attiser la curiosité de l'anthropologue Martin Lamotte, qui a enquêté pendant quatre ans sur le gang international Los Ñetas, ses codes et ses métamorphoses, du crime à l'action politique.

PROPOS RECUEILLIS PAR WARDA MOHAMED

Vous avez enquêté pendant plus de quatre ans sur le gang des Ñetas, aussi appelé la *Asociación* : quelle est son originalité par rapport à d'autres organisations criminelles ?

Martin Lamotte¹. D'abord, c'est une organisation dont la longévité est impressionnante puisqu'elle a été créée dans les années 1980 et existe encore. Ensuite, la trame historique et la transmission y ont une place très importante alors que d'habitude, ce type d'organisation a une durée de vie plus courte, traditionnellement de l'ordre d'une génération. Mais la particularité principale de ce gang c'est son ambiguïté car il a à la fois une composante criminelle et une composante politique : ses membres peuvent être partie prenante du marché de la drogue et des armes à feu et, en même temps, le groupe a un ancrage politique très fort.

À Porto Rico par exemple, Carlos Torres Iriarte, chef fondateur du gang, est devenu très proche du parti socialiste dont il a protégé des prisonniers politiques indépendantistes en prison. À New York, dans les années 1990, les Ñetas ont assuré le service d'ordre

lors de manifestations contre les violences policières, incité les jeunes à s'inscrire sur les listes électorales ou aidé aux campagnes politiques de certains élus dans le South Bronx (*zone comprenant des quartiers de la partie sud de l'arrondissement new-yorkais du Bronx, Ndlr*). Enfin, ils ont une pratique de l'écriture très importante, de type bureaucratique : les réunions donnent lieu à des comptes-rendus et les secrétaires tiennent des comptes pour le système de banque interne, le *fondo*. Surtout, les Ñetas ont écrit un livre, le *Liderato*, qui décrit en détail l'histoire de Carlos Torres Iriarte, l'association, ses règles... Cette institutionnalisation de l'écrit caractérise le gang.

Pouvez-vous nous en dire plus sur l'histoire criminelle des Ñetas ?

M. L. Les Ñetas sont nés en 1981 dans les prisons de Porto Rico quand le père fondateur de la *Asociación*, surnommé Carlos La Sombra, « l'ombre », a été assassiné par un gang rival, le Grupo 27. Si Carlos Torres Iriarte a fondé le gang, ce sont ses amis qui, en tuant la plupart des membres du Grupo 27 pour venger sa mort, ont en

quelque sorte acté la naissance des Ñetas. À Porto Rico, le gang est uniquement présent en prison. Entre 1980 et 1990, les Portoricains, qui sont citoyens américains, sont partis à New York lors de grandes migrations économiques vers les États-Unis. Ceux d'entre eux qui ont été détenus dans la prison new-yorkaise de Rikers Island y ont relancé les Ñetas. Puis, au début des années 1990, pour la première fois de l'histoire de la *Asociación*, des ex-prisonniers de Rikers Island l'ont développée à l'extérieur en créant des *chapters* (« sections », *Ndlr*) dans les rues de Brooklyn et du South Bronx.

Mais en 1994, Rudy Giuliani², élu maire de New York, mène une politique de tolérance zéro et traque les Ñetas, impliqués dans le trafic de drogue. Au même moment, le groupe se déploie dans toute la ville et au-delà : deux prisonniers équatoriens de Rikers Island expulsés à Guayaquil (*ville de la République d'Équateur, Ndlr*) y ont implanté la *Asociación* et, dans les années 2000, la *Asociación* s'établit en Espagne à Madrid et à Barcelone, en Italie à Gênes, en République dominicaine, au Canada et en Russie.



À lire :

Au-delà du crime. Ethnographie d'un gang transnational, Martin Lamotte, CNRS Éditions, 2022, 328 p.

1. Laboratoire Cités, territoires, environnement et sociétés (CNRS/Université de Tours). 2. Maire de New York de 1994 à 2001. Membre du Parti républicain, Rudy Giuliani est l'une des figures du système judiciaire américain sous la présidence de Ronald Reagan, étant notamment procureur général associé des États-Unis puis procureur fédéral à New York.



© SPENKER PLATT/GETTY IMAGES/AFP

► Prison de Rikers Island, New York, octobre 2004. Dans les années 1980-1990, des Portoricains venus à New York lors des grandes migrations économiques vers les États-Unis ont relancé les *Ñetas* au cours de leur incarcération dans ce centre pénitentiaire.

alimentés par des postures de chercheurs un peu cavalières. En discutant avec des collègues anthropologues qui ont enquêté sur le Parlement européen, je me suis rendu compte que mon terrain était beaucoup plus accessible et plus facile à mener sur certains aspects.

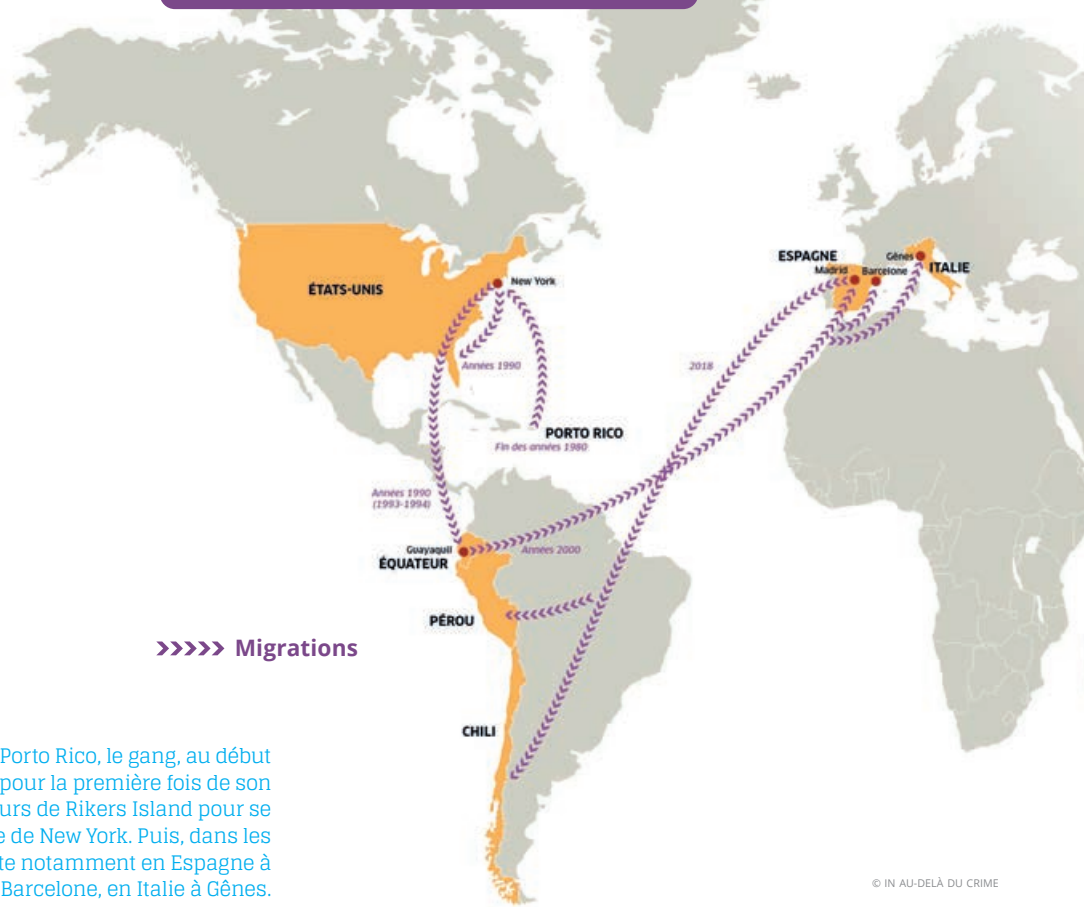
Des leaders des *Ñetas* vous ont déclaré : « *Nous ne sommes pas un gang même si parfois nous agissons comme tel.* » Comment les membres définissent-ils leur organisation ?

M. L. Cela dépend des *Ñetas* et de l'interlocuteur auquel ils s'adressent. Par exemple, l'un d'eux m'a expliqué : « *Nous sommes un gang, mais pas comme tu l'imagines : nous sommes des révolutionnaires.* » Bebo m'a ainsi raconté qu'il avait été chef d'un gang important à New York puis, plus tard, il m'a dit que les *Ñetas* ne sont pas un gang. Donc la réponse varie en fonction de qui parle, avec qui, et quand. Je reprends ce terme car il permet de

Comment avez-vous établi le contact avec les *Ñetas* ?

M. L. J'ai rencontré les *Ñetas* par l'intermédiaire de l'un de leurs anciens présidents, que je nomme Bebo dans mon livre (*Au-delà du crime. Ethnographie d'un gang transnational, Ndlr*). Bebo travaille aujourd'hui dans une association de quartier auprès de laquelle je travaillais également. Un soir, alors que nous étions sortis avec des jeunes de l'association, il a commencé à me parler de son passé. Nous avons eu de nombreuses conversations à son bureau, puis chez lui, qui ont par ailleurs construit une solide amitié. Il m'a ensuite introduit auprès des membres du gang toujours en activité à New York et a écrit au chef du gang à Barcelone pour lui demander d'assurer ma sécurité. Mais finalement, il y a beaucoup de fantasmes sur ce genre de terrain,

Los *Ñetas* : de Porto Rico à l'international



»»»» Migrations

▼ Né dans les prisons de Porto Rico, le gang, au début des années 1990, va pour la première fois de son histoire sortir des murs de Rikers Island pour se déployer dans toute la ville de New York. Puis, dans les années 2000, il s'implante notamment en Espagne à Madrid et à Barcelone, en Italie à Gênes.

l'insérer dans la littérature scientifique et parce que le président du groupe à New York parle du passage du *gang banging*, c'est-à-dire du groupe criminel, au *gang organizing*, en référence aux organismes communautaires des quartiers dédiés à l'amélioration des conditions de vie. Ici, le terme « gang » est toujours utilisé mais la nature de ce qu'il signifie évolue.

Quelles dynamiques sociales et anthropologiques favorisent l'émergence de ce type d'organisations ? Sont-elles présentes dans toutes les sociétés capitalistes ?

M. L. L'anthropologue Dennis Rodgers a travaillé sur les gangs au Nicaragua et a établi des comparaisons entre ce type de groupes. Il explique ainsi que les gangs sont situés, c'est-à-dire qu'ils reflètent le contexte local dans lequel ils s'inscrivent. Ce sont également des structures dynamiques, qui se transforment dans le temps. Par exemple, les *Ñetas* ne sont pas le même groupe à New York en 1990 ou à Barcelone en 2011 ; et le rapport à l'État varie. Néanmoins, ce sont toujours des populations exclues du

▲ Les *Latin Kings*, gang rival des *Ñetas*, et les *Latin Queens* remontent la 5^e Avenue à New York lors de la Journée portoricaine (*The Puerto Rican Day*), en l'honneur des personnes de naissance ou d'origine portoricaine.

“La particularité principale du gang des Ñetas, c'est son ambiguïté car il a à la fois une composante criminelle et une composante politique.”

marché du travail, d'une forme de socialisation et souvent considérées comme étrangères. Les *Ñetas* sont racisés à Barcelone et à New York, où ils comptent parmi les populations les plus précaires.

C'est un phénomène assez classique des sociétés capitalistes. Le terreau social est là mais attention, on ne trouve pas forcément des gangs et des gangsters dans tous les ghettos pauvres. D'ailleurs, dans les travaux du sociologue Frederic Trasher (1892-1962, *Ndlr*) qui a écrit dans les années 1920 aux États-Unis, les gangs n'étaient pas définis uniquement par la criminalité. C'est à partir des années 1970 et de la guerre contre la drogue déclarée par l'administration Nixon qu'ils ont été perçus sous l'angle criminel uniquement.

Justement, si l'une des figures majeures des Ñetas reconnaît que « la Asociación est un mouvement de prisonniers, donc les membres ont commis des crimes », ces derniers luttent aussi contre les violences et trafics, rejoignant alors la politique de « pacification » étatique. Pourquoi les études, le discours politique et médiatique se focalisent-ils exclusivement sur les violences qu'ils exercent ?

M. L. Aux États-Unis, la criminologie punitive est née dans le contexte très répressif des années 1970 puis 1980-1990 : après avoir été considérés comme la conséquence des conditions de vie des ghettos durant la guerre contre la pauvreté, les gangs en ont été présentés comme la cause, donc comme l'ennemi.

D'un point de vue politique, Rudy Giuliani n'aurait eu aucun intérêt à reconnaître que des gangs ne sont pas seulement criminels et qu'ils participent à la pacification des quartiers populaires, car il voulait imposer une politique répressive. En revanche, la Mairie de Barcelone et l'État de Catalogne ont invité Bebo et des membres du gang des *Latin Kings* pour leur faire signer des traités de paix. Les reconnaître permettait de stopper les guerres de gangs, de les contrôler et aussi de leur faire confiance. Il valait mieux travailler avec eux que lutter contre eux.

Les Ñetas parlent souvent de justice, un dirigeant vous a dit : « Être Ñeta, c'est avant tout lutter contre l'abus sous toutes ses formes, s'entraider et progresser aussi bien individuellement que collectivement afin de vivre en paix. » S'agit-il de leur idéologie ?



À lire

M. L. Oui, l'un des slogans des Ñetas est *Progresar y vivir en paz (S'améliorer et vivre en paix, Ndlr)*. Il est inscrit sur la page principale du *Liderato*, ce qui montre son importance. À l'origine, il s'agissait de lutter contre les abus de l'administration carcérale puis cela a été étendu à tous les abus.

La Asociación a fini par obtenir un statut officiel dans plusieurs pays, ce qui a mené ses membres à négocier avec des partenaires politiques, dont la police. Ce groupe a-t-il dû s'institutionnaliser pour continuer à exister ?

M. L. Il s'agit en effet de savoir ce qu'il reste des Ñetas avec cette pacification et cette institutionnalisation. À Barcelone, ils sont reconnus comme acteur social et politique. La Asociación est légalisée en Équateur et l'État de New York reconnaît la « Asociación Pro Derechos Del Confinados Ñeta Inc. Nyc » en tant qu'« association caritative ». Les leaders savent gérer un groupe, des jeunes, donc cela représente un intérêt. Cependant à New York, leur pacification correspond à une phase de transformation interne et de déclin, à laquelle d'autres éléments participent : affaiblissement du marché du crack, lourdes peines pour les petits vendeurs de rue, gentrification de New York, forte précarisation dans leur trajectoire de vie...

Pourquoi les membres de la Asociación se soumettent-ils à un cadre quasi religieux, une stricte hiérarchie et de potentielles lourdes sanctions en cas de manquements qui reproduisent ce qu'ils combattent à l'extérieur de leur organisation ?

M. L. Ils reproduisent le type d'organisation qu'ils connaissent mais la différence majeure c'est qu'ils sont reconnus. Dans la Asociación, ils peuvent être des Portoricains, des Latinos, une fierté s'en dégage. Il y a une revendication de cette altérité : c'est une inversion du stigmatisme. ||

La forêt expliquée à tous

La forêt est devenue depuis une dizaine d'années un sujet politique majeur de nos sociétés menacées par la crise environnementale et climatique. Puits de carbone, réservoir de biodiversité, elle régule également les précipitations. Exploitée par l'humain depuis des millénaires, elle est le creuset d'un imaginaire collectif fait de contes et légendes. Croisant écologie, archéologie et histoire, ce livre



de Stéphanie Thiébauld, qui a dirigé l'Institut écologie et environnement du CNRS de 2013 à 2021, lève le voile sur cet écosystème indispensable à la survie de la planète et de l'humanité.

La Forêt. Histoire, usages, représentations et enjeux, Stéphanie Thiébauld, CNRS Éditions, juin 2023, 384 p., 27 €.

Les trous blancs à la première personne

Tandis que les trous noirs ont définitivement quitté leur statut d'objets hypothétiques, cet ouvrage s'intéresse à un autre type de corps envisagés par la théorie mais encore jamais observés : les trous blancs, qui naîtraient de l'évolution ultime des trous noirs lorsque ces derniers finissent de s'évaporer. Dans ce récit à la première personne, Carlo Rovelli raconte ce que la gravité quantique à boucle – une théorie qui tente d'unifier relativité générale et modèle standard de la physique des particules – prédit de ce qui se passe à l'intérieur des trous noirs jusqu'au point où s'inverse le temps et naissent les trous blancs.



Trous Blancs, Carlo Rovelli, Flammarion, sept. 2023, 176 p., 19 €.

Gallia, 80 ans de recherche en archéologie

Née dans le sillage de la création du CNRS, la revue *Gallia – Archéologie des Gaules* a pour vocation de centraliser la publication des recherches archéologiques et les résultats des fouilles sur le territoire français. Depuis sa création, la revue a publié 140 volumes et 93 suppléments et s'est imposée comme une référence du domaine, proposant dossiers thématiques et articles de synthèse sur les découvertes les plus récentes.

Dans son numéro anniversaire, *Gallia* publie un article retraçant cette riche histoire, qui épouse à la fois les évolutions de la recherche archéologique en France et celles du CNRS. Sa longue histoire éditoriale témoigne du dynamisme de l'archéologie française : la revue, publiée par CNRS Éditions depuis 1947, est à l'origine de la création des revues *Gallia Préhistoire* en 1958 et *Archéologie de la France – Informations* en 1987.

Loin d'être figée, la recherche archéologique est en mouvement et les acquis récents sont nombreux. C'est ce qu'a démontré le colloque « Regards croisés sur l'archéologie nationale », qui s'est tenu le 5 décembre 2023 à l'université Paris Nanterre et qui a réuni des intervenants de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap), du ministère de la Culture, du CNRS, du musée d'archéologie nationale, de la MSH Mondes et de nombreux archéologues.

Revue Gallia – Archéologie des Gaules, n° 80-2, CNRS Éditions, déc. 2023, 236 p., 52 €.





de Denis Guthleben,
historien au CNRS

Prêter l'oreille à Pascal

Si l'on prenait le temps, juste pour cette fois, de s'éloigner des sujets sans cesse urgents qui marquent l'actualité de la recherche ? Et de tourner le dos à cette messagerie qui déborde, à ces dossiers qui s'accumulent, à ces publications qui piétinent ? Nous pourrions alors prêter l'oreille à une voix qui nous parle à travers les siècles : celle de Blaise Pascal, né il y a 400 ans, en 1623, à Clermont – aujourd'hui Clermont-Ferrand – en Auvergne.

Faire dialoguer les sciences

A priori, cette voix-là n'est pas à la portée du premier venu, ni des suivants d'ailleurs. Inutile de se jeter sur les écrits de Pascal en géométrie et de vouloir percer sa méthode des « indivisibles », par exemple, sans disposer de solides connaissances en mathématiques et en histoire des sciences. Ou de se lancer dans la lecture de A à Z de ses célèbrissimes pensées, que soit dit en passant le savant ne destinait pas à une édition groupée, sans maîtriser le contexte de leur rédaction : les experts eux-mêmes débattent encore, et on peut difficilement leur en vouloir, du sens à attribuer à des extraits aussi sibyllins qu'« un bout de capuchon arme 25 000 moines »... Mais tout le monde peut s'y retrouver à d'autres moments, et méditer avec Pascal comme lorsqu'il soutient que « tout le malheur des hommes vient d'une seule chose, qui est de ne savoir pas demeurer en repos dans une chambre. »

“ Pascal, pionnier de l'interdisciplinarité ? Ce serait anachronique de l'affirmer [...]. Néanmoins, là comme ailleurs, le génial penseur a beaucoup à nous enseigner ! ”

En dépit de la richesse de son œuvre, qui embrasse mathématiques, physique, cosmologie, théologie et tant d'autres domaines, et se révèle d'autant plus époustouflante que Pascal est mort dès 1662, à l'aube de sa quarantième année, un fil conducteur la caractérise. Et ce fil guide le dialogue entre toutes les sciences que Pascal explore au cours de sa

vie : l'être humain, ce « monstre incompréhensible » – mais « tout ce qui est incompréhensible ne laisse pas d'être », donc il ne faut pas renoncer à l'étudier pour saisir sa place dans la Nature, jusque dans le « silence éternel des espaces infinis », ou au sein des sociétés dans lesquelles il évolue tant bien que mal, et plus souvent mal que bien. Alors, Pascal, pionnier de l'interdisciplinarité ? Ce serait anachronique de l'affirmer à une époque où la recherche n'avait pas encore débuté ce mouvement de spécialisation dont on tente désormais de gommer les effets. Néanmoins, là comme ailleurs, le génial penseur a beaucoup à nous enseigner !

Un « roseau pensant »

Pour celles et ceux qui estimeront que malgré tout l'esprit de Pascal plane à des altitudes inaccessibles, on rappellera qu'il a volontiers posé les pieds sur terre, tirant de ses études théoriques des applications on ne peut plus concrètes. En 1639, attristé de voir son père Etienne noyé sous un déluge de chiffres après avoir été chargé de lever les impôts en Normandie, le jeune Blaise conçoit pour lui une machine à calculer capable d'effectuer toutes les opérations de base, soustraction, division, mais aussi et surtout, car c'est hélas souvent dans ce sens-là que vont les impôts, addition et multiplication. Et on lui doit aussi la conception du premier dispositif de transports publics urbains, les « carrosses à cinq sols » suivant des parcours définis et accessibles pour une somme modique – la première ligne à Paris roulait de la rue Saint-Antoine au Luxembourg, en passant par le Châtelet.

Mais ce Pascal ingénieux et ingénieur, qui sait s'appuyer sur ses travaux pour alléger le fardeau de ses contemporains, invite aussi à remettre la science à sa juste place. À ses yeux, elle ne vise pas à rendre les humains « comme maîtres et possesseurs de la Nature », ainsi que l'indiquait au même moment et non sans réserves Descartes. Mais elle participe de leur conscience et fait que « l'Homme n'est qu'un roseau, le plus faible de la nature », certes, mais « un roseau pensant » – et cette quête de la connaissance dans tous les registres, scientifiques et bien au-delà, façonne sa « dignité ». Osera-t-on suggérer une lecture pour poursuivre la réflexion au-delà de cette page bien trop courte ? L'œuvre de Pascal vient de faire l'objet d'une belle édition « du 400^e anniversaire ». Cet ouvrage¹ est d'ailleurs sobrement baptisé *L'Œuvre* : ses auteurs se sont gardés de la qualifier de « complète », bien conscients que de Pascal, il est vain de prétendre faire le tour... II

1. *Pascal. L'Œuvre*, Laurence Plazenet et Pierre Lyraud (eds.), Bouquins, 2023.

SOUTENEZ LA RECHERCHE

FAITES UN DON À LA FONDATION CNRS



© Frédérique Pias/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

#15 actuellement
en vente
en librairie et Relay
200 pages / 14 €



Entrez dans
les coulisses
de la recherche



CNRS ÉDITIONS

www.carnetsdescience-larevue.fr