

Trimestriel n° 310
DÉCEMBRE 2022

CNRS

LE JOURNAL



Climat :
des dérèglements
mieux cernés

AU BOTSWANA,
le delta qui fascine
les scientifiques

PEPR, des
programmes pour
préparer l'avenir

Entretien avec
Alain Aspect, Prix Nobel
de physique 2022

SOUTENEZ LA RECHERCHE

FAITES UN DON À LA FONDATION CNRS



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.

Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

Téléphone : 01 44 96 40 00**E-mail :** lejournald@cnrs.fr**Le site Internet :** <https://lejournald.cnrs.fr>**Anciens numéros :**<https://lejournald.cnrs.fr/numeros-papiers>**Directeur de la publication :**

Antoine Petit

Directeur de la rédaction :

Jérôme Guilbert

Rédacteur en chef :

Mathieu Ravaut

Rédactrice en chef adjointe :

Charline Zeitoun

Chefs de rubrique :

Laure Cailloce, Saman Musacchio, Yaroslav Pigenet

Rédactrices :

Sophie Félix, Laurence Stenvot

Ont participé à ce numéro :

Sebastián Escalón, Denis Guthleben, Mathieu

Grousseau, Martin Koppe,

Louise Mussat, Brigitte Perucca

Secrétaire de rédaction :

Émilie Silvoz

Direction artistique :

David Faure

Iconographes :

Anne-Emmanuelle Héry, Sophie Léonard

Gestionnaire :

Mathieu Chatellier

Assistant de direction :

Frédéric Roman

Illustrations :

Julien Pacaud / Talkie Walkie

Fred Péault

Impression :

Groupe Morault, Imprimerie de Compiègne

2, avenue Berthelot – Zac de Mercières

BP 60524 – 60205 Compiègne Cedex

ISSN 2261-6446

Dépôt légal : à parution



Photos CNRS disponibles à :
contact-mediathèque@cnrs.fr
<https://images.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 :

Un éléphant profite de la crue de l'Okavango, au Botswana

© CYRIL FRESILLON/CNRS PHOTOTHÈQUE

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

Abonnez-vous gratuitement sur :

» lejournald.cnrs.fr/abojournal

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



“La physique française occupe une belle place au niveau mondial, avec pas moins de 4 prix Nobel en 15 ans.”

Le prix Nobel de physique 2022 attribué à Alain Aspect a enchanté la communauté des physiciennes et des physiciens. Nous espérons vivement cette récompense tant les expériences d'Orsay, comme on y fait souvent référence, représentent une contribution fondamentale à la compréhension de la physique quantique, mais aussi un des points de départ de la révolution quantique d'aujourd'hui.

À l'heure actuelle, où l'on parle beaucoup de risque et de rupture, son parcours prouve une fois encore que la recherche fondamentale peut aboutir à des solutions innovantes : oui, comme il le dit très justement, l'obtention d'un poste de permanent jeune lui a permis de prendre des risques ; oui, comprendre le monde qui nous entoure grâce à des expériences, des modèles physiques simples, des simulations ou des théories peut aboutir à des ruptures utiles à la société. Alain Aspect profite ainsi des interviews pour affirmer avec raison l'importance de la physique aujourd'hui pour résoudre les urgences énergétiques et environnementales.

Attention cependant, le quantique ne doit pas devenir l'arbre qui cache la forêt : la physique française occupe aujourd'hui une belle place au niveau mondial, avec pas moins de quatre prix Nobel en quinze ans sur des sujets significativement différents, allant du laser à la spintronique. Décrivez dans ce numéro, l'expérience

Microscope testant le principe d'équivalence est un autre beau succès en physique fondamentale. Parmi les Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) mis en place ces derniers mois et que le CNRS copilote, l'Institut de physique (INP) anime les programmes Quantique et Spin qui mettent en avant les technologies quantiques et la spintronique. Mais nous sommes également impliqués dans plusieurs autres, dont Diadem et Luma sur la thématique des matériaux et l'interaction lumière-matière.

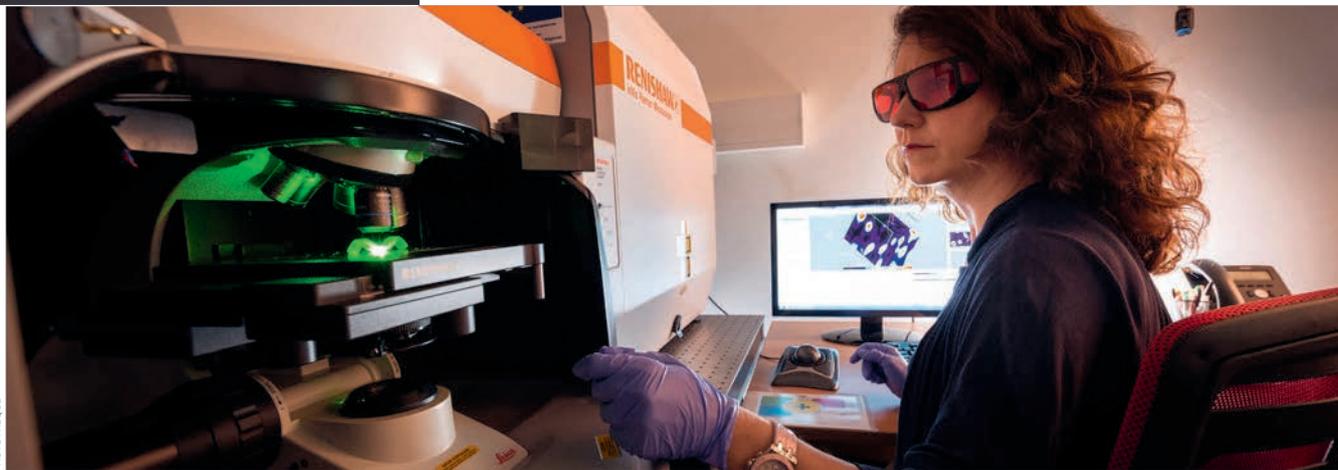
La prospective en cours à l'INP devra être accompagnée d'une communication renouvelée pour

attirer les futurs talents, d'autant plus que l'image de la physique à l'école s'est indéniablement effritée (et le nombre d'heures qui lui sont consacrées), peut-être davantage encore que celle des mathématiques, et tout particulièrement auprès des jeunes femmes. Julien Bobroff, lauréat 2022 de la médaille de la médiation scientifique (comme Jean-Michel Courty l'an dernier) se prête au jeu en racontant au plus grand nombre les recherches récentes en physique et comment se fait la science. Enfin, 2023-2024 sera l'Année de la physique, une autre grande occasion de renouveler profondément l'image de la discipline auprès des scolaires et du grand public.

Thierry Dauxois,
directeur de l'Institut de physique (INP) du CNRS



© CYRIL FRESILLON / CNRS PHOTOTHÈQUE



© JEAN-CLAUDE MOSCHETTI/RENCIUS PHOTOTHÈQUE

GRAND FORMAT

15

L'Okavango, un delta au milieu du désert	16
La recherche au cœur de France 2030	32

06

Alain Aspect,
Prix Nobel de
physique 2022

© JOEL SAKETI/AFP

EN PERSONNE 5

Entretien avec Alain Aspect, Prix Nobel de physique 2022 ...	06
Le partage des sciences mis à l'honneur	10
Entretien avec Anca Vasiliu, Grand Prix de philosophie de l'Académie française	12
Brèves	14

44

Épisodes extrêmes :
la faute au
dérèglement
climatique ?

© BENJAMIN CIEBIELE/AFP

EN ACTION 43

Épisodes extrêmes : la faute au dérèglement climatique ? ...	44
Le réchauffement en France s'annonce pire que prévu	46
Déviations d'astéroïde : « Dart, c'est trois succès en un ! »	48
La médiation, une démarche pour dépasser les conflits	50
Ces échantillons qui ont marqué l'histoire de la chimie	52
Les échappées inattendues du CNRS	54
Sur la planète rouge, deux rovers en quête de vie	56

60

Du quark
à l'Univers,
la physique d'un
infini à l'autre

© SPL / SPRINGEL, VOLKER / MPI FOR ASTROPHYSICS

LES IDÉES 59

Du quark à l'Univers, la physique d'un infini à l'autre	60
Brèves à voir, à lire	62
En attendant la chute du principe d'équivalence	64

LA CHRONIQUE

2022, année de l'égyptologie	66
------------------------------------	----

EN PERSONNE



*Rencontre avec un Nobel à l'origine
de l'actuelle révolution quantique,
une philosophe exceptionnelle et de
talentueux passeurs de science.*

Alain Aspect :

« Ces expériences ont validé l'étrange description du monde donnée par la mécanique quantique »

MATIÈRE

PORTRAIT Avec John Clauser et Anton Zeilinger, Alain Aspect est lauréat du prix Nobel de physique 2022 pour ses travaux ayant permis de mettre en évidence la réalité de l'intrication quantique. Il revient pour le *CNRS le Journal* sur cette formidable aventure scientifique, ainsi que sur son parcours et sa vision de la recherche.

PROPOS RECUEILLIS PAR MATHIEU GROUSSON

Vous partagez cette année le prix Nobel de physique avec John Clauser et Anton Zeilinger pour vos expériences sur les fondements de la mécanique quantique. Comment avez-vous vécu l'annonce de votre prix Nobel ?

Alain Aspect¹. Quand je l'ai appris, je siégeais dans une commission de l'Académie des sciences. Mon assistante m'a appelé pour savoir si elle pouvait donner mon numéro de portable à Stockholm qui cherchait à me joindre ! J'ai raccroché et dit à mes collègues que je devais sortir pour recevoir un appel...

Qu'avez-vous ressenti ?

A. A. J'ai pensé à tous ces gens disparus à qui je dois d'en être arrivé là. À mon professeur de lycée à Agen qui m'a donné le goût de la physique telle que je l'ai pratiquée ensuite. À Christian Imbert, professeur à l'Institut d'optique, qui m'a fait confiance, à mes parents instituteurs qui auraient été époustoufflés et tellement heureux. Mais aussi à mon épouse qui m'a soutenu contre vents et marées, à mes enfants dont le père passait trop de temps au laboratoire. À Philippe Grangier et Jean Dalibard, alors tout jeunes étudiants de master, qui ont pris le risque de travailler sur une expérience dénigrée par beaucoup, aux ingénieurs et techniciens qui ont contribué à monter cette expérience...

Pouvez-vous nous expliquer en quelques mots l'objet des expériences qui vous ont valu la récompense suprême ?

A. A. Dans un article célèbre de 1935 coécrit avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, Einstein découvre que le formalisme quantique permet des situations dans lesquelles tout se passe comme si deux particules pouvaient échanger des informations instantanément, quelle que soit la distance qui les sépare. Plus précisément, dans ces configurations où les deux particules sont dites « intriquées », le formalisme quantique indique que toute mesure réalisée sur l'un des éléments de la paire semble influencer instantanément le résultat d'une mesure sur l'autre particule.

Pour Einstein, découvreur de la relativité, c'est un non-sens, d'où l'idée qu'il faut compléter la mécanique quantique en introduisant des propriétés supplémentaires portées par les particules dès leur départ, pour interpréter de façon plus raisonnable les prédictions quantiques. Dans un article publié quelques semaines plus tard, Bohr répond que le formalisme se suffit à lui-même, et qu'on ne peut pas le compléter sous peine d'affecter sa cohérence interne. Le débat porte donc sur l'interprétation à donner à un résultat de calcul sur lequel les deux physiciens sont d'accord. Mais en 1964, donc après la disparition d'Einstein et de Bohr, John Bell démontre que le débat va au-delà d'une question d'interprétation : certaines prédictions quantiques, dans des situations d'intrication jamais explorées jusque-là, sont en contradiction avec les conséquences du point de vue d'Einstein. On peut donc trancher le débat en faisant une expérience.

Après John Clauser qui fait la première expérience en 1972, nous avons réalisé au début des années 1980 une série d'expériences mettant en jeu des paires de photons – des particules de lumière – intriqués, qui ont apporté la

¹ Alain Aspect est directeur de recherche émérite au CNRS, au Laboratoire Charles Fabry (Institut d'optique Graduate School/CNRS), professeur à l'Institut d'optique Graduate School/Université Paris-Saclay, professeur affilié avec distinctions à l'ENS Paris-Saclay et professeur associé à l'École polytechnique.



© JOEL SAGET / APF

preuve que la mécanique quantique prédisait le bon résultat même dans les situations les plus extraordinaires, ce qui aurait sûrement beaucoup étonné Einstein. Nous avons ainsi démontré que dans l'univers quantique, bien loin de l'intuition, deux particules pourtant séparées spatialement peuvent néanmoins constituer un système inséparable.

Pendant longtemps, la plupart des physiciens ont vu dans cette controverse initiée par Einstein moins une question de physique qu'une simple question d'interprétation de la mécanique quantique par ailleurs triomphante. Comment en êtes-vous venu à vous y intéresser ?

A. A. En 1974, alors à la recherche d'un sujet susceptible de m'intéresser pour mon doctorat d'État, je prends connaissance de l'article de John Bell de 1964 dans lequel

il reformule l'expérience de pensée d'Einstein sous une forme qui permet en principe d'en tester concrètement les conséquences. Sous sa plume, le point de vue d'Einstein prend la forme d'inégalités dont la violation expérimentale serait la preuve de la validité de la mécanique quantique même dans cette situation encore jamais explorée.

En 1972, John Clauser et Stuart Freedman font un premier test expérimental des inégalités de Bell en mesurant la corrélation de polarisation de paires de photons intriqués. Mais beaucoup reste à faire pour réaliser une expérience collant au raisonnement de Bell. Il apparaît en particulier nécessaire de trouver une technique permettant de choisir l'orientation des polariseurs servant à mesurer la polarisation des deux photons après l'émission de ces derniers. C'est en effet la seule façon de garantir que l'orientation d'un polariseur n'influera pas d'une manière ou d'une autre sur la réponse de l'autre polariseur – distant – ou sur l'état dans lequel le couple de particules est émis. Après quelques jours de réflexion j'en trouve une solution. J'en avise Christian Imbert qui me dit qu'il est prêt à parrainer et financer mon expérience à la condition que John Bell donne un avis favorable à ma proposition, ce qu'il fait ! Je me mets donc au travail.

Concrètement, comment se présente la situation ?

A. A. Tout est à construire en partant de zéro ! En revanche, l'Institut d'optique offre un environnement scientifique et technique remarquable. Les ateliers et les bureaux d'études y sont ...

“Dans l'univers quantique, bien loin de l'intuition, deux particules pourtant séparées spatialement peuvent néanmoins constituer un système inséparable.”

exceptionnels, et grâce au soutien de Christian Imbert, j'ai la possibilité de recruter un opticien, Gérard Roger, et un électronicien, André Villing, dont les savoir-faire seront extrêmement précieux pour la réalisation du montage expérimental.

En parallèle, de plus en plus de physiciens s'intéressent à votre travail...

A. A. Effectivement, pour mener à bien mon projet, je sollicite de nombreux physiciens à qui je commence par expliquer ce que j'ai en tête. Or à chaque fois je constate que s'ils acceptent de m'écouter, ils sont rapidement convaincus que c'est un sujet intéressant, à l'encontre de leur préjugé négatif... Je reçois ainsi notamment une aide précieuse de physiciens du Laboratoire Kastler Brossel, en particulier de Bernard Cagnac et Frank Laloë, ainsi que du laboratoire d'électronique du Département de physique nucléaire à basse énergie au CEA Saclay. C'est aussi à cette période, en 1978, que je fais une première expérience avec Claude Cohen-Tannoudji (prix Nobel de physique 1997) avec qui je collaborerai par la suite.

D'une grande complexité, votre expérience est assemblée pas à pas avec patience et rigueur. À quel moment êtes-vous enfin prêt ?

A. A. Je me suis fixé une règle d'airain : ne pas tester les inégalités de Bell tant que chaque sous-partie de l'expérience n'aura pas été testée et validée, afin de n'introduire aucun biais. Je réalise ainsi ma première expérience en 1981 avec Philippe Grangier qui m'a rejoint pour son stage de DEA puis sa thèse de troisième cycle. Précisément, nous reproduisons l'expérience de Clauser, mais en quelques minutes contre des centaines d'heures. De plus, les polariseurs que nous utilisons pour mesurer la polarisation de chaque photon sont à six mètres de la source, soit pour la première fois au-delà de la longueur de cohérence des photons, ce qui exclut une échappatoire envisagée par Wendell Furry suivant laquelle l'intrication disparaîtrait à une distance suffisamment grande. Résultat : les inégalités de Bell sont violées.

Viennent ensuite deux autres expériences...

A. A. L'année suivante, pour se rapprocher du schéma théorique discuté par Bell, nous utilisons de nouveaux polariseurs qui permettent d'obtenir les deux résultats possibles dans une mesure de polarisation, alors qu'on ne détectait qu'un seul résultat auparavant, l'autre étant déduit d'une calibration annexe. Nous refaisons l'expérience qui viole les inégalités de Bell avec une signification statistique inouïe, en parfaite conformité avec les prédictions de la mécanique quantique. Reste alors à mettre en œuvre l'expérience dans laquelle l'orientation des polariseurs sera

“ La mise en évidence de la réalité de l'intrication quantique et les applications qui en découlent constituent ce que j'aime appeler la « deuxième révolution quantique ». ”

choisie en quelques nanosecondes, après l'émission des photons, ce qui sera fait avec Jean Dalibard qui effectue son service militaire à mes côtés comme scientifique du contingent. Cette fois-ci preuve est faite que même dans une situation où cela aurait beaucoup étonné Einstein, la mécanique quantique est validée.

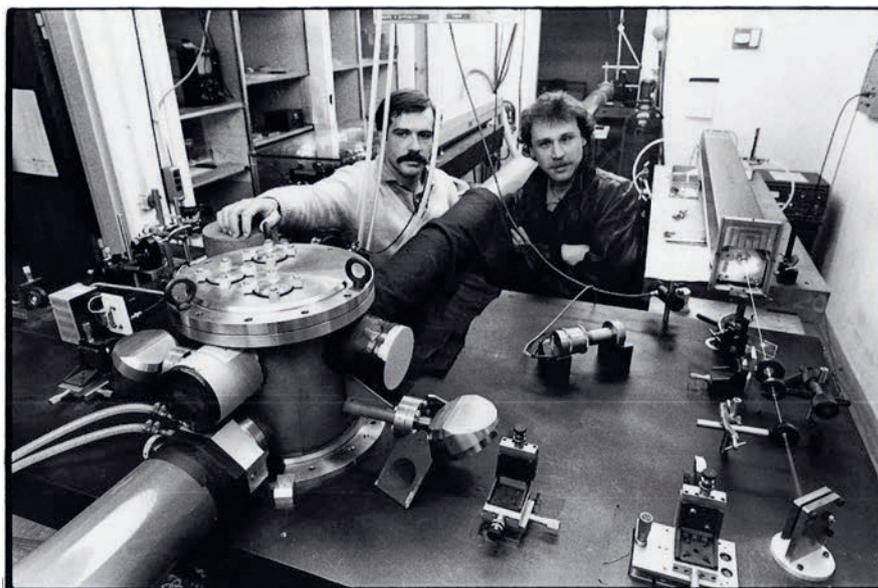
Que ressentez-vous alors ?

A. A. Je me dis « Enfin ! » L'idée remonte à 1974, je vois Bell en 75, on est en 82... Le résultat me déçoit un peu, car intellectuellement c'est la vision du monde d'Einstein qui m'attire le plus, mais en tant qu'expérimentateur, je n'avais pas d'a priori et je prends acte du résultat. Il en est de même de John Bell, qui m'a beaucoup influencé.

Vos expériences closent-elles toutes les questions sur les inégalités de Bell et la complétude, ou pas, de la mécanique quantique ?

A. A. La science avance par confirmation – ou infirmation – de résultats antérieurs par des expériences toujours plus précises. Ainsi, au milieu des années 1990, Anton Zeilinger, aujourd'hui colauréat avec moi du prix Nobel, m'informe qu'un de ses étudiants, Gregor Weihs, veut refaire ma

▲ Dans son laboratoire de l'Institut d'optique en 1981.





▼ Conférence de presse à l'Institut d'optique, Université Paris-Saclay, le 4 octobre 2022, jour de l'annonce de l'attribution du prix Nobel de physique.

manip en choisissant l'orientation de ses polariseurs de manière totalement aléatoire alors que je le faisais d'une façon quasi-périodique, compte tenu de la technologie existante. Lorsqu'en 1998, Zeilinger et Weihs publient leurs résultats qui concordent avec les miens, j'avoue que je me sens soulagé, car un résultat scientifique n'est acquis que s'il est reproduit dans un autre laboratoire, dans une expérience qui n'est jamais strictement identique.

Cela dit, c'est moins pour cette dernière expérience qu'Anton Zeilinger partage avec vous le prix Nobel que pour ses travaux sur la téléportation quantique ?

A. A. En montrant que l'intrication quantique était une réalité nouvelle, nous avons ouvert la voie à toute une série de manipulations de ces états qui ont par exemple conduit Anton Zeilinger à réaliser la première expérience de téléportation de l'état quantique d'une particule sur une autre distante. La mise en évidence de la réalité de l'intrication quantique et les applications qui en découlent constituent ce que j'aime appeler la « deuxième révolution quantique ». Parmi ces applications inédites, citons la cryptographie quantique, qui permet des communications inviolables, la métrologie quantique, qui permet de mesurer avec une précision accrue par exemple des accélérations et des rotations ; et bien sûr l'ordinateur quantique, qui pourrait permettre de réaliser des calculs inaccessibles aux ordinateurs classiques.

D'une façon générale, quelle est votre vision de l'articulation entre recherche fondamentale et recherche appliquée ?

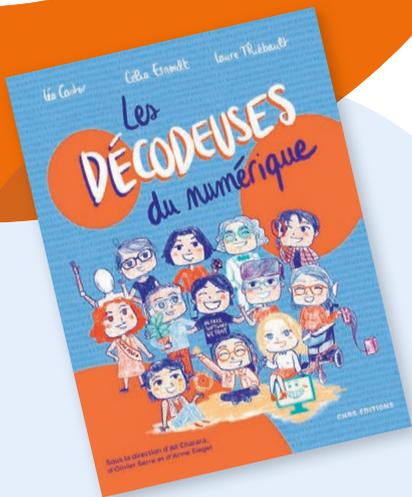
A. A. Au début de ma carrière, la coupure était nette. Mais quand à la fin des années 1980, le théoricien Arthur Ekert m'a expliqué que mes expériences lui avaient inspiré son

protocole de cryptographie quantique, je me suis dit que cette séparation n'avait pas de sens. Par la suite, j'ai toujours dit à mes collaborateurs que s'ils avaient une idée d'application de leurs travaux, il ne fallait pas hésiter à la développer. Ce n'est pas par hasard que l'on retrouve aujourd'hui nombre de mes étudiants dans les start-up quantiques, de Pasqal à Muquans et d'autres !

Allez-vous vous servir de votre prix pour porter des messages ?

A. A. Absolument ! Comme je l'ai fait après avoir reçu la médaille d'or du CNRS, en 2005, je vais me servir du porte-voix qui m'est offert pour marteler deux choses : d'une part qu'il faut davantage de crédits pour la recherche, et de plus des crédits qui arrivent plus vite dans les laboratoires ! Par ailleurs, que la société a plus que jamais besoin de science. Le jour de la conférence de presse qui a suivi l'annonce du prix Nobel, à l'Institut d'optique, une étudiante m'a apostrophé sur le fait que tout cela était bien joli mais ne répondait pas aux attentes de sa génération préoccupée par le devenir de la planète. Je lui ai répondu qu'il est essentiel de sauver la planète, mais qu'on n'y parviendra pas sans la science. Et pour lui montrer que ces questions sont aujourd'hui dans nos têtes, j'ai indiqué qu'il n'était pas déraisonnable de penser que l'ordinateur quantique pourrait peut-être faire les mêmes calculs qu'un ordinateur classique en consommant beaucoup moins d'électricité. Je pense qu'il y a quelques années nous ne nous serions pas posé ce genre de question. ||

Le partage des sciences mis à l'honneur



Les informaticiennes mises en lumière

Les sciences du numérique souffrent d'un déséquilibre de parité. Pour y remédier, la cellule parité-égalité de l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions (INS2I) du CNRS, avec le soutien et le financement de sa direction, a souhaité mettre en avant les chercheuses, enseignantes-chercheuses et ingénieures de la discipline. « *Nous voulions donner la parole à des femmes scientifiques d'aujourd'hui, loin des clichés*, relate Laure Thiébault, membre de la cellule composée de scientifiques et de communicants. *L'emploi de la bande dessinée comme support d'expression*

moderne et désacralisé s'est très vite imposé. » Résultat : douze portraits réalisés par l'illustratrice Léa Castor, incarnant la science en train de se faire dans autant de thématiques en résonance avec de grands enjeux sociétaux. La BD *Les décodeuses du numérique* (CNRS Éditions, 2021) cumule déjà près de 12 000 exemplaires vendus ou distribués. 3 000 lycées et un collège sur cinq en France l'ont reçue, accompagnée de supports complémentaires en ligne.

En photo, les membres de la cellule parité-égalité de l'INS2I : Anne Siegel, Olivier Serre, Laure Thiébault, Pierre Chesnais, absente pour la photo Célia Esnault, ainsi que l'illustratrice-auteurice Léa Castor (au centre).

ÉVÉNEMENT Pour la deuxième année, le CNRS remet cinq médailles de la médiation scientifique, dont un prix spécial, à des femmes et des hommes qui mettent la science au cœur de la société. Il ont reçu ces récompenses le 18 novembre des mains de Sylvie Retailleau, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

PAR SOPHIE FÉLIX



Carolyn Scheurle nous embarque sur l'océan

Après une formation pluridisciplinaire en géosciences, c'est naturellement que Carolyn Scheurle, coordinatrice du pôle Culture Océan de l'Institut de la mer de Villefranche*, s'est tournée vers la médiation : « *Je cherche à établir un pont entre la science et le monde non académique, et à mettre en relation la société avec l'océan* », précise l'ingénieure de recherche à Sorbonne Université. Le programme éducatif « Adopt a float » fait partie des actions qu'elle a élaborées dans ce but. Déjà plus de 2 000 jeunes dans le monde ont adopté, avec leur

classe, un robot sous-marin du programme scientifique OneArgo, piloté par l'Ifremer et coporté par le CNRS. Ils suivent leur robot en temps réel dans son « voyage » dans l'océan, avec l'aide de ressources éducatives sans cesse enrichies. « *Notre approche permet de rendre très concrète la démarche scientifique, mais aussi de révéler l'importance de l'océan dans la régulation et l'évolution du climat, et finalement d'insister sur la nécessité de l'étudier pour mieux comprendre son fonctionnement et le protéger* », assure la lauréate.

* Unité CNRS/Sorbonne Université.





Julien Bobroff partage la physique autrement

« Je cherche à renouveler l'image de la physique auprès du plus grand nombre, raconter les recherches récentes, et la façon dont se fait la science », explique Julien Bobroff. Son sujet favori : la physique quantique. Professeur à l'université Paris-Saclay et chercheur au Laboratoire de physique des solides*, il fonde en 2013 l'équipe « La Physique Autrement » où il développe des collaborations originales avec des designers et des créateurs en tous genres. Des conférences confinées, un mini-cirque en lévitation, des paysages quantiques, le livre le plus

froid du monde... il a déjà co-créé près de trois cents projets mis à la disposition du public. « J'aime explorer de nouveaux outils pour mettre la physique, même la plus abstraite, à la portée de tous et toutes ! », détaille le physicien. Unaniment reconnu comme l'un des acteurs incontournables de la médiation scientifique en physique, il s'engage aussi dans une véritable démarche de chercheur sur ces sujets, appliquant les résultats à ses propres enseignements et les diffusant auprès de sa communauté de recherche.

* Unité CNRS/Université Paris-Saclay.

PRIX SPÉCIAL

Jean Claude Ameisen sur les épaules des géants

« On voit plus loin, sur les épaules des géants. » Chaque samedi durant plus de dix ans sur France Inter, seul au micro, Jean Claude Ameisen a interrogé notre humanité face aux bouleversements du monde. Dans son émission Sur les épaules de Darwin, qui réunissait chaque semaine plus de 1,5 million d'auditeurs et a reçu plusieurs prix, il abordait des sujets éclectiques, de la théorie de l'évolution aux travaux scientifiques les plus récents, accompagnés par des textes d'écrivains, scientifiques, artistes et poètes. « Ressentir permet de mieux comprendre,

et comprendre permet de mieux ressentir », dévoile ce médecin, immunologiste, spécialiste reconnu de la mort cellulaire programmée (ou apoptose), ancien directeur de l'unité Inserm U415 à l'Institut Pasteur de Lille, et président d'honneur du Comité consultatif national d'éthique. Auteur de plusieurs livres, dont *La Sculpture du vivant : le suicide cellulaire ou la mort créatrice* (Seuil, 1999), il milite pour que la démarche scientifique soit « une composante à part entière de notre culture, comme les arts ou la philosophie ».



Étienne Ghys promoteur des mathématiques

Directeur de recherche émérite au CNRS* et secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences depuis 2019, Étienne Ghys a fortement contribué à développer la diffusion des mathématiques en France. Livres grand public, films pédagogiques, livre audio dédié aux malvoyants, pilotage de l'Année des mathématiques, conférences... le chercheur varie autant les supports que les publics et les sujets.

Fervent défenseur de l'utilisation de l'image, il crée en 2009 la version en ligne du journal *Images des mathématiques*, dont l'objectif

est de montrer les avancées récentes de la recherche mathématique mais aussi ses aspects historiques, culturels et sociologiques, et qui cumule plus de dix millions de vues. Ses activités de diffusion ont déjà obtenu plusieurs récompenses et poussent la communauté mathématique internationale à renforcer et améliorer les actions de médiation scientifique. « Je m'efforce de partager avec le plus grand nombre le plaisir que procurent les mathématiques », résume le chercheur de renommée internationale, lauréat de la médaille d'argent du CNRS dès 1991.

* Au sein de l'Unité de mathématiques pures et appliquées (CNRS/ENS Lyon).



«Avoir la connaissance de son image, c'est déjà avoir une conscience de soi»

SOCIÉTÉS



ENTRETIEN Spécialiste de philosophie grecque classique et tardive, Anca Vasiliu reçoit en décembre le Grand Prix de philosophie de l'Académie française pour l'ensemble de son œuvre, dans laquelle elle explore les rapports entre image, langage et pensée à travers la relecture des textes anciens.

PROPOS RECUEILLIS PAR BRIGITTE PERUCCA

Historienne de l'art en Roumanie, vous êtes devenue philosophe en France. Quel a été le cheminement qui vous a menée de l'art propre au christianisme byzantin à la pensée de l'Antiquité classique et tardive ?

Anca Vasiliu ¹. En travaillant sur l'art médiéval byzantin, j'ai été amenée à travailler sur les sources, sur les éléments d'inspiration qui ont été ceux des artistes byzantins. Je me suis rendu compte qu'il me fallait acquérir une bonne connaissance des langues anciennes pour aborder les textes et saisir la pensée qui les sous-tend. Cela peut sembler inhabituel, mais c'est un chemin tout naturel. J'ai donc fait le choix de reprendre des études et de me plonger dans le grec.

En Roumanie, les études d'histoire de l'art incluaient une formation artistique. Dessin, peinture, modelage, nous devions mettre la main à la pâte, reproduire le geste antique, et ce pour acquérir une connaissance intime des œuvres. Car le regard sur une œuvre passe aussi par la main. La pratique artistique aide à comprendre

comment un objet singulier devient une œuvre universelle. Cela m'a beaucoup aidée dans l'étude des textes et des œuvres. Savoir scruter la langue transforme la lecture en attisant le regard et en nourrissant l'imagination ; elle permet aussi d'accorder une attention particulière à chaque détail.

Pourquoi avez-vous choisi de partir pour la France ?

A. V. À cette époque, à la fin des années 1970, deux obstacles s'opposaient à mes projets : d'abord en Roumanie, il n'était pas permis de suivre une deuxième formation universitaire. Vous deviez travailler après l'obtention de votre diplôme. Ensuite parce que la philosophie classique n'était tout simplement pas au programme, seule la philosophie marxiste était enseignée. J'ai donc choisi de partir en France, car le français était une langue familière, que j'avais apprise à la maison, ce qui n'était pas rare à l'époque dans le monde roumain francophile et francophone.



À lire :

Montrer l'âme.

Lecture du Phèdre de Platon, Vrin/Presses de Sorbonne Université, 2021, 484 p., 18 €.

Dire et voir. La parole visible du Sophiste, Vrin, coll. "Bibliothèque d'histoire de la Philosophie", 2008, 384 p., 32 €.

Du diaphane, Dire et voir, Images de soi, Montrer l'âme : votre œuvre philosophique est traversée par la question de la représentation, de l'image. Comment définiriez-vous votre objet de recherche ?

A. V. Le postulat de ma recherche est que le regard, la pensée et la parole s'articulent de façon organique. Le langage produit des images – et non pas nécessairement l'inverse – en vue de rendre accessibles la pensée et la connaissance des choses. C'est un processus de connaissance qui passe par les moyens de l'expression dans lesquels se complètent la parole et la capacité de la parole à produire des images. Pour les philosophes grecs classiques, la naissance de l'objet visible n'est pas seulement une question de regard, de visualité, c'est quelque chose de conceptuel.

Aristote, qui définit le diaphane dans le sillage de Platon, le définit dans le cadre de la recherche optique. Mais pour définir ce qu'on voit par la vue et le regard, il est obligé de passer par la lumière et de définir la lumière comme une condition d'accessibilité à la visibilité des choses. Pour nous, qui connaissons la nature physique de la lumière, les choses paraissent évidentes ; mais pas pour les Anciens. J'ai compris en travaillant sur le traité *De l'âme* mais aussi sur le *Traité des sens* puis sur la *Métaphysique* que pour les Anciens, les questions de la pensée et de la vision sont liées et complémentaires. La manière dont la rationalité de la pensée exprime

1. Directrice de recherche au CNRS, au Centre Léon Robin de recherches sur la pensée antique (CNRS/Sorbonne Université).



► La philosophe Anca Vasiliu en octobre 2022.

Apulée le présente au contraire comme une nécessité, celle de se connaître lui-même en tant que philosophe, puisque tel est le titre qu'il se donne. En analysant ce texte, on comprend que la question de l'image qu'on a et qu'on donne de soi est centrale à la conscience qu'on a de soi. Avoir accès à l'image de ce que nous sommes est le chemin qui mène à la connaissance de ce que nous sommes. Cette idée n'est pas propre à Apulée. Elle est présente dans une constellation de textes de l'Antiquité tardive.

Ces images auxquelles se réfèrent les philosophes anciens ont-elles quelque chose en commun avec le siècle de l'image dans lequel nous vivons ?

A. V. Le monde actuel parle (et vit) uniquement d'images visuelles, de ce qui se conçoit comme image et se donne à voir au point de rendre captifs le regard et l'être entier. Or la pensée antique a une autre compréhension des images. Le visuel n'y est pas prioritaire mais ce sont la pensée et le langage qui sont créateurs d'images et travaillent avec elles. Les Anciens créent à dessein des figurations et, en apprenant les arts du langage, ils apprenaient aussi à voir et à utiliser les vertus cognitives inscrites dans la visibilité révélée des choses. Le monde était une image, mais parce qu'il y avait un sens de le concevoir comme une image ; le monde n'était pas donné en photos ou en projections virtuelles de ce qui n'est pas accessible à l'œil nu. Quand Phidias crée la statue d'un dieu, il crée visiblement l'invisible à partir d'un art qui articule divinement les données du visible. Les images du monde actuel sont un voile, non le résultat d'un dévoilement, d'une révélation de la phénoménalité qui s'offre à la vision et à la pensée. ||

l'expérience perceptive – visuelle dans le cas précis – fait qu'elles sont indéfectiblement reliées. C'est sur ce socle conceptuel que j'ai construit ma démarche de philosophe.

Il n'y a pas de pensée sans image dans la philosophie classique ?

A. V. Platon analyse le statut des images dans *Le Sophiste* par exemple, mais en même temps il utilise lui-même des images comme dans le *Phèdre* où tout le prologue montre la construction d'une image. Socrate et Phèdre se rencontrent dans un endroit précis d'Athènes, sortent et vont se promener au bord d'une rivière en cherchant l'ombre d'un platane. Cette image, toute tissée de topoï empruntés à la littérature homérique, est construite de manière telle que le sens du texte peut déjà commencer à cheminer dans l'esprit du lecteur. L'image ouvre la voie à la mise en

place de la thématique, ici la thématique de l'âme. La définition de l'âme ne peut se faire que dans le cadre d'une image donnée.

Pour forger son identité, l'humain a besoin d'une image de lui-même. Cette idée transforme-t-elle la question de la conscience de soi ?

A. V. Quand j'ai écrit le livre *Images de soi*, j'avais bien sûr en tête le « je pense donc je suis ». Mais mon souhait a été de partir de l'idée qu'avoir la connaissance de son image, c'est déjà avoir une conscience de soi. Tous mes travaux de recherche s'appuyant sur des textes, je suis partie d'un texte d'Apulée intitulé *L'Apologie*. L'auteur y raconte dans un récit dont on ne sait s'il est une fiction ou une histoire véritable, un procès qui lui est fait car il possède un miroir. Cette possession ferait de lui, selon ses accusateurs, un magicien, faiseur de sortilèges.

© FRÉDÉRIQUE PLUS



À lire :

Images de soi dans l'Antiquité tardive, Vrin, coll. "Bibliothèque d'Histoire de la Philosophie", 2012, 288 p., 29 €.

Du Diaphane. Image, milieu, lumière dans la pensée antique et médiévale, Vrin, coll. "Études de philosophie médiévale", 1997, 320 p., 40 €.



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



L'astrophysicienne
Bérangère Dubrulle

© SÉBASTIEN RIUATZ/CNRS PHOTOTHÈQUE

Les femmes scientifiques de l'année

Le 22 novembre, le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche a dévoilé les noms des quatre lauréates du Prix Irène Joliot-Curie. L'astrophysicienne Bérangère Dubrulle, directrice de recherche CNRS au Service de physique de l'état condensé, reçoit ainsi le Prix de la Femme scientifique de l'année. Nina Hadis Amini, chercheuse CNRS au Laboratoire des signaux et systèmes, se voit attribuer quant à elle le Prix de la Jeune femme scientifique. Céline Bellard, chercheuse CNRS au laboratoire Écologie, systématique et évolution, reçoit le Prix spécial de l'engagement. Enfin le Prix Femme, recherche et entreprise est attribué à Marjorie Cavarroc-Weimer, ingénieure d'études R&T/Groupe Safran.



© CYRIL FRESILLON/CNRS PHOTOTHÈQUE

Jérôme Guilbert, nouveau directeur de la communication

Antoine Petit, président-directeur général du CNRS, a nommé Jérôme Guilbert directeur de la communication à compter du 1^{er} novembre dernier. Jérôme Guilbert a une double expérience de direction générale d'agence de publicité – il a notamment dirigé l'agence McCann à Paris entre 2006 et 2013 – et de direction de la communication. Il a ainsi été directeur de la communication de Sciences Po entre 2013 et 2020, puis chez le réassureur Scor avant d'intégrer le cabinet de conseil Bain & Company à Paris comme directeur marketing. Diplômé de l'université de Paris-Dauphine, de Sciences Po et de la London Business School, il a enseigné à Sciences Po les stratégies de marque et la communication sur les risques.

Nominations en région

Le 1^{er} octobre, Jocelyn Méré a été nommé délégué régional CNRS Occitanie Ouest. Il succède à Christophe Giraud qui a pris de son côté la tête de la délégation Paris-Centre depuis le 17 novembre.

L'Académie remet ses prix

L'Académie des sciences remet chaque année près de 80 prix couvrant l'ensemble des domaines scientifiques. Cette année, le palmarès dévoilé à l'automne met à l'honneur près de 50 lauréats liés au CNRS.

Lire sur CNRS Info :
<https://bit.ly/3XqPeog>

Hervé Bertrand est nommé directeur de la sûreté du CNRS

Le 1^{er} novembre, Antoine Petit a nommé Hervé Bertrand fonctionnaire de sécurité de défense, directeur de la sûreté et conseiller aéronautique du CNRS. Il a auparavant effectué une carrière d'officier dans l'armée de l'air et de l'espace, et occupait depuis 2020 les fonctions d'inspecteur de l'armée de l'air et de l'espace avec le rang de Général de corps aérien. Il succède à Philippe Gasnot.



© COLL. PERS/D

8 C'est le nombre de projets impliquant des scientifiques du CNRS sur les 29 sélectionnés pour l'appel à projets ERC Synergy Grant 2022. D'une durée de six ans et d'un montant maximal de 10 millions d'euros, ces bourses sont conçues pour permettre à des groupes de deux à quatre scientifiques, de pays membres ou associés, de « s'attaquer à certains des problèmes de recherche les plus redoutables du monde, qui couvrent plusieurs disciplines scientifiques ».

Lire sur CNRS Info <https://bit.ly/3i2LMAe>

GRAND FORMAT



*Un voyage au Botswana pour découvrir
un écosystème hors du commun et une
excursion au cœur des tout nouveaux
programmes de recherche français.*



*L'Okavango,
un delta au milieu
du désert*

TERRE

VIVANT

REPORTAGE Au Botswana, il est un fleuve qui se « jette » littéralement au milieu du désert, créant un véritable paradis pour une incroyable faune : éléphants, zèbres, hippopotames... Des géologues français étudient de près ce phénomène géologique rare, dont le changement climatique pourrait bouleverser le fragile équilibre.

DOSSIER RÉALISÉ PAR LAURE CAILLOCE, ENVOYÉE SPÉCIALE À MAUN
PHOTOS CYRIL FRÉSILLON

Dans le nord du Botswana, le delta de l'Okavango est une immense oasis posée au beau milieu du désert du Kalahari. Vu du ciel, son cône vert de 170 kilomètres d'envergure offre l'aspect d'une gigantesque poêle à frire : au nord, la rivière Okavango venue des montagnes de l'Angola en figure le manche (le « Panhandle », littéralement le « manche de la poêle »), qui s'élargit vers le sud en une multitude de chenaux et de plaines d'inondation, sèches ou ennoyées selon la période de l'année. C'est dans l'une de ces plaines d'inondation que l'un de nos véhicules se trouve présentement embourbé, de l'eau jusqu'au châssis, en ce début juillet – en plein hiver, donc, de ce côté-ci de la planète. Partis de Maun, la ville située au sud du delta, en début d'après-midi, nous avons pourtant progressé à bonne allure à travers le bush, admirant depuis la piste les troupeaux de gnous, zèbres, impalas... qui s'enfuyaient à notre passage. Un vrai petit safari. Mais la réalité du delta nous a rattrapés : si les cinq premiers bras d'eau rencontrés ont pu être traversés sans encombre, celui-ci, plus profond, risque fort de nous clouer sur place à une paire d'heures de la tombée de la nuit.

Une multitude de chenaux, marais et plaines inondables forment l'écosystème exceptionnel du delta de l'Okavango.

“Chaque hiver austral, de mai à septembre, l'eau tombée en Angola durant la saison des pluies envahit le delta.”

« Chaque nouvelle mission dans l'Okavango nous réserve des surprises, car nous ne savons jamais à l'avance quelles conditions nous allons trouver, commente Marc Jolivet, l'un des quatre géologues avec qui nous avons pris la route. En quelques jours, une prairie de graminées jusqu'alors au sec peut se retrouver inondée... » C'est précisément la dynamique de cet étonnant delta que les chercheurs du laboratoire Géosciences Rennes¹, conduits par Marc Jolivet et Olivier Dauteuil, les deux responsables de la mission, sont venus étudier. Ce cône alluvial, formé par les sédiments charriés par la rivière Okavango, n'est en effet connecté à aucune mer : c'est un système complètement fermé. Délimité par deux failles, l'une au nord et l'autre au sud, il forme une légère dépression dans laquelle toute l'eau qui arrive se retrouve piégée. Un phénomène géologique rare, qualifié de « système endoréique », d'autant plus fascinant qu'il est contrôlé par une crue annuelle qui rend ses paysages extrêmement mouvants. « Chaque hiver austral (de mai à septembre), l'eau tombée en Angola durant la saison des pluies

©NASA IMAGE COURTESY MODIS RAPID RESPONSE TEAM, GSFC.

Le cône alluvial, formé par les sédiments charriés par la rivière Okavango, n'est connecté à aucune mer.



envahit le delta », explique Marc Jolivet. Il ne s'agit pas d'une crue soudaine : la région ayant une pente quasi nulle, de 0,01 % à peine, l'eau de la crue met quatre à six mois à gagner tout le delta et à en remanier profondément le paysage.

11 milliards de mètres cubes d'eau

La région de l'Okavango n'excite pas seulement la curiosité des scientifiques. Chaque année, des milliers de touristes viennent découvrir cet écosystème protégé, classé au patrimoine mondial de l'Unesco, et sa cohorte d'animaux sauvages, au premier rang desquels l'éléphant de savane dont le Botswana abrite un tiers de la population africaine. Un tourisme de lodges, haut-de-gamme, qui tombe aujourd'hui à pic pour l'équipe de chercheurs : après une bonne demi-heure de manœuvres infructueuses pour se sortir de cette mauvaise passe, deux énormes véhicules flambant neufs surgissent du bush et parviennent, grâce au robuste treuil métallique dont ils sont équipés, à arracher le 4X4 au chenal. Il ne nous reste plus qu'à filer jusqu'à la rivière Boro, où deux embarcations en aluminium nous attendent pour nous conduire jusqu'à notre destination finale : Chief's Island, l'île située au centre du delta, et plus précisément Nxaraga

1. Unité CNRS/Université de Rennes 1.



En route pour Nxaraga camp, le site d'observation de l'université du Botswana situé sur Chief's Island.

camp, un site d'observation de l'université du Botswana où nous bivouaquerons dans les trois prochains jours.

La lumière dorée du soleil d'hiver et l'apparente tranquillité du site où nous installons notre camp ne doivent pas nous abuser. « Ici, c'est le domaine des animaux et nous sommes leurs invités », avertit Kaelo Makati, ingénieur à l'Okavango Research Institute, qui collabore avec les chercheurs français durant toute leur mission dans le delta. Dans le chenal situé à quelques mètres, un hippopotame approuve dans un grognement sonore. Pour des raisons de sécurité, il est impossible de se déplacer seul en dehors du campement. C'est donc en groupe, et sans attendre car le planning des jours à venir est chargé, qu'Olivier Dauteuil et ses collègues gagnent à pied la station scientifique située à quelques centaines de mètres. Objectif : relever les données du GPS permanent implanté ici, et celles d'un mystérieux boîtier installé quelques mois plus tôt.

« À la base, je suis tectonicien, je travaille sur les déformations de la surface de la Terre, raconte le géologue. C'est pour cela que le delta de l'Okavango m'intéresse depuis dix ans déjà. Les deux failles qui le délimitent sont en effet les dernières failles de propagation du grand Rift africain qui traverse tout l'est de l'Afrique et vient mourir ici, sur le plateau sud-africain. Ces failles sont actives : la cuvette que forme le delta continue ... »





À la saison sèche, cette girafe trouve dans le delta de précieuses prairies à graminées.

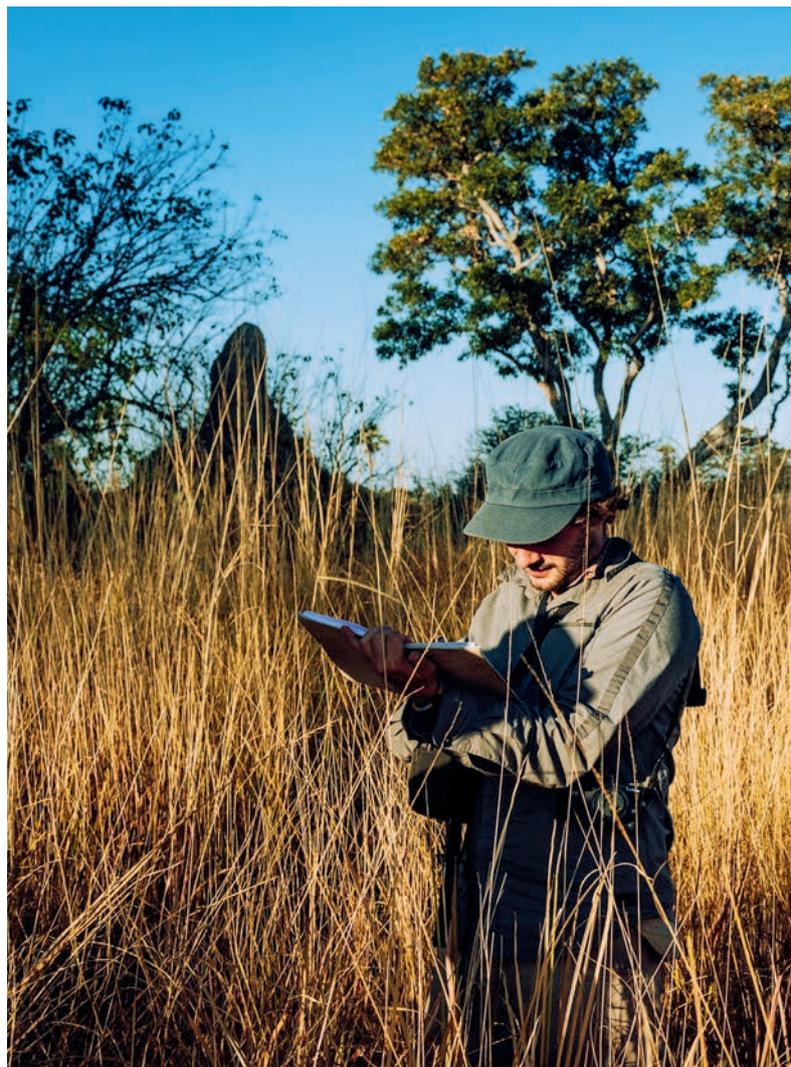
d'ailleurs de s'enfoncer dans le plateau austral, et nous avons aussi découvert que les failles coulissaient horizontalement de quelques millimètres chaque année. L'autre particularité de cette zone extrêmement complexe d'un point de vue géologique, c'est la crue qui descend tous les ans des montagnes d'Angola et charrie près de 11 milliards de mètres cubes d'eau, ou 11 milliards de tonnes pour le dire autrement ! » Sous le poids de l'eau, le sol bouge en effet de 2 à 3 centimètres chaque année, comme une véritable marée terrestre... Ce phénomène n'est pas propre au Botswana : en Bretagne, à Brest, le sol s'enfonce chaque jour d'une dizaine de centimètres sous l'effet de la marée haute. Sauf qu'ici, nous sommes en plein cœur du continent africain !

Pour avoir une connaissance fine des déformations du delta, le GPS, capable de donner avec une précision millimétrique l'altitude de n'importe quel point sur la planète, est l'outil de référence. Les géologues ont donc décidé d'en systématiser l'utilisation dans toute la région, malgré les difficultés d'accès. En plus des deux stations GPS permanentes installées ici à Nxaraga et dans la ville de Maun, qui effectuent des enregistrements en continu, sept points GPS répartis autour du delta sont ainsi mesurés tous les deux à trois ans par les chercheurs. « Ces points fixes sont matérialisés par une barre en métal fichée dans le sol, explique

Olivier Dauteuil. Nous venons y installer un GPS temporaire que nous relevons deux à trois jours plus tard, en croisant les doigts pour qu'il ne soit pas endommagé par une hyène trop curieuse – celles-ci ont la fâcheuse manie de ronger le matériel imprégné d'odeurs humaines ! »

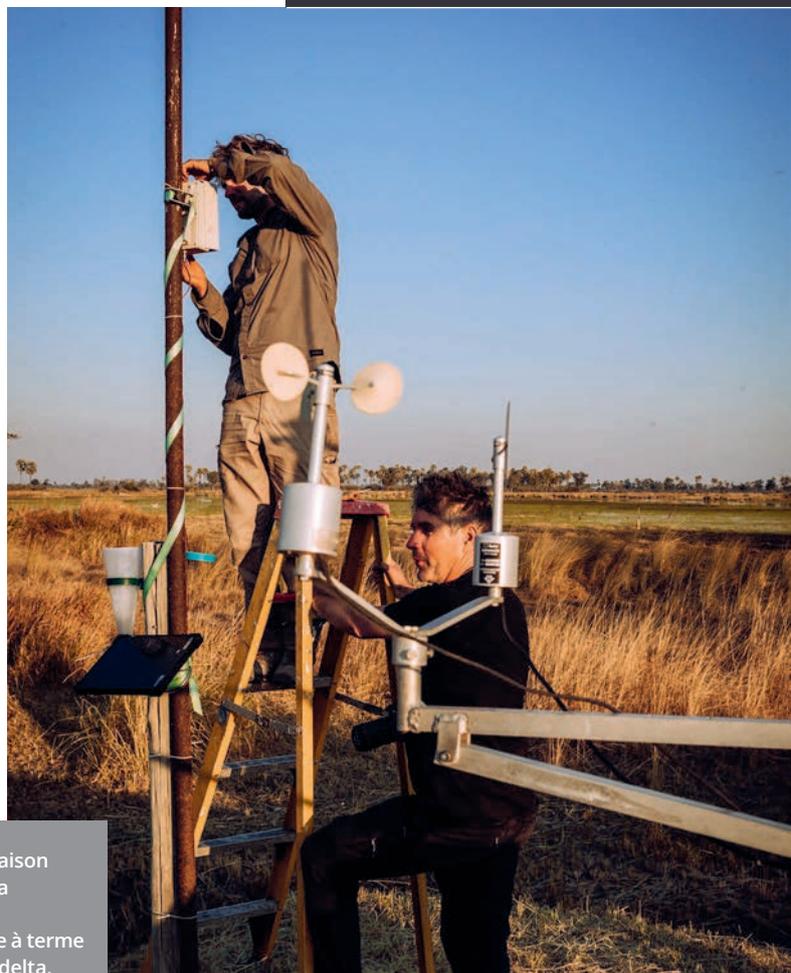
Cartographier la progression de la crue

Élément clef de la dynamique du delta, la manière dont l'eau se propage du nord au sud de la zone reste en grande partie un mystère pour les scientifiques. Des crues de grande ampleur succèdent à des crues plus modestes ou presque inexistantes comme cela s'est produit en 2019 ; certaines années, l'eau commence à diffuser par l'ouest du delta, d'autres par l'est ; des chenaux peuvent se combler avec l'apport de sable et de sédiments et d'autres, au contraire, s'élargir... Pour tenter de percer le fonctionnement de la crue, les chercheurs de Géosciences Rennes ont donc mis au point un nouveau type d'instrument : un petit boîtier multifonction, capable de faire des photos tout en enregistrant en continu les données de pression, température et humidité. Trois exemplaires de ce boîtier à bas coût – une centaine d'euros à peine, six cents avec le panneau solaire intégré – ont été installés en novembre 2021, dont un juste ici, à la station de Nxaraga. À terme, une vingtaine de ces capteurs pourraient être déployés dans le delta. Mais encore faut-il pour cela que les prototypes aient fait leurs preuves...



« Le capteur a été programmé pour faire une image par heure. Cela doit permettre de suivre en continu la progression de la crue dans le chenal », explique Louis Gaudaré, géologue spécialisé dans la géomatique (la cartographie), tout en tentant de forcer le couvercle du boîtier qui lui résiste. « En plus de la hauteur d'eau, l'idée est de pouvoir décrire avec précision le type de végétation (arbres, graminées) présente à l'image, mais aussi sa hauteur et sa densité. » L'objectif de cette série de photos : mieux calibrer les images satellites, afin de pouvoir cartographier de façon semi-automatique la progression de la crue. « Pour le moment, nous avons du mal à interpréter les données satellitaires de la zone, indique Olivier Dauteuil. Dans les chenaux, c'est facile, mais dans les plaines d'inondation, où l'eau se mêle à la végétation, c'est plus difficile. Or 75 % de l'eau qui migre avec la crue se retrouve dans cette zone mixte ! »

Le téléchargement des données du boîtier s'avère malheureusement décevant : démarré début novembre, l'enregistrement s'interrompt brutalement à la mi-décembre, pour ne reprendre qu'à trois reprises, le 6 février, le 28 mars et le 17 mai. Le constat sera le même pour le capteur installé à quelques kilomètres de là. Problème de panneaux solaires ? Les chercheurs en seront pour démonter les ins-



Décrire le type de végétation en un point et une saison donnés (ci-dessous), documenter avec précision la progression de la crue grâce à des capteurs photographiques (ci-dessus), devraient permettre à terme de mieux interpréter les données satellitaires du delta.



truments et les ramener à Rennes, afin d'y diagnostiquer la panne. « Dans des endroits isolés comme celui-ci, avec toutes les contraintes logistiques que cela suppose, on est content quand on a une donnée exploitable... », commentent, philosophes, les géologues.

Un système qui pourrait disparaître

Il en faut plus pour les décourager. Car la question de la dynamique du delta n'intéresse pas que les scientifiques : véritable poumon vert sur ce plateau aride et havre d'une faune et d'une flore exceptionnelles, le delta constitue une source de revenus touristiques importante pour le Botswana, et son évolution sur le long terme intéresse de près les autorités du pays, surtout lorsque le changement climatique s'en mêle... « Un système endoréique comme celui-ci ne dure pas éternellement », explique Olivier Dauteuil. On estime que le delta lui-même est apparu il y a environ dix mille ans. Il est l'héritier d'un grand lac qui couvrait une zone bien plus vaste, lequel lac a été en partie asséché lorsque la rivière Zambèze qui s'y jetait a trouvé le chemin de l'océan Indien...

« Pour l'heure, le delta de l'Okavango ne porte pas l'empreinte du changement climatique, poursuit Marc Jolivet. Les variations de crue constatées d'une année sur l'autre ne sortent pas du signal naturel... Mais une baisse trop importante du régime des pluies en Angola par exemple, qui est l'un des scénarios possibles pour l'avenir (un autre scénario est au contraire une augmentation des précipitations), pourrait avoir des ...

conséquences graves : nous avons montré lors d'une simulation numérique qu'une baisse de 10 % de la quantité d'eau se déversant dans le delta pourrait suffire à l'assécher, à terme. Une chose est sûre : la hausse des températures – elle est déjà de 1 °C ici – va augmenter le phénomène d'évaporation et modifier la composition de la végétation... »

Une autre menace, tout aussi inquiétante, guette le delta de l'Okavango : que ses eaux soient « capturées » par le fleuve Zambèze qui coule non loin de là, au niveau des chutes Victoria situées à la frontière entre la Zambie et le Zimbabwe. « La capture, c'est lorsqu'une rivière qui coule à côté d'une autre rivière se fait happer par celle-ci, suite à des phénomènes d'érosion », explique Marc Jolivet. Si aujourd'hui, 96 à 98 % de l'eau qui circule dans le delta est piégée sur place, cela pourrait ne pas durer. « Lors des épisodes de forte crue, le chenal situé le plus à l'est du delta de l'Okavango se connecte déjà à la rivière voisine (la Linyanti), elle-même séparée du fleuve Zambèze par un seuil de 3 à 4 mètres à peine, s'inquiète le géologue, spécialiste de géomorphologie. Impossible de dire avec certitude si ce seuil s'érodera, ni combien de dizaines ou de centaines d'années cela pourrait prendre, mais il constitue un vrai maillon faible et la possibilité est réelle que le delta soit un jour en totalité ou en partie siphonné par le Zambèze. »



Des centaines d'arbres sont morts de façon soudaine au centre de Chief's Island. Les chercheurs prélèvent une tranche de l'un d'eux pour analyse.



Soupçonnant un empoisonnement par une nappe phréatique polluée, ils forent pour en avoir le cœur net.

Changement de décor. Pour la dernière journée passée sur le site, l'équipe de géologues a décidé de quitter les rives du chenal et de s'enfoncer en pick-up dans la savane forestière qui occupe le centre de Chief's Island. Ils ont repéré en remontant l'historique de Google Earth un étrange phénomène : des centaines d'arbres morts de façon soudaine, entre 2009 et 2012, un vrai paysage de désolation. Marc Jolivet soupçonne un empoisonnement et aimerait en avoir le cœur net. Il a des raisons pour cela : juste au-dessous de Nxaraga camp, à environ trois mètres de profondeur, une nappe phréatique naturellement polluée fait l'objet d'une surveillance continue depuis les années 1970. Cette eau



Analyse de l'eau prélevée dans la nappe phréatique hyper-alcaline de Nxaraga camp.



hyperalcaline, d'un pH proche de 9 (celui de la soude caustique !) quand l'eau de surface du delta affiche un pH de 7, contient des concentrations très élevées de métaux et métalloïdes : vanadium, plomb, thorium, uranium, arsenic...

Un forage sous tension

La mort subite de dizaines d'acacias et de mopanes, deux arbres typiques du delta, lui serine une petite musique : et si la nappe phréatique polluée repérée près du campement s'étalait bien au-delà, et avait causé la mort des arbres en question ? « *Mon hypothèse, c'est que suite à une crue de forte ampleur – ce qui fut le cas des crues de 2010 et 2011, notamment –, cette nappe phréatique aurait pu remonter du fait des mouvements de sol et atteindre les racines des arbres* », expose Marc Jolivet.

Désireux d'en savoir plus, les chercheurs ont décidé d'aller forer le sol dans la zone où se trouvent les arbres morts. Le matériel utilisé, un carottier manuel requérant la force de deux personnes (une « tarière »), évoque plus les travaux forcés que la science moderne, surtout en plein soleil. « *Ce sont les contraintes du delta, lâche Marc Jolivet en plein effort. Les équipements que nous pouvons emmener sont limités en poids comme en encombrement – impossible de venir avec un groupe électrogène par exemple.* »

Tandis que le carottier s'enfonçait péniblement dans le sol et que des carottes en sont

retirées une à une, toute l'équipe est sur ses gardes et se tient prête à battre en retraite dans le véhicule à la moindre alerte. D'après Kaelo Makati, la zone dans laquelle nous nous trouvons est en effet une véritable nurserie pour éléphants, dans laquelle les mères emmènent leur progéniture gambader. Preuve qu'elles y viennent régulièrement : tous les mopanes ont été raccourcis par leurs soins, afin de pouvoir surveiller plus facilement les éléphanteaux ! Par chance, seul un mâle solitaire passe à proximité et s'éloigne sans montrer d'agressivité.

La chaleur et le temps qui file obligent les chercheurs à interrompre leur forage avant d'avoir trouvé ce qu'ils cherchaient – de l'eau – mais la présence d'argile humide leur donne l'espoir d'aboutir lors de leur prochaine mission. Avant de partir, ils tronçonnent dans un ultime effort – et toujours à la force des bras ! – deux arbres morts afin d'en ramener des tranches pour analyse. « *Chaque année, les arbres produisent de nouveaux cernes de croissance qui portent la trace des éléments chimiques puisés dans le sol. Logiquement, si empoisonnement il y a eu, on devrait y retrouver la trace des éléments chimiques responsables* », supputent les géologues, qui soumettront les rondelles au laser dès leur retour à Rennes.

« *On est obligés de se canaliser, car chaque nouvelle mission révèle d'autres pistes à explorer !* » plaisante Marc Jolivet, assis tout près du feu alors que la nuit et le froid tombent sur notre dernière soirée à Chief's Island. « *C'est la richesse de notre travail dans l'Okavango : il est profondément pluridisciplinaire, mêlant géologie, sédimentologie, hydrologie, écologie...* » Dès le surlendemain, les géologues partiront en canot et à travers une épaisse végétation explorer de nouvelles îles situées tout au nord du delta. Une expédition qui s'annonce très sportive. Vu du ciel, comme au ras de l'eau, le « *plus beau bureau du monde* », comme ils l'appellent, n'a pas fini de les étonner. ||

Nombreux dans les chenaux, les crocodiles du Nil peuvent mesurer jusqu'à cinq mètres de long.



Une mosaïque d'habitats

Dans le delta, les seuls endroits toujours au sec sont les « îles ». Ce ne sont parfois qu'un simple talus surmonté d'un arbre ou d'une termitière, comme celle sur laquelle est juché ce phacochère.

C'est une collection unique en son genre, précieusement conservée dans des tiroirs à l'abri de la lumière. Le Peter Smith Herbarium, du nom du botaniste qui a patiemment collecté tous les spécimens rassemblés ici, témoigne de l'incroyable diversité de la flore du delta de l'Okavango. « *Plus de mille espèces de plantes sont présentes dans le delta, dont beaucoup ne poussent nulle part ailleurs au Botswana car il y fait trop sec* », explique Mike Murray-Hudson, spécialiste de botanique à l'Okavango Research Institute (ORI), à Maun, où l'herbarium est progressivement numérisé. Parmi elles, des dizaines d'espèces de nénuphars, des herbacées, des graminées, des buissons aromatiques, des espèces d'arbres telles que le mopane, l'arbre à saucisse, les acacias, ou encore le Jackalberry tree dont les petits fruits âcres régaler les chacals (*jackal*, en anglais), mais aussi et surtout les éléphants qui n'hésitent pas à secouer ses branches pour les faire tomber...

25 000 îles

Dans cette zone humide vaste comme la Bretagne, la crue annuelle qui arrive d'Angola chaque hiver austral façonne des paysages en perpétuelle évolution. « *Un tiers du delta est toujours sous l'eau, ce sont les marais permanents*, explique Mike Murray-Hudson. *Les deux-tiers restants sont inondés de*

Le delta de l'Okavango concentre une flore et une faune sans équivalent dans cette région d'Afrique. Plus de mille espèces de plantes, des dizaines d'espèces d'animaux, éléphants, lions, oiseaux, etc., sont présentes grâce à un écosystème en perpétuel changement.

trois à six mois par an, environ huit années sur dix, ce sont les plaines d'inondation. Dans ces espaces submergés une partie de l'année seulement, on assiste à une véritable rotation de végétaux : les plantes de type aquatique en période de crue sont remplacées par des plantes terrestres lorsque l'eau a disparu, sans oublier tout un continuum de végétaux capables de tolérer les deux environnements. » Dernier paysage, typique du delta : celui des 25 000 îles, ces endroits toujours au sec qui émergent ici et là des plaines d'inondation. « *On parle d'îles, mais il peut parfois s'agir d'un simple talus*, précise Mike Murray-Hudson. *Elles sont faciles à reconnaître, c'est là que sont les arbres et les termitières – les termites ont en effet horreur de l'eau !* »

Il s'en est pourtant fallu de peu que cette zone aujourd'hui protégée, qui fait partie intégrante de la Transfrontier Conservation Area Kavango-Zambèze (ou Kaza TFCA) – une zone de conservation transfrontalière réunis-



L'herbarium conservé à l'Okavango Research Institute documente l'incroyable diversité des végétaux aquatiques et terrestres présents dans le delta.

sant le Botswana, l'Angola, la Namibie, la Zambie et le Zimbabwe –, ne disparaisse sous la pression du développement économique. « *Dans les années 1980, il était question de pomper l'eau du delta pour alimenter en eau la ville de Maun, mais aussi de creuser un canal depuis le delta pour irriguer la mine de diamants d'Orapa située à 250 kilomètres de là, raconte Mike Murray-Hudson. Ce dernier projet, avalisé par le gouvernement sans consultation des citoyens, a créé un tollé au niveau local et international. Finalement, tous les projets d'aménagement du delta ont été annulés, mais les gens d'ici ont réalisé combien on connaissait mal cet écosystème pourtant si particulier.* » C'est pour mieux l'étudier que l'Okavango Research Institute a été créé en 1994, il y a à peine trente ans donc, sous la férule de l'université du Botswana.

Des prairies fertiles en pleine saison sèche

Car sans le delta et sa variété d'habitats, la faune qui attire ici les amoureux de la nature, écologues ou amateurs de safari, ne serait pas ce qu'elle est. D'octobre à novembre, en pleine saison sèche et alors que les températures peuvent flirter avec les 40 degrés, les plaines d'inondation qui ont été gorgées d'eau par la crue offrent aux grands herbivores, troupes de buffles, zèbres, impalas, girafes, éléphants... de vastes prairies herbeuses où s'alimenter. « *Le delta exerce un véritable effet tampon*, explique Emily Bennitt, spécialiste des grands mammifères à l'ORI. ...



Il n'est pas très productif, les plantes qui y poussent n'ont pas forcément les mêmes qualités nutritives qu'à l'extérieur du delta, mais il permet aux animaux de passer la période critique. »

« Il y a une règle en Afrique australe qui stipule que l'abondance de la faune est directement corrélée à la quantité de pluie annuelle, ajoute Mike Murray-Hudson. Mais la région de l'Okavango fait mentir cet adage : ici, au milieu de l'hiver (la saison sèche dans le sud de l'Afrique, ndlr), il y a trois fois plus d'animaux que ce à quoi l'on devrait s'attendre ! » La population d'éléphants y est particulièrement impressionnante et peut atteindre plus de 120 000 individus – la plus grande concentration observée dans toute l'Afrique, où les pachydermes en fort déclin seraient à peine 450 000 selon l'Union internationale de conservation de la nature. Même les lions, d'ordinaire peu attirés par les zones humides, parviennent à surmonter leur aversion pour l'eau. Sur Chief's Island, la grande île centrale du delta, ils seraient plus de vingt-cinq... Un tel garde-manger vaut bien quelques concessions !

Si certains des animaux peuvent être observés tout au long de l'année – ainsi les hippopotames et les crocodiles

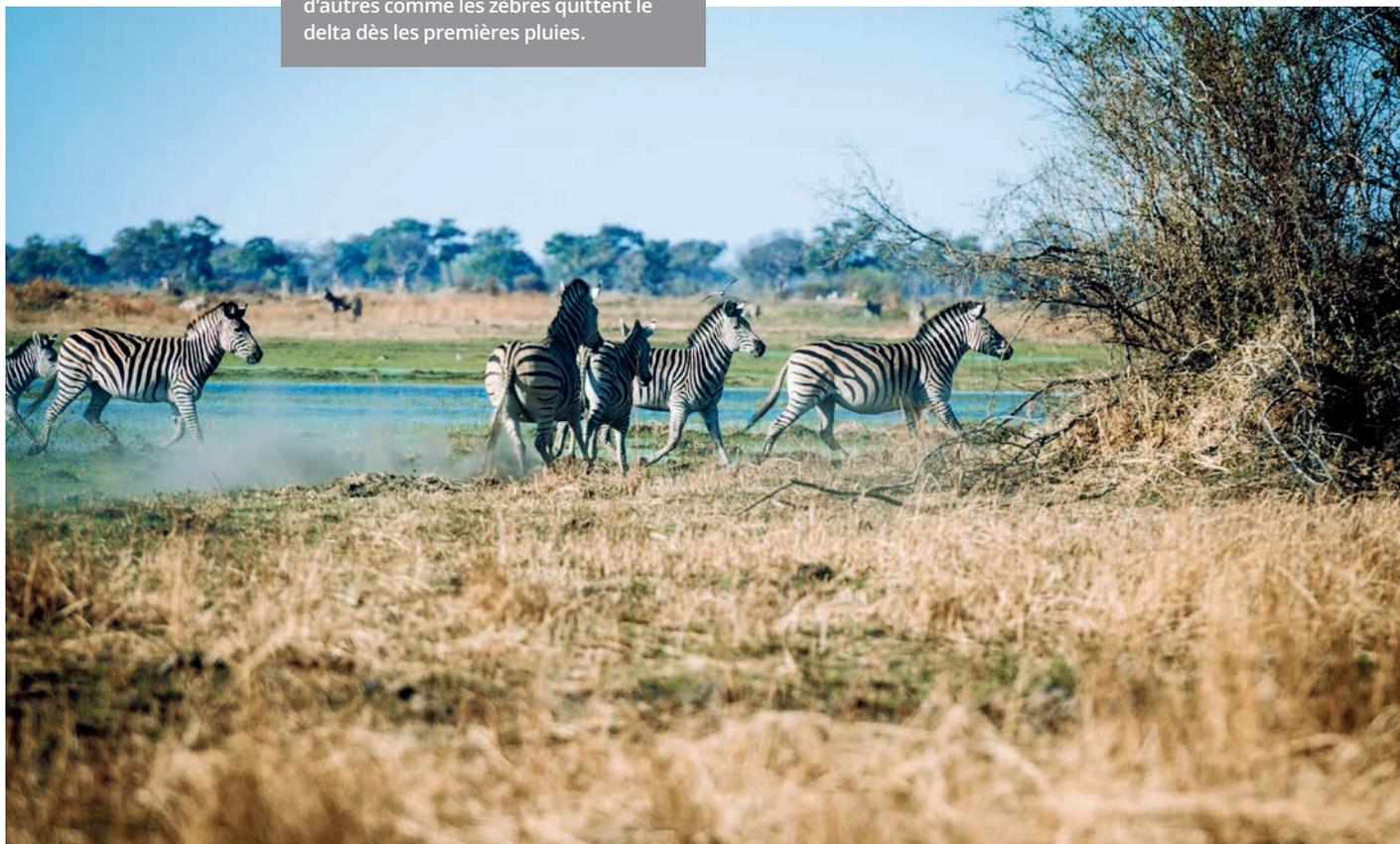
Si certains animaux – hippopotames ou crocodiles – passent toute l'année ici, d'autres comme les zèbres quittent le delta dès les premières pluies.

“Ici, au milieu de l'hiver, il y a trois fois plus d'animaux que ce à quoi l'on devrait s'attendre!”

se contentent lorsque la crue régresse de migrer de quelques centaines de mètres jusqu'aux mares résiduelles et aux marais permanents –, certains herbivores quittent le delta pour la savane forestière alentour dès le retour des premières pluies, en décembre. C'est le cas des éléphants, dont l'effectif au cœur du delta décroît alors brutalement. Certains zèbres de l'Okavango vont bien plus loin encore : on sait depuis une dizaine d'années seulement qu'à chaque saison des pluies, un groupe de 2 000 à 3 000 de ces herbivores parcourt plus de 250 kilomètres jusqu'à la région des Pans du Makgadikgadi (des étendues salées, résidus d'un vaste lac asséché), où ils rejoignent 25 000 de leurs congénères. Les scientifiques ont encore beaucoup à découvrir sur le delta. II

▶ À VOIR

Notre reportage vidéo « Au Botswana, un incroyable fleuve dans le désert » sur lejournal.cnrs.fr et nos reportages photo sur images.cnrs.fr



Les villageois de Ndorotsa, dans la région du Panhandle, témoignent des menaces que les éléphants font peser sur leur vie quotidienne.



Vivre en bonne entente avec les bêtes sauvages

Dans la région du Panhandle, au nord du delta de l'Okavango, des milliers de villageois subissent les conséquences de la cohabitation avec la faune sauvage : lions qui dévorent le bétail, éléphants qui détruisent les récoltes... Les chercheurs du projet Prosuli tentent de trouver des solutions.

Le 14 avril 2018, la vie de Kenna Baitishwenye a basculé. Ce jour-là, son mari est mort sur la route qui relie le hameau de Ndorotsa au village voisin de Seronga. Tué par un éléphant. « Une femelle est sortie du bush avec son petit. Elle allait boire à la rivière, et n'a pas vu mon mari », explique la veuve, qui nous reçoit sous un arbre dans la cour de sa maison, avec famille et voisins. Des drames comme cela, il s'en produit un tous les deux ou trois ans dans le district de Seronga. La présence de nombreux éléphants dans la région, surtout à la saison sèche qui les voit faire de nombreux allers-retours entre le bush et le delta nourricier, fait peser une menace quotidienne sur des milliers d'habitants. Aux premières heures du matin, ou à la tombée de la nuit, il est presque impossible de circuler en sécurité en dehors des villages. « Notre vie est en danger à cause des éléphants », se plaint un voisin, Tsekelio Tsheko, en sehumbukushu, l'une des langues parlées au

Botswana. « Quand on descend à la rivière, c'est un problème, quand on va dans les champs, c'est un problème, quand les enfants prennent le chemin de l'école, c'est un problème... » Une situation qui s'est fortement dégradée ces dix dernières années, de l'aveu des villageois.

16 000 habitants et autant d'éléphants

Les chiffres parlent d'eux-mêmes : « dans la région du Panhandle, située tout au nord du delta de l'Okavango, il y a 16 000 habitants, 16 000 têtes de bétail et... 16 000 éléphants », explique Richard Fynn, chercheur à l'Okavango Research Institute (ORI) et coordinateur pour le Botswana du projet Prosuli, « Promoting Sustainable Livelihoods », lancé en 2018 avec le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), le CNRS (voir encadré) ou encore l'université de science et technologie du Zimbabwe, afin d'améliorer les conditions de vie des humains vivant à l'intérieur ou à proximité des zones protégées. Si l'éléphant des savanes est menacé à l'échelle de l'Afrique, où ses

Le mari de Kenna Baitishewenye a été tué accidentellement par un éléphant en avril 2018.



© SONIA COLLAMETTA



effectifs ont été divisés par deux en l'espace de quarante ans, passant d'1 million à 450 000 individus, ce n'est pas le cas au Botswana, où sa population a bondi de 300 % entre 1992 et 2012, faisant du pays un véritable sanctuaire pour les pachydermes, avec un effectif estimé de 130 000 individus. Au-delà des accidents tragiques, les dégâts qu'ils occasionnent sur les récoltes pèsent lourdement sur l'économie fragile des villages du Panhandle. On ne compte plus les champs vivriers de sorgho, millet, citrouilles... ravagés par les éléphants. Il n'est guère de clôtures qui dissuadent ces mastodontes, et les bouteilles en plastique érigées sur les poteaux pour les effrayer semblent bien dérisoires.

« Le problème des zones de conservation, telles qu'elles ont été mises en place sous la colonisation et telles qu'elles continuent d'être gérées par la plupart des États africains, c'est qu'elles ne profitent pas aux habitants qui vivent à proximité et en subissent par contre tous les inconvénients : dégâts sur les récoltes, mais aussi déprédations par les carnivores, comme les lions qui, ici, s'attaquent au bétail qui pâture dans les plaines inondables », pointe Richard Fynn. Résultat : des lions sont régulièrement empoisonnés, en représailles, et les actes

Les passages empruntés le plus régulièrement par les éléphants ont été identifiés et sont matérialisés par des panneaux visibles depuis la route.



humains et les lions, et sur laquelle s'appuie en partie le projet de recherche Prosuli.

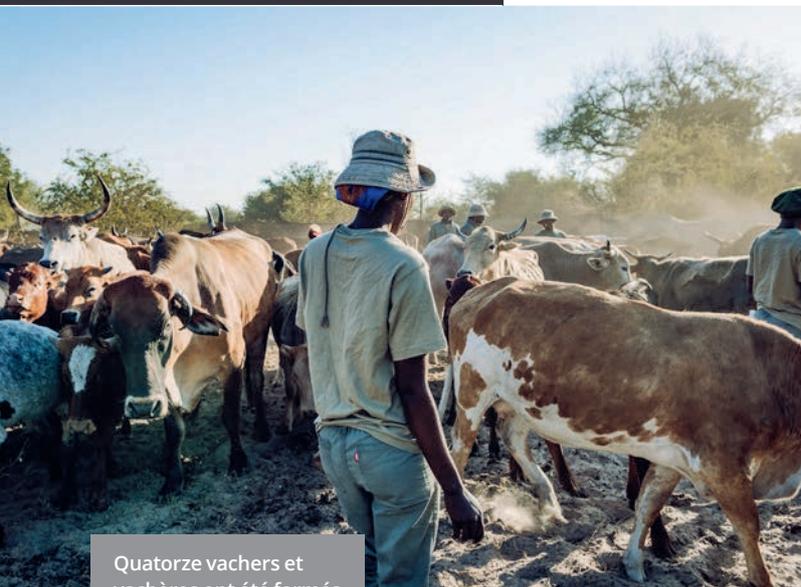
Espace protégé, le delta de l'Okavango fait en réalité partie d'une zone de conservation plus vaste, à cheval entre cinq pays voisins : la zone de conservation transfrontalière Kavango-Zambèze (*Transfrontier Conservation Area Kavango-Zambèze*, ou Kaza TFCA), qui associe Namibie, Angola, Botswana, Zambie et Zimbabwe. La faune sauvage, en effet, ne connaît pas de frontières... « *Si cette TFCA est née, comme les dix-sept autres aujourd'hui en fonctionnement en Afrique australe, avec une double philosophie – contribuer à la protection de la faune sauvage et participer au développement socio-économique des populations qui y vivent –, force est de reconnaître que les populations passent bien souvent au second plan* », déplore Alexandre Caron, chercheur au Cirad et coordinateur général du projet Prosuli. ...

de braconnage sur les éléphants se multiplient, selon le chercheur qui plaide pour que les villageois du Panhandle soient pleinement impliqués dans la gouvernance des zones protégées du nord du delta, et en tirent de véritables bénéfices. « *Bien souvent, on se contente de leur rétrocéder un peu d'argent pour les dédommager des terres qui étaient autrefois les leurs, ou de leur proposer ponctuellement des jobs dans l'industrie touristique. Mais cela ne peut pas faire vivre des villages entiers, et cela ne leur rend pas leurs droits.* »

Prosuli, un projet bâti avec les villageois

Plusieurs initiatives ont vu le jour dans la région, ces dernières années, à l'initiative d'ONG de protection de la nature. Des passages empruntés prioritairement par les éléphants ont ainsi pu être identifiés grâce au travail d'EcoExist : ces « corridors à éléphants », larges de plusieurs centaines de mètres, sont matérialisés par des panneaux visibles depuis la route et sont désormais pris en compte par le Landboard local, la commission qui alloue les terres aux villageois, pour éviter que des parcelles cultivées y soient implantées. Autre initiative récente : celle de l'ONG Claws, qui vise à améliorer la cohabitation entre les

“*Le problème des zones de conservation, c'est qu'elles ne profitent pas aux habitants qui vivent à proximité et en subissent tous les inconvénients.*”



Quatorze vachers et vachères ont été formés grâce aux fonds débloqués par Prosuli.

La particularité de Prosuli, déployé dans quatre sites de la Kaza TFCA, est de renverser la perspective, en se focalisant uniquement sur les conditions de vie des habitants. Avec une originalité : les chercheurs ne sont pas venus avec une idée préconçue des actions à mettre en œuvre, mais ont littéralement co-construit les activités du projet avec les villageois, via l'organisation d'ateliers participatifs – une méthode privilégiée par le Cirad depuis plusieurs années déjà. Résultat, dans le Panhandle : ce sont les questions liées à la gestion du bétail qui sont arrivées en tête des priorités.

« *Tout le monde possède du bétail dans le Panhandle, c'est le Livret A des gens d'ici, on vend une vache pour financer un mariage, ou des funérailles...*, explique Alexandre Caron. *Voir ses bovins attaqués par les lions est forcément un problème, mais ce n'est pas le seul. Car au-delà de ces ventes ponctuelles, il n'y a pas de véritable marché pour le bétail, à même de procurer des revenus*

À Hwange, au Zimbabwe, l'eau au cœur du projet Prosuli

Le Parc national de Hwange, au Zimbabwe voisin, fait partie des quatre sites retenus dans le cadre du projet Prosuli. Le lieu est bien connu des chercheurs : le CNRS y anime ainsi depuis plus de dix ans une zone-atelier où des recherches pluridisciplinaires sont menées sur les écosystèmes de savane et les défis du développement socio-économique*. Ici, les acteurs locaux ont identifié l'eau comme la ressource à mieux gérer en commun dans le cadre de Prosuli : plusieurs puits ont été réhabilités et deux puits avec pompe à panneaux solaires ont été construits, dans sept villages. De petits jardins irrigués attenants ont également vu le jour, dont les produits vendus par les villageoises permettent notamment de financer les frais de scolarité des plus jeunes. La gestion durable de l'eau et des jardins par des comités villageois a aussi été accompagnée par le projet.

* En savoir plus sur la zone-atelier de Hwange : <https://www.za-hwange.cnrs.fr>

“Le troupeau qui est ici rassemble les vaches de sept propriétaires différents.”

réguliers aux familles. » La zone du delta est en effet une zone de prévalence de la fièvre aphteuse, et les prix y sont cinq à six fois inférieurs aux prix pratiqués ailleurs au Botswana ; les animaux se vendent d'autant plus difficilement qu'il n'y a pas d'abattoir sur place, et qu'il faut les transporter jusqu'à la ville principale du delta, Maun, située à plus de neuf heures de camion sur une route défoncée. Plusieurs solutions ont donc été mises en place pour tenter de mieux protéger le bétail, mais aussi mieux le valoriser.

Curieux d'en savoir plus, nous retrouvons en ce début de matinée Lentletse Phuti et son équipe de six jeunes vachers et vachères, à l'extérieur du village d'Eretsha. Ils sont déjà en plein travail : au milieu de l'enclos où près de deux cents vaches ont passé la nuit, ils tentent d'attraper les bovidés au lasso afin de les traiter contre la « tique bleue », une maladie de peau pouvant entraîner la mort de l'animal. Rien dans la scène n'est en réalité habituel : ni le troupeau considérable, ni les soins vétérinaires qu'on lui prodigue, ni l'enclos en toile à l'intérieur duquel l'action prend place.

Des revenus pour les villageois

Au milieu de l'agitation, Lentletse Phuti nous explique. « *Avant, ce sont les enfants qui gardaient les troupeaux, mais depuis que l'école est obligatoire, les animaux sont laissés sans surveillance dans les plaines d'inondation. L'idée, c'est que les propriétaires mettent leurs bêtes en commun et nous les confient. Le troupeau qui est ici rassemble en réalité les vaches de sept propriétaires différents. La journée, nous les emmenons pâturer dans les prairies, et le soir, nous les mettons à l'abri dans le "boma" en toile.* » Cet enclos fait d'une toile de type toile de tente de deux mètres de haut est une nouveauté : il empêche les lions de voir les bovins, et s'avère également trop haut pour qu'ils puissent sauter par-dessus. Mobile, il est régulièrement déplacé afin que le bétail profite des qualités nutritives de toutes les herbacées et graminées présentes sur la zone. « *Grâce au travail d'un étudiant de l'ORI financé par Prosuli, nous connaissons exactement les valeurs en protéines, sodium, potassium... des différents types de végétaux disponibles, saison après saison* », précise Richard Fynn.

Les vachers, tous des jeunes du village, ont été formés grâce aux fonds débloqués par Prosuli et sont rémunérés par Claws, l'ONG partenaire du projet. Au total, ils sont quatorze à s'occuper de deux troupeaux. Les résultats sont encourageants, même si de nombreux villageois restent encore à convaincre : en plus d'être protégés contre les lions, les bovins sont en meilleure santé grâce à un suivi sanitaire régulier. Depuis la mise en place du premier troupeau gardienné, en 2019, un seul incident est à déplorer : des lions qui rôdaient autour de l'enclos ont réussi à affoler les vaches, qui dans un mouvement de panique ont défoncé les barrières et se sont retrouvées face aux prédateurs.

Depuis, les enclos ont été agrandis pour éviter ce genre de problème.

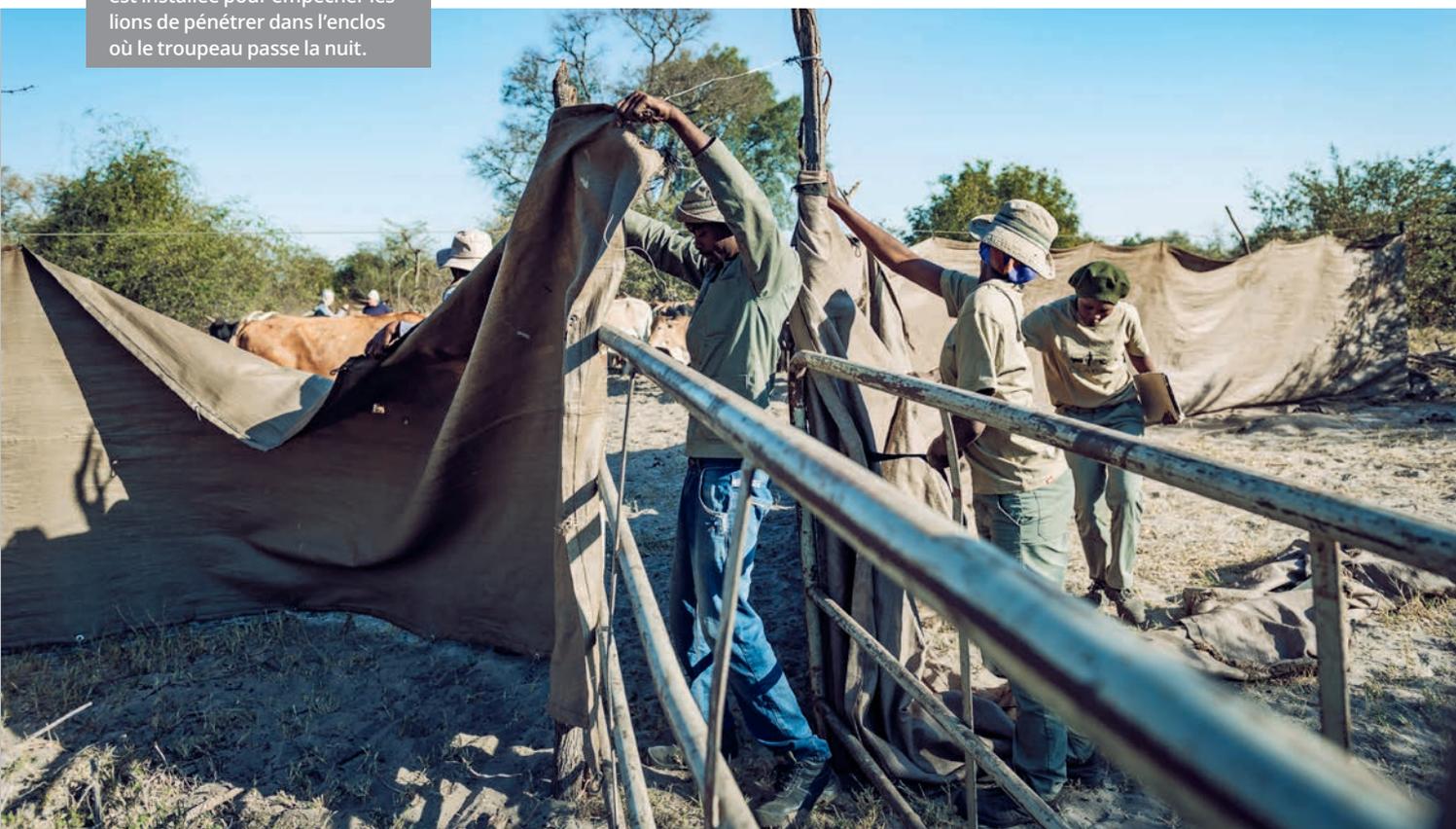
Prochaine étape pour compléter le dispositif, un abattoir financé par Prosuli devrait également voir le jour à Eretsha d'ici à la fin 2022, ainsi qu'un système de « quarantaine mobile » développé par Claws, permettant aux animaux de passer quatre semaines dans un enclos, le temps de lever le soupçon d'une éventuelle contamination par la fièvre aphteuse. « *Cela va complètement changer le regard de la BMC, la Botswana Meat Commission, qui gère le marché de la viande à l'échelle du pays* », veulent croire Richard Fynn et Alexandre Caron, qui misent aussi sur un marché plus local, celui-là : celui des lodges haut de gamme disséminés un peu partout dans le delta. « *Ces infrastructures touristiques se disent prêtes à acheter de la viande de bonne qualité, produite dans le respect de la faune sauvage (sans déprédation par les lions, il n'y aura pas de représailles des villageois)* », affirment les chercheurs. Elles y verraient un autre avantage : des vaches bien gardées ne viendront plus s'égarer dans le delta, à proximité des bâtiments ou des pistes d'atterrissage notamment – les touristes qui ont acheté le « rêve africain » supportent mal en effet de tomber nez à museau avec de vulgaires bovins...

Des vaches en meilleure santé, un vrai marché pour le bétail, des lions moins persécutés, des relations avec les lodges apaisées... L'équation gagnante, les chercheurs l'espèrent, pour que ce sanctuaire pour la faune sauvage soit un succès dans le temps long, à tous les niveaux. ▮



Des soins sanitaires sont apportés aux animaux par les jeunes vachers.

Une toile de 2 mètres de haut est installée pour empêcher les lions de pénétrer dans l'enclos où le troupeau passe la nuit.







La recherche au cœur de France 2030

Le CNRS est pilote ou copilote de 30 Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) lancés dans le cadre du plan France 2030. Retour sur les enjeux considérables de ces dispositifs pour la recherche et la société.

DOSSIER RÉALISÉ PAR SOPHIE FÉLIX ET LAURENCE STENVOT / ILLUSTRATION FRED PÉAULT

Présenté par le président de la République le 12 octobre 2021, France 2030, un plan d'investissement inédit de 54 milliards d'euros, incarne la volonté de placer la France dans le peloton de tête sur une dizaine de secteurs stratégiques comme l'énergie, la santé du futur, la décarbonation de l'industrie ou encore l'alimentation et l'agriculture... « *Ce plan d'investissement dans l'innovation, l'industrialisation et la recherche a pour objectif d'apporter des réponses aux grands défis de notre temps, explique Bruno Bonnell, secrétaire général pour l'investissement et pilote de France 2030. Les urgences climatique, alimentaire, énergétique sont là, palpables et menaçantes. Avec France 2030, l'État se donne les moyens de bâtir la France de demain, décarbonée, sobre et solidaire.* » Et pour Antoine Petit, président-directeur général du CNRS, l'ambition de France 2030 « *ne pouvait se concevoir sans la participation active de l'ensemble des forces de recherche de notre pays dont fait partie le CNRS. Nous avons des scientifiques et des laboratoires de recherche reconnus dans le monde entier.* »

Parmi les ambitions : devenir leader de l'hydrogène vert, faire émerger de nouveaux réacteurs nucléaires de petites tailles, produire vingt biomédicaments contre le cancer et les maladies chroniques, ou encore investir dans la nouvelle aventure spatiale et dans la connaissance des fonds marins. France 2030 couvre l'intégralité du champ de ces objectifs depuis la recherche fondamentale jusqu'à l'industrialisation. Une nouveauté par rapport au Programme d'investissements d'avenir (PIA)¹ qui ne comprenait pas cet aspect industriel. Organisé autour de trois axes – mieux vivre, mieux produire et mieux comprendre –, France 2030 est « *un effort de l'État dans l'innovation sous toutes ses formes* », rappelle Bruno Bonnell.

ACCÉLÉRATION

Booster la Cybersécurité

Le PEPR **Cybersécurité** s'inscrit dans le cadre de la stratégie nationale d'accélération pour la cybersécurité, lancée en février 2021. Dotée de plus d'un milliard d'euros, elle doit permettre de tripler le chiffre d'affaires de la filière d'ici 2025. Le PEPR est à ce jour structuré autour de sept projets ciblés. Un appel à projets permettra de lancer trois projets supplémentaires. Le programme prévoit également de renforcer l'animation de la communauté en s'associant aux outils existants comme le GdR Sécurité informatique. Il impliquera environ 200 scientifiques permanents issus du CNRS, du CEA et d'Inria, ainsi que de 22 universités et écoles partenaires. Outre les post-doctorantes et post-doctorants, c'est environ 140 doctorantes et doctorants qui seront formés d'ici 2028.

Pilotes : CNRS, Inria et CEA / **Budget :** 65 M€ sur 6 ans



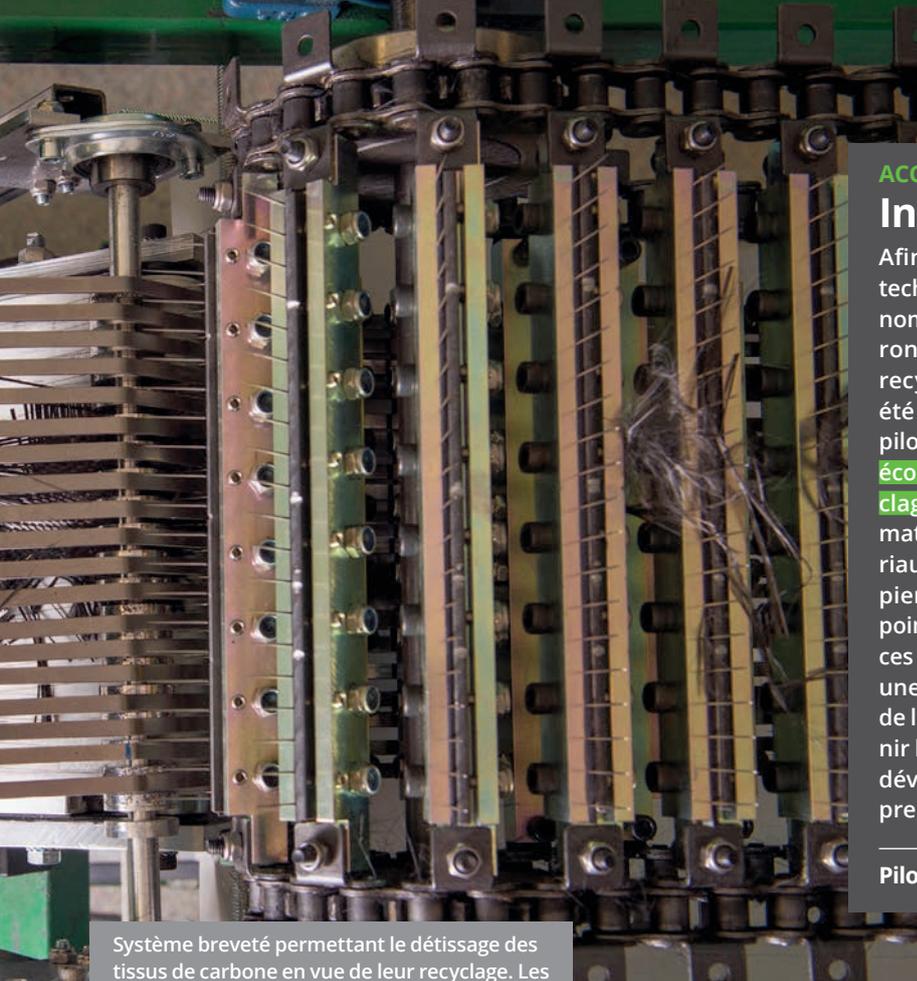
© CNRS / FRESILLON/DAVICONS PHOTOGRAPHE

Pour Claire Giry, directrice générale de la recherche et de l'innovation du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, « *tout est dans le "comprendre". C'est là évidemment le rôle premier de la recherche que d'avancer dans la compréhension du monde qui nous entoure.* » Quant aux autres axes, « *c'est le "mieux" qui interroge la recherche, à travers son apport à l'innovation. C'est toujours de la recherche que naît l'innovation.* » Et dans un monde concurrentiel et en permanente évolution, cette recherche est clé. C'est pourquoi

“*Nous visons les meilleurs standards internationaux, pour maintenir la France au plus haut dans la compétition mondiale.*”

Claire Giry, directrice générale de la recherche et de l'innovation du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

1. Les Programmes d'investissements d'avenir (PIA) ont été mis en place par l'État à partir de 2010 pour financer des investissements innovants et prometteurs sur le territoire. 2. L'ANR est notamment chargée de la sélection des PEPR exploratoires, et de la contractualisation et du suivi des projets de tous les PEPR.



Système breveté permettant le détissage des tissus de carbone en vue de leur recyclage. Les fibres obtenues peuvent ensuite être filées puis retissées ou tricotées pour l'élaboration d'un nouveau composite (laboratoire I2M).

ACCÉLÉRATION

Innovier pour mieux recycler

Afin de relever les défis écologiques, économiques et technologiques nécessaires à la transition vers une économie circulaire, compétitive et respectueuse de l'environnement, la stratégie d'accélération Recyclabilité, recyclage et réincorporation des matériaux recyclés a été lancée en septembre 2020. Dans ce cadre, le CNRS pilote le PEPR **Technologies avancées et analyses socio-économiques pour la transition écologique dans le recyclage**. Ce programme de recherche est centré sur cinq matériaux utilisés quotidiennement : plastiques, matériaux composites, textiles, métaux stratégiques et papiers/cartons. L'objectif est notamment de mettre au point des solutions de recyclage plus performantes pour ces matériaux et de proposer des matériaux permettant une circularité par intégration de leur recyclabilité lors de leur conception. La stratégie vise également à soutenir l'effort de recherche publique et partenariale pour développer de nouveaux débouchés pour les matières premières de recyclage.

Pilote : CNRS / Budget : 40 M€ sur 6 ans

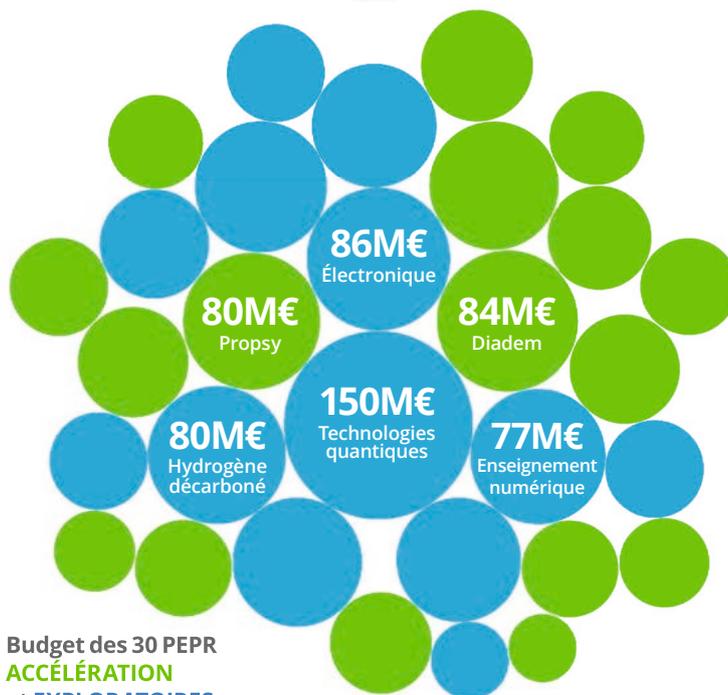
elle est au cœur de grands programmes « indispensables » aux ambitions de France 2030, et en particulier les Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR). Dotés de 3 milliards d'euros sur une durée de dix ans, les PEPR sont conçus comme des outils structurants pour la recherche française au niveau national, sur la base des « meilleurs standards internationaux, pour maintenir la France au plus haut dans la compétition mondiale ».

Construire ou consolider un leadership français

Ces programmes, opérés par l'Agence nationale de la recherche² (ANR) sont de deux types : les PEPR de stratégie nationale d'accélération – qui accompagnent des transformations déjà engagées comme l'hydrogène décarboné ou l'intelligence artificielle (IA) – et les PEPR exploratoires – qui ont vocation à développer des secteurs émergents tels que le stockage de données sur ADN (MolecularArXiv) ou l'intégration des robots dans la société (O2R). Instillant une dose importante de démarche *top-down*, focalisant les acteurs sur des grands enjeux industriels et sociétaux, les PEPR d'accélération sont complémentaires aux PEPR exploratoires, dont les thématiques émanent essentiellement du monde académique. « Les PEPR exploratoires construisent les stratégies d'accélération de la prochaine décennie, souligne Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS. Par exemple, le très ambitieux mais très risqué MolecularArXiv ...



(Co)pilotage du CNRS dans les PEPR lancés
Le CNRS est présent dans 30 PEPR sur 42 dont tous les exploratoires.
Retrouvez la liste complète sur www.cnrs.fr/fr/pepr



Budget des 30 PEPR
ACCÉLÉRATION
et EXPLORATOIRES
(co)pilotés par le CNRS

Chacune de ces capsules contient plus de 100 milliards de copies d'un texte encodé sur ADN : à gauche, la Déclaration des droits de l'homme et du citoyen de 1789 et à droite, la Déclaration des droits de la femme et de la citoyenne de 1791. (Capsules DNAshell© par Imagene.)



EXPLORATOIRE

Stocker des données sur de l'ADN

Face à la croissance exponentielle du volume des données numériques, le PEPR exploratoire [MoleculArXiv](#) va développer l'utilisation de l'ADN comme support de stockage. Cette approche, qui concernera dans un premier temps les données dites « froides », c'est-à-dire utilisées rarement, permettra d'avancer vers un archivage de grande capacité, durable dans le temps et frugal en énergie. Malgré une recherche déjà florissante, de nombreux défis technologiques restent encore à relever pour coder l'information, la décoder sans erreur et améliorer les capsules qui doivent protéger durablement les polymères. Quatre projets ciblés ont démarré dès l'été 2022 pour initier les recherches pluridisciplinaires – en chimie, microfluidique, théorie du signal, bioinformatique, biologie du séquençage et chimie des polymères – nécessaires. Des appels à projets ou manifestations d'intérêt, ainsi que quatre chaires de jeunes chercheurs, viendront les compléter.

Pilote : CNRS / **Budget :** 20 M€ sur 7 ans

a le potentiel d'ouvrir un énorme champ d'applications, si les verrous scientifiques sont levés. » La vaste majorité des PEPR possède également une articulation forte avec l'Europe, qui elle aussi se dote de stratégies à son échelle, par exemple sur le quantique.

À ce jour, 42 PEPR ont été initiés, dont 25 d'accélération et 17 exploratoires, d'autres vagues devant suivre³. Le CNRS en pilote ou copilote respectivement 13 et 17, « soit 30 PEPR sur 42 au total, un engagement remarquable pour les communautés scientifiques, s'enthousiasme Antoine Petit. Ce résultat démontre à la fois la place unique du CNRS dans le système français et son rôle naturel d'agence de programmes. Ces succès sont liés à la vision nationale et internationale que nous avons de nos sujets de recherche. » Avec la diversité de leurs thématiques, les PEPR sont un miroir des champs de recherche où la France se distingue au plan international. « Pluridisciplinaire, opérant sur tout le territoire avec, à un moment ou un autre, tous les autres acteurs du monde de la recherche, il est normal que le CNRS soit impliqué aussi fortement », ajoute le PDG.

Au service de la société

Si les programmes « ne changeront pas la mission du CNRS d'assurer l'avancée des connaissances dans l'ensemble des champs disciplinaires », ils vont « donner une impulsion très forte dans les domaines sélectionnés », assure Alain Schuhl. Rassemblant la totalité de la communauté scientifique concernée, ils sont « une affirmation du rôle d'opérateurs de programme des organismes de recherche nationaux, ce qui pourrait être une évolution importante ».

« Maladies infectieuses émergentes », « IA », « Eau, Bien commun »... co-construits avec le monde socio-économique, qu'ils soient exploratoires ou liés à une stratégie nationale

d'accélération, les PEPR s'attaquent à des sujets majeurs de société. Par exemple, le PEPR Propsy est centré sur les pathologies psychiatriques, qui touchent près d'une personne sur quatre aujourd'hui. En constante augmentation, ces maladies fréquentes sont parmi les premières causes mondiales de handicap et de dépenses liées à une maladie chronique. Face à cet enjeu, Propsy vise à « déployer la médecine de précision en psychiatrie », explique Marion Leboyer, coordinatrice scientifique du PEPR. Le programme est porté par l'Inserm et le CNRS, en partenariat avec le CEA, la Fondation FondaMental et cinq universités⁴. Centré sur quatre troubles parmi les plus fréquents et les plus invalidants (schizophrénies, dépressions résistantes, troubles

3. La 3^e vague de l'appel à projets PEPR exploratoires est prévue pour 2023. 4. Sorbonne Université, Université de Bordeaux, Université de Lille, Université de Paris, Université Paris-Est Créteil.

du spectre autistique, troubles bipolaires), il s'appuie sur « une des plus grandes cohortes au monde » rassemblant 8 500 patients à ce jour. « Ce programme doit nous permettre d'être plus performants sur le dépistage et la prévention, mais aussi sur la communication autour de ces pathologies, pour lesquelles les fausses représentations retardent bien souvent les diagnostics », précise Marion Leboyer.

Le programme Propsy entend également soutenir le développement d'une filière biomédicale française en santé mentale solide et pérenne, incluant la pharmacologie, la medtech et le digital, grâce à des partenariats public-privé. En cela, il collaborera avec le PEPR Santé numérique, copiloté par l'Inserm et Inria.

Développer les filières industrielles

Les PEPR d'accélération ayant pour principale mission d'alimenter le développement industriel dans chacune des stratégies nationales, « il est fondamental d'établir un lien extrêmement étroit entre les résultats de recherches menées en laboratoires et tout l'écosystème de maturation technologique (notamment les Sociétés d'accélération du transfert de technologies – Satt⁵) et plus largement les partenaires industriels qui

“Pluridisciplinaire, opérant sur tout le territoire avec, à un moment ou un autre, tous les autres acteurs du monde de la recherche, il est normal que le CNRS soit impliqué aussi fortement.”

Antoine Petit, président-directeur général du CNRS.

seront chargés de développer une activité sur la base de ces résultats de recherche, affirme Jean-Luc Moullet, directeur général délégué à l'innovation du CNRS. C'est la première fois que le gouvernement demande à des organismes de recherche de définir une stratégie globale et coordonnée entre acteurs concernés par une thématique spécifique. » Un système qui « s'éloigne du modèle classique des appels à projets pour aller vers un financement de la recherche plus dirigé vers des finalités industrielles stratégiques pour l'État ».

...

Le projet Propsy, centré sur les pathologies psychiatriques, vise notamment une meilleure prise en charge des troubles du spectre autistique.



5. Le CNRS est actionnaire et membre du conseil d'administration des 13 Satt aujourd'hui en activité.

“Nous tenons à ces développements car ils conditionnent notre avenir. [...] l'État joue son rôle en prenant le risque à sa charge.”

Laurent Lebrun, CEO de Hprobe.

Dans ces thématiques, le CNRS est d'ailleurs déjà présent auprès des industriels, avec la création de plus de 100 start-up par an et plus de 200 laboratoires communs avec les plus grandes entreprises françaises, comme l'Unité mixte de physique CNRS/Thales (Umphy) travaillant, entre autres, sur la spintronique⁶. « Même si la société Thales n'est pas directement impliquée dans le PEPR Spin, nous participons à leur action de dissémination : il est important de faire intervenir dès maintenant les acteurs de tous les secteurs qui pourraient avoir l'utilité de la technologie spintronique demain, afin d'imaginer des produits et solutions concrètes qui les intéressent vraiment, de mettre en place des cas d'études pertinents, et de construire la suite », explique ainsi Paolo Bortolotti, ingénieur au centre de recherche Thales Research & Technology, directeur de l'Umphy et du réseau européen SpinTronicFactory. Copiloté par le CNRS et le CEA, le PEPR Spin doit ainsi « passer les étapes nécessaires pour rendre ces technologies suffisamment matures pour les industriels ».

« Nous tenons à ces développements car ils conditionnent notre avenir », corrobore Laurent Lebrun, CEO de Hprobe. En « deuxième ligne industrielle », cette spin-off du laboratoire Spintronique et technologie des composants (Spintec)⁷ fabrique des machines de test sous champ magnétique pour des industriels. Dans une stratégie à long terme, elle surveille donc les avancées de la spintronique permettant de concevoir de nouveaux composants nécessitant de tels tests. « Avec Spintec, la France est un précurseur du domaine au niveau mondial : il est important pour la filière qu'elle le reste », complète le dirigeant pour qui « l'État joue son rôle en prenant le risque à sa charge. »

Si certains PEPR ont ainsi un objectif de souveraineté nationale, d'autres dépassent les frontières. Le changement climatique pose ainsi d'immenses défis au monde entier, questionnant le développement de toutes les sociétés, leur résilience et finalement leur pérennité.

Co-construire les programmes

Pour y faire face, l'investissement majeur que représente le PEPR exploratoire Transformer la modélisation du climat pour les services climatiques (Traccs), porté par le CNRS et Météo-France, doit pousser le développement « sans ...

Un écoquartier a vu le jour sur la Presqu'île de Grenoble, en Isère, un site pilote pour le développement durable (2022).

ACCÉLÉRATION

Vivre et habiter autrement

Favoriser l'émergence de nouvelles façons de concevoir, fabriquer et gérer les villes est l'objectif du PEPR **Solutions pour la ville durable et le bâtiment innovant**, en lien avec la stratégie nationale d'accélération du même nom. Il vise à refonder le développement urbain autour des quatre défis que sont la sobriété, la résilience, l'inclusion et la production urbaine. En intégrant les savoirs et expériences des divers acteurs de la société et des différentes disciplines scientifiques concernées, les axes retenus couvrent aujourd'hui la gestion durable des flux et cycles d'énergie (production, consommation, recyclage), d'eau et de matières au niveau d'organisation urbain et régional, la résilience urbaine face aux changements globaux, et une gouvernance urbaine inclusive et partagée, adaptative, axée sur la réduction des inégalités socio-environnementales.

Pilotes : CNRS et Université Gustave Eiffel / **Budget :** 40 M€ sur 8 ans



6. La spintronique utilise le spin des électrons pour transmettre de l'information, comme l'électronique utilise leur charge électrique. 7. Unité CNRS/CEA/Université Grenoble-Alpes.
8. L'appel à projets LabEx (Laboratoire d'Excellence) a été lancé dans le cadre des PIA.

ACCÉLÉRATION

Inventer les batteries du futur

Dans le cadre de la stratégie nationale d'accélération Batteries, le CNRS copilote le PEPR **Soutenir l'innovation pour développer les futures générations de batteries**. Destiné à soutenir la recherche en amont, ce programme abordera les défis scientifiques des nouvelles générations de batteries pour faire émerger des solutions innovantes tout en créant un socle commun de connaissances pluridisciplinaires. Il s'organise principalement autour de trois axes : faire émerger des chimies innovantes (notamment pour limiter l'usage de métaux rares), conduire à l'avènement de « battery management systems » – systèmes de contrôle et de charge des éléments d'une batterie d'accumulateurs – adaptés aux nouveaux besoins, et développer les outils et équipements qui accompagneront les nouvelles technologies.

Pilotes : CNRS et CEA / **Budget :** 40 M€ sur 6 ans



Fabrication d'une cellule de batterie sodium-ion (start-up Tiamat). Puissantes et à la charge rapide, les batteries de ce type alimentent aujourd'hui des véhicules électriques légers (scooters ou trottinettes).

© CYRIL FRESILLON/TIAMAT/CNRS PHOTO THÈQUE

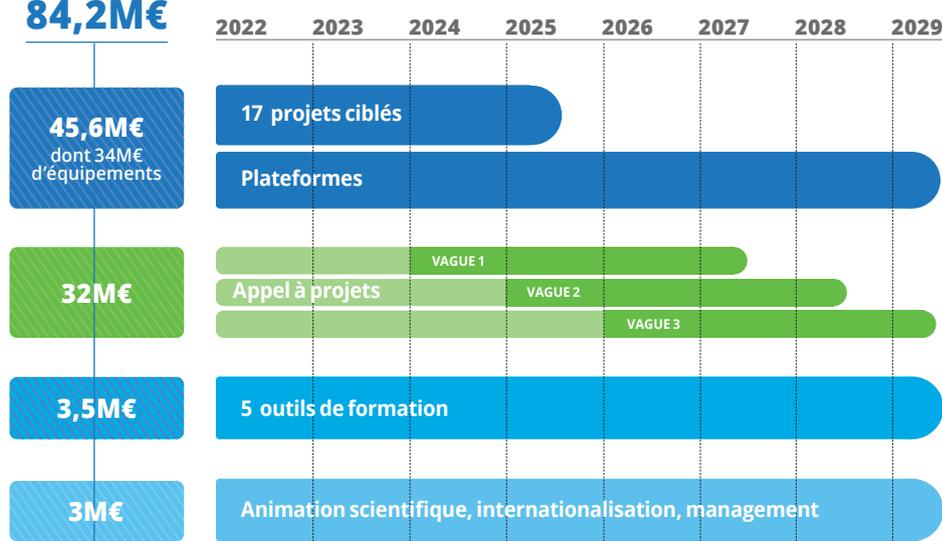


© FRANCOIS HENRY/REA

Comment sont répartis les budgets des PEPR ?

Un exemple avec Diadem, PEPR exploratoire pour les matériaux de demain.

84,2M€



Source : Mario Magliano.

délai» des « connaissances et outils permettant d'anticiper le changement climatique et d'en réduire les impacts négatifs », du cœur des modèles de climat aux applications, assure Masa Kageyama, codirectrice du programme pour le CNRS. « Nous avons aussi initié un mouvement inverse : de la société vers le monde scientifique », complète la chercheuse. Trois projets ciblés du programme sont dédiés aux interactions entre les parties prenantes – les Régions, le grand public, les secteurs économiques, etc. – et les scientifiques pour co-construire les objectifs, services et produits qui répondent aux questions et aux besoins de tous les acteurs. « Le PEPR formera la prochaine génération d'experts en développement de modèles de climat pour préparer la recherche de demain, mais aussi d'utilisateurs, scientifiques comme décideurs, de ces modèles », précise Masa Kageyama.

Comme Propsy, Traccs construit aussi une « communauté de préoccupations » avec d'autres programmes : FairCarboN (qui s'intéresse au cycle du carbone), OneWater (qui place les recherches sur les ressources en eau au cœur de la transition des territoires), Irima (sur les sciences du risque) ou encore Numpex (sur les machines et supercalculateurs de demain). « Il est important de partager nos données et nos savoirs pour nous appuyer sur les améliorations et avancées des uns et des autres », insiste Masa Kageyama. Une logique qui fonctionne aussi par exemple entre le PEPR exploratoire Diadem, qui vise à accélérer la conception et l'arrivée sur le

marché de matériaux plus performants et plus durables, et le PEPR d'accélération IA. « En tant que réponses à des problèmes de société, les PEPR sont intrinsèquement pluridisciplinaires. Il est essentiel de faire vivre cette pluridisciplinarité et les complémentarités et interconnexions entre programmes », confirme Alain Schuhl. Une cellule dédiée sera ainsi créée au sein du CNRS pour « être un appui à la conduite des PEPR et permettre, du côté scientifique, de créer et générer de la synergie entre eux ».

Entre projets ciblés et appels à projet ouverts

Si les PEPR se positionnent comme des objets uniques, ils viennent aussi compléter les dispositifs de pilotage actuels de la recherche et s'intégrer à la stratégie du CNRS. Pour

EXPLORATOIRE

Créer une « science du risque »

Le PEPR exploratoire **Gestion intégrée des risques pour des sociétés plus résilientes à l'ère des changements globaux (Irima)** vise à formaliser une « science du risque » pour contribuer à l'élaboration d'une nouvelle stratégie de gestion des risques et des catastrophes, et de leurs impacts à différentes échelles du territoire, dans un contexte de changements globaux, anthropiques et climatiques. Au-delà de la recherche, ce programme développera des expertises en termes d'observation, d'analyse et d'aide à la décision. L'objectif : accélérer la transition vers une société capable de faire face à tout un ensemble de menaces (hydro-climatiques, telluriques, technologiques, sanitaires, etc.) en étant plus résiliente, dans une perspective de développement soutenable.

Pilotes : CNRS, BRGM et Université Grenoble-Alpes / **Budget :** 51,4 M€ sur 8 ans

© CYRIL FRESILLON/CNRS PHOTOTHÈQUE



Les infrastructures, et notamment la marina de ce complexe hôtelier sur l'île de Saint-Martin, aux Antilles, ont été dévastées lors du passage de l'ouragan Irma en septembre 2017.

preuve, le PEPR d'accélération Solutions pour la ville durable et le bâtiment innovant – visant à favoriser l'émergence de nouvelles façons de concevoir et gérer les villes, porté par le CNRS et l'université Gustave Eiffel – s'est lui-même structuré depuis une émanation de LabEx⁸, de Groupements de recherche (GdR) et de Fédérations de recherche (FR) du CNRS. Et la thématique de la ville durable est transversale et interdisciplinaire, réunissant des problématiques allant de l'écologie à la géographie, en passant par l'urbanisme, la sociologie, l'histoire, mais aussi la chimie ou l'IA... « *Nous avons voulu impliquer l'ensemble des dix instituts du CNRS pour aborder les problématiques de la ville durable, le tout dans la co-construction* », rapporte Gilles Gesquière, codirecteur de programme pour le CNRS. Diadem pourra s'appuyer quant à lui sur le Centre pluridisciplinaire du CNRS dédié à l'IA pour les sciences et aux sciences pour l'IA, et « *très fortement sur les GdR déjà existants sur le domaine des matériaux pour préparer les futurs appels à projets* », note Mario Maglione, codirecteur du PEPR pour le CNRS. Imaginés comme des programmes sélectifs, les PEPR sont construits suivant des axes scientifiques prédéfinis s'appuyant sur deux piliers complémentaires : des projets ciblés et des appels à projets ouverts (voir infographie p. 39). ...



© CYRIL FRESILLON/ISTOCK/CNRS PHOTOTHÈQUE

Atteindre la neutralité carbone et restaurer les ressources naturelles dans les écosystèmes figurent parmi les objectifs du PEPR FairCarboN, qui pourra s'appuyer sur plusieurs infrastructures de recherche déjà existantes.

Les plateformes au cœur des PEPR

Les PEPR se veulent structurants pour les communautés scientifiques françaises, notamment à travers le développement et la mise en réseau de plateformes, afin d'optimiser les investissements et l'utilisation des équipements et des expertises humaines. Piloté par le CNRS et le CEA, le PEPR d'accélération pour l'électronique – un enjeu stratégique au cœur des fonctionnalités numériques des produits et services – s'appuie ainsi sur le réseau national des grandes centrales de technologies en micro- et nano-fabrication (Renatech) porté par le CNRS. Créé en 2003, celui-ci regroupe 5 centrales d'intégration (Laas, IEMN, Femto-ST, LTM et C2N) et est complété par les 28 centrales régionales distribuées en France qui forment le réseau Renatech+. Ces centrales vont permettre de réaliser toutes les étapes pour fabriquer des composants, du matériau à la mise en boîtier. Cet environnement va être porteur d'innovations clés, comme des capteurs capables d'opérer dans des environnements sévères, de mesurer la

qualité de l'air ou de détecter des virus via les téléphones portables, ou encore des composants basse consommation pour la conversion énergétique ou pour améliorer les télécommunications, le calcul embarqué et l'IA. Avec un budget de 86 millions d'euros, dont 40 % dédiés à la jouvence de ces centrales, « *le PEPR Électronique entend redonner vie à des filières technologiques nationales qui intéressent les industriels français* », explique Isabelle Sagnes, codirectrice de programme pour le CNRS. Par exemple, la filière « *VECSEL InP* », arrêtée depuis dix ans faute de moyens sera utile à la géolocalisation et à la future 6G. Ces nouvelles filières s'appuient aussi sur un financement complémentaire issu de l'Équipex+/ESR-Nanofutur, autre programme national, qui a permis d'investir dans du matériel de pointe inédit. La même logique s'applique par exemple au PEPR exploratoire Diadem, en sciences des matériaux, dont la stratégie repose sur la mise en place d'équipements pérennes de haut

niveau avec le *Open Materials Discovery Hub*, un réseau de quatre plateformes spécialisées, distribuées sur le territoire et coordonnées. FairCarboN de son côté bénéficiera des interactions avec des infrastructures de recherche déjà existantes pour l'expérimentation sur les écosystèmes (AnaEE), la mesure des gaz à effet de serre (Icos), l'étude de la zone habitable des continents (Ozcar) ou encore de l'évolution du système Terre (Data Terra). « *Le PEPR s'appuiera sur ces infrastructures et en retour les nourrira par les données accumulées ou les programmes menés qui les dynamiseront* », indique Sylvie Recous, codirectrice de programme pour Inrae. Le PEPR consacré à la ville durable s'appuiera quant à lui sur trois futurs centres opérationnels de recherche en modélisation, en systèmes d'action de la ville durable et en évaluation des politiques urbaines. II



Porté par le CNRS et Inrae avec un budget de 40 millions d'euros sur six ans, le PEPR exploratoire FairCarboN a pour objectif d'étudier les écosystèmes continentaux pour identifier des leviers et trajectoires pour la neutralité carbone. Il lancera cinq projets ciblés d'ici 2023, avec un budget compris entre 1,5 et 7 millions d'euros, portant sur les données de l'évolution des stocks de carbone dans les sols et les biomasses végétales ou encore le soutien aux infrastructures représentant l'ensemble des écosystèmes continentaux. Un appel à projet ouvert, basé sur les quatre axes structurant le PEPR et financé par l'ANR, a également été lancé. « *L'idée est de ne pas mettre la communauté en concurrence, mais plutôt d'aider à développer des consortiums pertinents pour répondre*

à l'objectif de structuration de la communauté », explique Pierre Barré, codirecteur du PEPR pour le CNRS. Une cinquantaine de lettres d'intentions ont été déposées et l'équipe d'animation a invité les pré-projets portant sur des sujets complémentaires ou se recoupant à se regrouper pour proposer des projets plus complets et intégrateurs.

Un changement de paradigme

Pour mieux structurer la communauté scientifique, les PEPR s'appuient fortement sur la mise en place et l'utilisation de plateformes (*lire p. 41*). Ce qui pourrait être « *un véritable changement culturel* », s'enthousiasme Mario Maglione. Car l'objectif des PEPR est bien de révolutionner la façon de faire la recherche. « *Depuis combien d'années parle-t-on de la ville durable ? Pourtant, les choses n'avancent pas assez au regard des urgences* », remarque Jean-Yves Toussaint, codirecteur du PEPR dédié pour le CNRS. La question est donc posée : comment changer nos manières de faire ? « *La lettre de mission du ministère concernant les PEPR est ambitieuse et vise un changement de paradigme avec plus de souplesse, plus de risques et plus de visées opérationnelles que d'articles. C'est là un vrai traitement de l'urgence. L'interdisciplinarité et le traitement par l'aval – c'est-à-dire l'obligation d'intégrer les parties prenantes dans le suivi des projets – feront partie des outils clés pour atteindre nos objectifs* », ajoute le chercheur. Les PEPR sont « *le meilleur exemple, s'il en fallait un, de l'importance capitale de la recherche pour l'avancement du progrès et de la connaissance dans tous les aspects de la vie, et pour répondre aux immenses défis qui nous attendent* », conclut Antoine Petit. ■

ACCÉLÉRATION

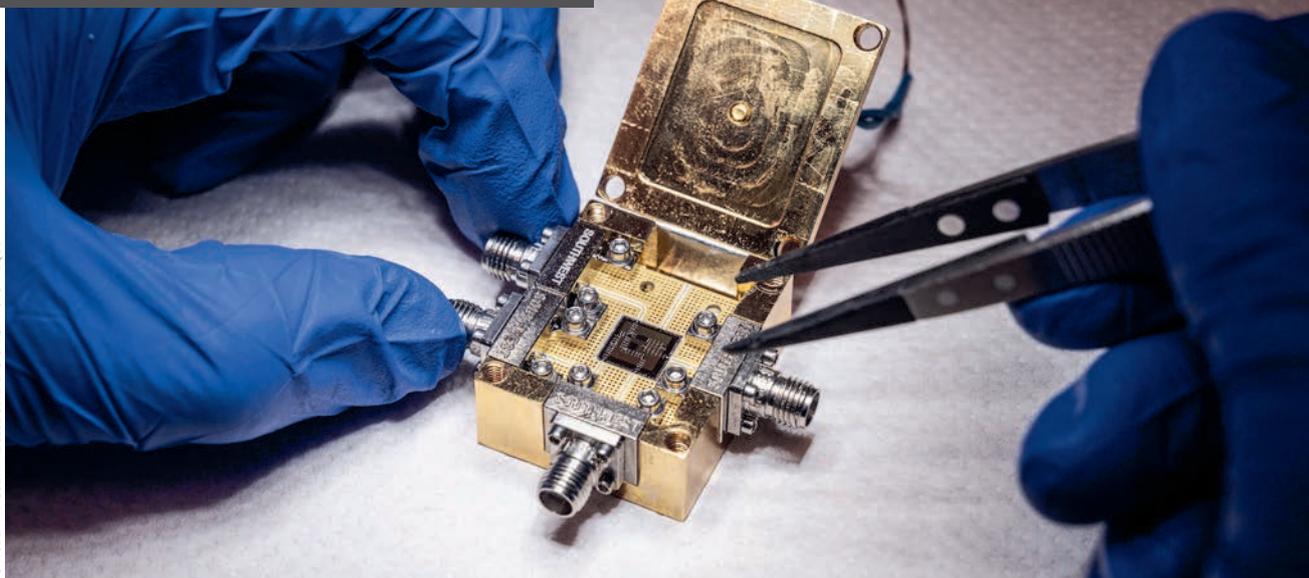
Révolutionner le quantique

Le PEPR **Technologies quantiques** représente la partie amont de la stratégie nationale d'accélération dédiée aux technologies quantiques, annoncée en janvier 2021. L'État se saisit fortement de cette problématique pour des questions de souveraineté nationale et européenne : il s'agit d'être au plus haut niveau de la compétition scientifique et industrielle internationale, mais surtout de permettre à la France et à l'Europe de disposer de leurs propres solutions pour garantir leur indépendance dans ce domaine clé. Le programme comprend, à ce jour, dix projets ciblés relevant notamment du calcul quantique, des atomes froids pour la simulation et les capteurs, des codes correcteurs d'erreur, de la cryptographie post-quantique ou encore de communication quantique. Des appels à projets sur le « calcul quantique au vol », les concepts en rupture et les talents ont déjà été ou seront prochainement ouverts.

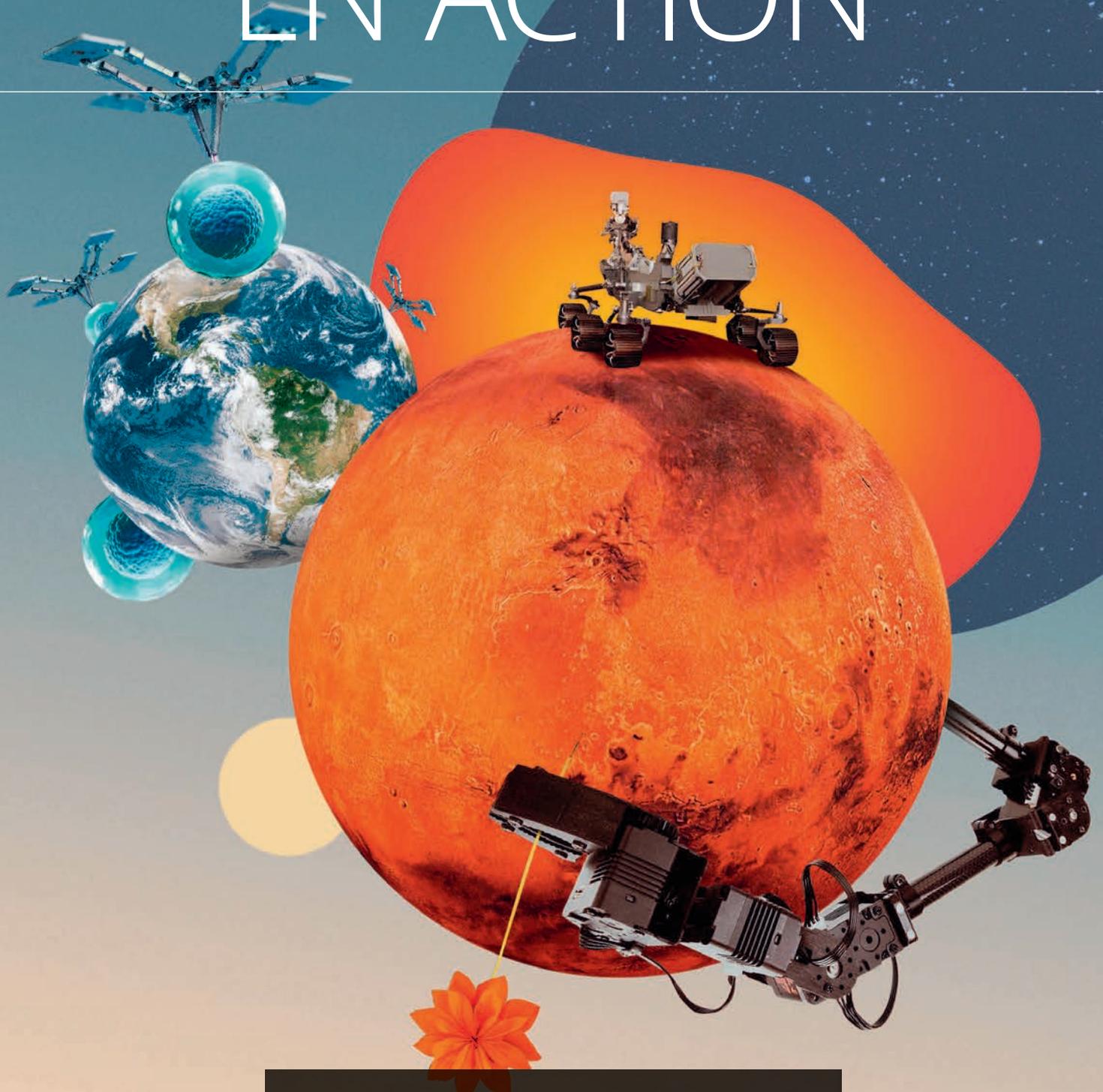
Pilotes : CNRS, Inria et CEA / **Budget :** 150 M€ sur 5 ans

Ce prototype de puce Cat-Qubits est mis au point par la start-up Alice & Bob qui développe un ordinateur quantique à Qubits à auto-corrrection.

© HUBERT RAGUET / ALICE&BOB/EPENS/CNRS PHOTOTHÈQUE



EN ACTION



*Les scientifiques progressent dans
l'étude du climat, explorent planètes
et astéroïdes et ouvrent les portes
de leurs laboratoires.*



© BENJAMIN CREMEL / AFP

Épisodes extrêmes : la faute au dérèglement climatique ?

TERRE ●

MÉTÉOROLOGIE Cruels et tempêtes dévastatrices, canicules et vagues de froid en toute saison... les événements extrêmes se multiplient sur la planète. Mais comment attribuer avec certitude telle ou telle catastrophe au changement climatique ? Les scientifiques font actuellement des pas de géants pour répondre à cette question majeure.

PAR SEBASTIÁN ESCALÓN

Si vous suivez l'actualité, vous avez sans doute assisté à cette scène après une catastrophe naturelle : un journaliste, la mine sombre, demande à un scientifique si le changement climatique est responsable de cet événement. L'expert, prudent, répond : « *On ne peut pas attribuer spécifiquement cette catastrophe au changement climatique ; ce que l'on peut dire, c'est que ce genre d'événement sera de plus en plus fréquent en raison du changement climatique.* » Et la séquence s'arrête sur cette réponse qui ne satisfait complètement personne.

Mais depuis quelques années, un champ de recherche s'efforce d'en apporter une meilleure : celui de l'attribution des événements extrêmes.

Naissance d'une nouvelle science

Tout a commencé en 2003 dans un éditorial de la revue *Nature* rédigé par un chercheur britannique, Myles Allen. « À la suite d'inondations à Oxford, Allen s'est demandé s'il était possible d'attribuer ce phénomène au changement climatique afin de poursuivre les responsables de ce changement. Il se plaçait dans une perspective juridique », explique Aglaé Jézéquel, climatologue au Laboratoire de météorologie dynamique¹. Pour y parvenir, indiquait Myles Allen, il faudrait d'abord prouver que le changement climatique était bien le responsable de ce risque accru d'inondations. L'idée d'attribution était née... Mais le chercheur a aussi proposé une méthode d'attribution, qui consistait à comparer la probabilité que ces inondations surviennent dans le monde tel qu'il est à celle qu'elles surviennent dans un monde fictif, où le changement climatique n'aurait pas eu lieu.

Au fil des ans, l'idée a été reprise et mise en pratique. Pour recréer ce monde dit « contrefactuel », les chercheurs utilisent des modèles climatiques. En multipliant les simulations de ce climat préindustriel, ils calculent la probabilité pour qu'un événement extrême survienne et peuvent alors la comparer à celle d'un tel phénomène sur une Terre où les taux de gaz à effet de serre ne cessent de grimper. Mais la méthode a ses limites : « *Lorsque ces événements*

1. Unité CNRS/ENS-PSL/École polytechnique/Sorbonne Université. 2. Unité CNRS/CEA/UVSQ. 3. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre des projets Xaida - L'intelligence artificielle pour la détection et l'attribution des événements extrêmes et Eidi (european weather Extremes: Drivers, Predictability and Impacts).

Un homme skie dans les rues de Madrid, le 9 janvier 2021. La tempête Filomena a apporté un temps hivernal que la péninsule Ibérique n'avait pas connu depuis des décennies.

sont très rares, il est souvent difficile de prouver que leur probabilité d'apparition a changé à cause du changement climatique », pointe Aglaé Jézéquel. Ainsi, en 2015, une nouvelle façon de faire est apparue, qui tente plutôt de comprendre les mécanismes à l'origine de ces événements extrêmes. Les chercheurs peuvent ainsi expliquer comment le réchauffement global modifie la puissance, la durée ou encore l'extension géographique des catastrophes naturelles.

C'est dans ce courant que se situent les recherches de Davide Faranda, chercheur au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement². Avec son équipe, il vient de proposer une nouvelle méthode d'attribution qui n'est pas passée inaperçue dans la communauté des climatologues. En effet, celle-ci se passe de modèles climatiques pour utiliser seulement des observations météorologiques actuelles et passées. En voici un exemple.

Tempête sur la Corse

La nuit du 17 au 18 août 2022, un système orageux en provenance des Baléares frappe soudainement la Corse avec des rafales dépassant les 220 km/h. Bilan : 5 morts, 45 000 personnes privées d'électricité et des dégâts considérables, au nombre desquels 90 bateaux coulés ou jetés sur les rochers. La tempête continue son chemin vers l'Italie et l'Autriche, faisant encore sept morts. Tout au long de son parcours, elle s'accompagne de pluies torrentielles.

Ce phénomène extrême se range dans la catégorie des *derechos*, des orages soudains et puissants qui peuvent parcourir des centaines de kilomètres. Assez fréquents dans les plaines américaines, ils sont extrêmement rares en France. Les chercheurs ont donc voulu savoir si cette tempête pouvait être attribuée au changement climatique³. Pour ce faire, il ont commencé par établir, grâce à une carte des pressions atmosphériques, quels étaient les grandes masses d'air et les systèmes de haute et basse pression au moment de la tempête : « L'été 2022 a été marqué par des systèmes de basses pressions situés entre le Portugal et la France, que l'on appelle en jargon "gouttes froides". Lorsqu'ils étaient proches du Portugal, ces systèmes faisaient remonter vers le nord de l'Europe des masses d'air chaud venues d'Afrique, causant des conditions de canicule. Leur déplacement vers l'est, en revanche, était la cause d'orages en France. En effet, leur rencontre avec les masses d'air chaud méditerranéennes a produit des tempêtes et des rafales de vent comme celles du 18 août », explique le chercheur.

Deuxième étape : déterminer si une situation semblable s'était déjà produite avant que le changement climatique ne commence à peser sur l'atmosphère. Pour cela, Davide Faranda a utilisé ERA 5, une base de données européenne qui fournit, heure par heure, les paramètres météorologiques de l'atmosphère, de la surface terrestre et de la mer depuis 1950. Il y a cherché des configurations



Dictionnaire juridique du changement climatique, M. Torre-Schaub, B. Lormeteau, A. Jézéquel et A. Michelot (dir.), Mare & Martin, nov. 2022, 584 p. 49 €.

Un dictionnaire pour le changement climatique

Avec près de 200 entrées écrites grâce à la participation de 160 auteurs, cet ouvrage répond à l'ambition d'établir une première nomenclature interdisciplinaire du changement climatique, à dominante juridique. Un éclairage original et indispensable pour saisir les concepts et enjeux du dérèglement climatique et de ses conséquences.

similaires. Résultat : entre 1959 et 1979, cette configuration s'est produite au moins une trentaine de fois alors qu'aucune tempête de la même ampleur n'a été enregistrée. C'est donc que quelque chose a changé. Et ce quelque chose, Davide Faranda l'a trouvé, toujours grâce aux données ERA 5 : « La différence, c'est qu'au moment de la tempête, la température de la Méditerranée était 5 degrés au-dessus de la moyenne saisonnière. » Ce qui a boosté les forces de convection ayant conduit à la tempête. La quantité de vapeur d'eau accumulée dans l'atmosphère, résultat de cette Méditerranée surchauffée, a quant à elle provoqué des orages destructeurs. Conclusion du chercheur : « Notre analyse montre le rôle important du changement climatique dans l'intensité du derecho du 18 août. »

Gros plan sur les événements extrêmes

L'équipe a utilisé cette même méthode de comparaison entre une période à faible changement climatique et le présent pour étudier une série d'événements survenus en 2021 : le cyclone Ida aux États-Unis, la vague de froid du mois de mars en France, les tornades sur la vallée du Pô en Italie, la tempête hivernale Filomena en Espagne, le cyclone méditerranéen Apollo, etc. Dans la plupart des cas, ils ont trouvé un lien très clair avec le changement climatique. Cependant, Filomena et Apollo ont mis à mal leur méthode : « Comme on n'a pas trouvé de configuration semblable, nous sommes incapables de déterminer le rôle du changement climatique dans leur occurrence », regrette Davide Faranda.

Mais pour le chercheur, « les modèles climatiques globaux ne permettent pas de simuler le climat local avec une précision suffisante pour modéliser les phénomènes extrêmes. Notre travail est complémentaire : on repère les phénomènes rares et, en étudiant leur dynamique, on donne des pistes aux modélisateurs pour mieux le représenter ». Des résultats qui permettent, en outre, de mieux évaluer les risques météorologiques encourus par un territoire et d'informer les politiques sur les stratégies d'adaptation à entreprendre. II



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

Le réchauffement en France s'annonce pire que prévu

TERRE

CLIMAT En adaptant à la France la méthode utilisée par le Giec pour estimer le réchauffement planétaire, des scientifiques viennent de revoir à la hausse les températures qui attendent l'Hexagone. D'ici 2100, cette augmentation serait de 3,8 °C par rapport au début du XX^e siècle, et ce dans un scénario d'émissions modérées de gaz à effet de serre.

PAR SEBASTIÁN ESCALÓN

L'optimisme n'est pas de mise. Le réchauffement climatique au cours du XXI^e siècle en France pourrait être 50 % plus intense que ce que l'on pensait. C'est le résultat de nouvelles projections sur le climat futur qui viennent d'être réalisées par une équipe du CNRS, de Météo-France et du Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique¹. Si les tendances actuelles d'émissions de carbone se maintiennent, la température moyenne de l'Hexagone sera 3,8 °C supérieure à celle du début du XX^e siècle. Un chiffre qui pose d'immenses défis d'adaptation et qui promet des changements sévères dans l'agriculture et les écosystèmes français.

À la COP27, le CNRS met l'océan sur le devant de la scène

Pour la première fois, le CNRS, au côté de nombreux partenaires scientifiques internationaux, était présent au travers d'un pavillon dédié à l'océan lors de la COP 27 qui s'est tenue à Charm el-Cheikh, en Égypte, du 6 au 18 novembre dernier. L'occasion de souligner le rôle de l'océan dans les futurs défis climatiques et de biodiversité, et de soutenir la création de l'IPOS, « panel international pour un océan durable », sorte de « Giec de l'océan » porté par Françoise Gaill, conseillère scientifique au CNRS.

Lire l'entretien avec Antoine Petit, PDG du CNRS, et Françoise Gaill, sur CNRS Info : <https://bit.ly/3hQRhSo>

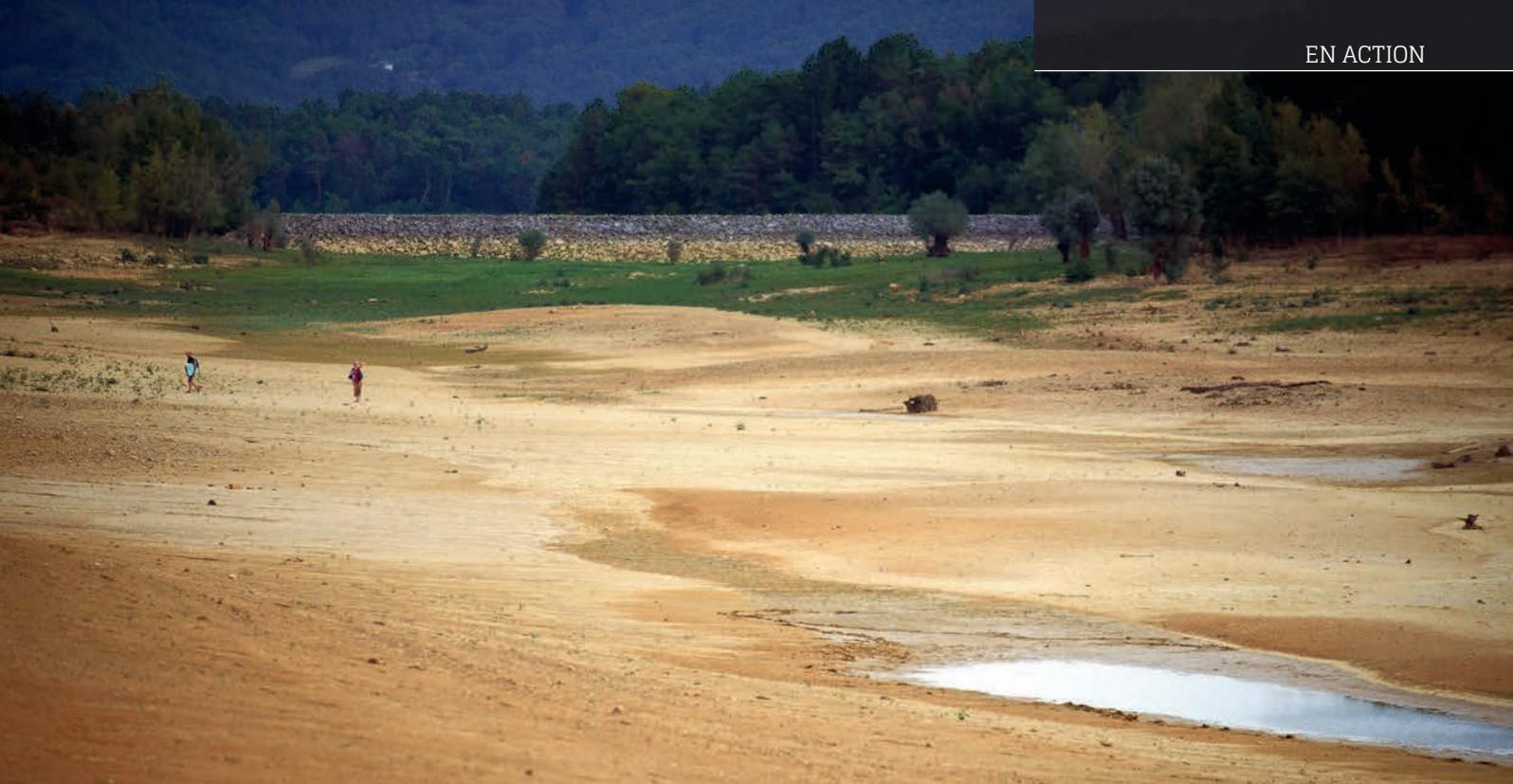
Pour arriver à ce résultat, les chercheurs ont employé une méthodologie nouvelle. Développée par cette même équipe, elle a été utilisée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) dans le premier volet de son sixième rapport, paru en 2021. L'innovation principale est l'utilisation de données climatiques observées pour contraindre les modèles. En d'autres termes, à partir d'un éventail de simulations climatiques réalisées grâce aux modèles utilisés par le Giec, les chercheurs identifient celles qui sont en accord avec les mesures de température récoltées depuis plus d'un siècle. Ainsi, ils peuvent identifier les projections les plus robustes, et réduire les incertitudes.

Une méthodologie adaptée aux échelles locales

L'autre originalité de ces travaux, publiés le 4 octobre dans la revue *Earth Systems Dynamics*², est qu'ils offrent des projections à l'échelle française. « *Le Giec propose des scénarios de réchauffement climatique au niveau planétaire et au niveau de grandes régions comme l'Europe ou le bassin méditerranéen. Mais il ne va pas en-dessous. Or il existe un appétit pour des projections à des échelles plus réduites* », explique Aurélien Ribes, chercheur au Centre national de la recherche météorologique³(CNRM). Pour cela, les chercheurs ont utilisé les données récoltées par une trentaine de stations météorologiques réparties sur toute la France, connues pour avoir enregistré les températures de façon homogène sur de longues périodes. Ainsi, les premières mesures fiables datent de 1899.

Grâce à ces données, l'équipe a calculé le réchauffement climatique actuel et montré que la température moyenne de la France actuelle est 1,7 °C supérieure à celle entre 1900 et 1930. Un chiffre bien au-dessus de la hausse moyenne de températures à l'échelle globale, que le Giec évalue à 1,2 °C. Rien d'anormal là-dessus : « *La hausse globale des températures prend en compte les océans qui se*

1. Le Cerfacs est un centre de recherche fondamentale et appliquée, spécialisée dans la modélisation et la simulation numérique 2. <https://esd.copernicus.org/articles/13/1397/2022/esd-13-1397-2022-discussion.html> 3. Unité CNRS/Météo-France. 4. Unité CNRS/Cerfacs.



© ALAIN PITTON/NURPHOTO VIA AFP

réchauffent moins vite que les continents », explique Aurélien Ribes. La hausse moyenne des températures continentales dans le monde étant de 1,6 °C, la France ne fait donc pas figure d'exception.

Les aérosols créent la surprise

Les modèles climatiques montrent que la hausse future des températures est directement proportionnelle aux émissions de gaz à effet de serre et que l'origine humaine du changement climatique français ne fait aucun doute. Une chose en revanche a surpris les chercheurs : l'impact des aérosols : « *On n'imaginait pas qu'ils avaient une telle incidence sur le climat français*, affirme Julien Boé, de l'unité Climat, Environnement, Couplages et Incertitudes⁴. *On observe que, jusque dans les années 1980, l'effet des aérosols a masqué le réchauffement climatique, au point qu'il n'apparaît quasiment pas dans les instruments.* »

Particules en suspension dans l'atmosphère, les aérosols sont rejetés en grande quantité notamment lors de la combustion des carburants fossiles et empêchent les rayons du soleil d'atteindre la surface. Cette pollution a un puissant effet refroidissant. Or, jusque dans les années 1980, pollution et gaz à effet de serre grimpaient de concert. Leurs effets respectifs sur le climat s'annulaient mutuellement. Puis, à la fin du XX^e siècle, les nouvelles régulations et les technologies plus propres ont réduit de façon spectaculaire la pollution. Résultat, l'effet des aérosols sur le climat a chuté et la courbe des températures s'est emballée vers le haut.

L'insoutenable été 2100

Dans un deuxième temps, les chercheurs ont voulu anticiper le climat français à la fin du XXI^e siècle. Ils ont pour cela utilisé les simulations climatiques en fonction de différents scénarios décrivant l'état du monde en 2100. Ces

▼ Conséquence de l'intense sécheresse qui a touché tout le territoire cet été, de nombreux cours d'eau et réservoirs ont été asséchés, à l'image du lac de retenue de Montbel, en Ariège.

scénarios construits par le Giec vont du plus optimiste – un monde dans lequel un immense effort international a permis d'atteindre la neutralité carbone dès 2050 – au plus pessimiste – un monde divisé par de fortes inégalités et qui continue à carburer aux énergies fossiles. Entre ces deux extrêmes, un scénario intermédiaire où les émissions de carbone n'augmentent ni ne diminuent drastiquement. D'après les experts, c'est celui qui est le plus en accord avec les tendances actuelles et les engagements climatiques pris par les grands pays émetteurs pour les prochaines années.

Sur la base de ce dernier scénario, ils ont montré que la France de 2100 pourrait être 3,8 °C plus chaude que celle du début du XX^e siècle. Une telle hausse serait particulièrement marquée pendant les étés, qui pourraient être en moyenne 5 °C plus chauds par rapport aux décennies 1900-1930. « *Ceci aura des impacts très forts sur les écosystèmes et les cultures. On aura des pics de chaleur beaucoup plus fréquents et chauds, et des sécheresses plus intenses et prolongées. Dans ces conditions, l'un de points clés sera comment maintenir les ressources en eau et comment les utiliser* », annonce Julien Boé.

Ces projections devraient servir à mettre en place des politiques d'atténuation et d'adaptation. À présent, les chercheurs du CNRM veulent descendre encore les échelles et simuler l'avenir climatique des régions françaises. Par ailleurs, ils espèrent que d'autres équipes à travers le monde adopteront leur méthodologie. « *Le code à la base de ces travaux est à la disposition de tous. Il permettra à d'autres équipes ou d'autres services météorologiques de refaire ces calculs facilement pour leur pays ou leur région* », conclut Aurélien Ribes. ||



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

Déviation d'astéroïde « DART, c'est trois succès en un! »



► Les deux astéroïdes et le panache de poussière se détachant de Dimorphos juste après l'impact, vus par le Liciacube de l'agence spatiale italienne.

© IMAGE ASI/NASA



UNIVERS

ENTRETIEN Le 26 septembre, dans le cadre d'un test de défense planétaire grande nature, la sonde de la Nasa a impacté avec succès le petit astéroïde Dimorphos, en orbite autour d'un plus gros, Didymos. Détails de cette réussite avec Patrick Michel, à la tête de la mission européenne Hera qui analysera les effets de cette collision.

PROPOS RECUEILLIS PAR LOUISE MUSSAT

Quelques semaines après l'impact de Dart sur Dimorphos, quels enseignements peut-on déjà tirer de la mission ?

Patrick Michel ¹. On peut déjà affirmer que c'est un succès, et même trois ! Le premier : nous avons montré que nous sommes capables de taper à haute vitesse sur un objet de seulement 160 mètres de diamètre dont seule la taille était connue à l'avance. Après un voyage de dix mois, nous n'avons découvert le visage de la cible qu'une heure avant l'impact ! Dans la salle de contrôle de l'APL ², aux États-Unis, en découvrant ce monde totalement nouveau, nous avons ressenti

une intense émotion, c'était génial... Notre deuxième succès, c'est d'être parvenus à monter une campagne d'observation internationale de l'impact avec des instruments au sol situés partout sur la planète, y compris en Antarctique, et dans l'espace avec les télescopes Hubble et James Webb. Et enfin troisième succès : nous avons bel et bien modifié la trajectoire de Dimorphos autour de Didymos !

Et de façon impressionnante ! Les mesures de luminosité du duo, réalisées depuis le sol, ont en effet montré que la petite lune a ralenti de 32 minutes, contre 73 secondes

qui était l'objectif minimum. Avez-vous été surpris par ce résultat ?

P. M. Non, mais nous étions contents. On savait déjà, grâce aux missions précédentes à destination des astéroïdes, que ces astres réagissent de façon contre-intuitive. Un exemple : il y a quelques années, le projectile de 2 kilogrammes envoyé à 2 kilomètres par seconde sur Ryugu par Hayabusa2 (à comparer au 570 kg de Dart lancé à 6 km/s) a creusé un cratère de 17 mètres de diamètre, beaucoup plus grand que ce à quoi l'on s'attendait. Il a mis dix minutes à se former et continuait à se creuser même une fois l'onde de choc passée, tandis que sur Terre un cratère d'impact se forme en quelques secondes. L'attraction de surface de ces petits corps y étant beaucoup plus faible, on a l'impression qu'un astéroïde est constitué de blocs solides alors qu'il peut s'agir de roches ayant très peu de cohésion.

Forts de ces informations, nous avons mené une campagne de modélisation d'impacts via le consortium Neo-Mapp que je coordonne avec le CNRS, financé par le pro-

1. Directeur de recherche CNRS au laboratoire Lagrange de Nice (Unité CNRS/ Université Côte d'Azur/Observatoire de la Côte d'Azur). 2. Johns Hopkins University Applied Physics Lab.

gramme Horizon 2020 de l'Union européenne. Les résultats avaient révélé que, selon la structure de Dimorphos – que l'on ne connaît pas –, le crash de Dart pouvait provoquer tout un panel de modifications allant du ralentissement léger de la trajectoire jusqu'à la déformation complète de la cible et une plus grande déviation.

Que vous reste-t-il à comprendre de ce tout premier exercice de défense planétaire ?

P. M. Pour caractériser l'efficacité de l'opération, il nous faut mesurer la quantité de mouvement que l'on a réussi à transmettre à Dimorphos. Et cette mesure dépend de sa masse, qu'il est donc crucial de déterminer. Cela nous permettra aussi de comprendre le rôle des éjectas de matière dans la modification de l'orbite. Juste après l'impact, le cubesat italien Licia-cube, puis un peu plus tard les télescopes James Webb et Hubble, ont pris des photos incroyables du panache de poussière, qui, comme celui d'une fusée au décollage, propulse le corps dans la direction opposée. Ce n'est qu'une fois ces paramètres précisés que nous pourrions correctement calibrer une mission de défense planétaire en cas de danger.

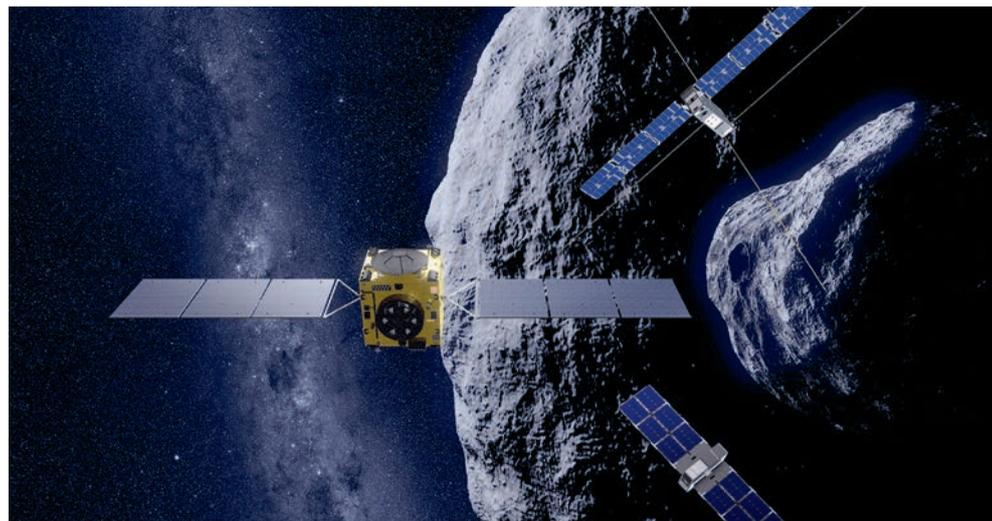
Quelles sont les étapes à suivre pour y parvenir ?

P. M. La principale, c'est la mission Hera dont je suis le responsable scientifique. Développée par l'Agence spatiale européenne (ESA), elle a pour objectif d'ausculter le système double Didymos/Dimorphos afin notamment de fournir une documentation complète du résultat de l'impact de Dart, déterminer la masse de Dimorphos et caractériser entièrement les propriétés physiques et de composition de l'astéroïde. Elle s'envolera avec une Falcon 9 de Space X en octobre 2024, pour arriver à destination fin 2026 puis explorer le système pendant six mois. Hera est équipée de toute une série d'instruments dont des caméras visuelles et hyperspectrales, un imageur infrarouge de l'agence spatiale japonaise (Jaxa) qui fournira des données sur les proprié-

tés thermiques du système, un altimètre laser qui permettra de déterminer la topographie du duo et une expérience de radio science qui contribuera à déterminer la masse de Dimorphos.

Par ailleurs, le vaisseau déploiera deux cubesats à même de communiquer avec le vaisseau mère, qui mesureront le champ de gravitation du système binaire ainsi que les propriétés de Dimorphos, en particulier et pour la première fois les propriétés internes grâce à un radar basse fréquence d'expertise française, avec une contribution du Centre national d'études spatiales (Cnes) qui est aussi en charge des opérations des cubesats. Ces mesures sont également indispensables pour fournir des paramètres plus réalistes à nos scénarios de l'histoire des collisions dans le Système solaire, collisions qui ont forgé toutes les planètes et les petits corps ! C'est toute la communauté qui attend l'arrivée d'Hera avec impatience...

▲ Illustration de la mission européenne Hera en approche du système double Didymos/Dimorphos.



Justement, comment se fait-il qu'elle ne soit pas arrivée sur place en même temps que Dart ?

P. M. Je suis le premier à le regretter, d'autant que Dart et Hera sont nées ensemble, en Europe. Après l'abandon de Don Quijote, la première mission de défense planétaire que nous avions étudiée à l'ESA dans les années 2000, je discutais déjà avec un collègue de l'APL³ des options possibles pour faire renaître la mission. Un peu plus tard, nous avons même

dessiné les contours de la nouvelle mission sur une nappe en papier dans un restaurant mexicain à Pasadena ! C'est alors que nous avons eu l'idée d'impacter la lune d'un système binaire qui passerait suffisamment près de la Terre pour être observé par les télescopes au sol. Nous avons imaginé un vaisseau-projectile accompagné d'un vaisseau observateur, qui devait arriver sur place avant l'impact. C'est ainsi que sont nées Dart et Hera – qui s'appelaient à l'époque AIM –, une double mission estampillée Nasa pour Dart et ESA pour AIM/Hera.

Malheureusement, AIM s'est fait retoquer faute de soutien budgétaire. Nous avons alors fourni des efforts énormes pour optimiser le projet. En 2019, la mission fut finalement approuvée grâce au travail incroyable de toute une équipe de chercheurs et d'ingénieurs, souvent jeunes, à qui je veux rendre hommage.

Dans la salle de contrôle le 26 septembre, je n'ai pas pu m'empêcher de penser que c'était quand même dommage que l'ESA, pourtant à l'avant-garde en matière de défense planétaire, ne partage pas le triomphe de cette première mondiale. C'eût été une formidable occasion de susciter des vocations chez les jeunes de notre continent... Ça sera pour dans quatre ans ! ||

3. Andy Cheng, à l'APL, puis Ian Carnelli de l'ESA avec qui nous avons fait l'étude de Don Quijote.

La médiation, une démarche pour dépasser les conflits



© P. BEYMA/DR

ENTRETIEN Depuis 1995, le CNRS possède un service dédié de médiation interne pour tous ses agents, pouvant être contacté directement, à tout moment. Retour sur ses objectifs avec Pascale Beyma, médiatrice interne du CNRS depuis juin 2021.

PROPOS RECUEILLIS PAR SAMAN MUSACCHIO

Quelles sont vos principales missions en tant que médiatrice interne ?

Pascale Beyma. Le CNRS, comme beaucoup de grands organismes de recherche et d'entreprises, possède un service de médiation qu'il a mis en place il y a vingt-sept ans. Cette pratique demeure assez mal connue ou peu utilisée au sein de l'organisme. Sa mission est de prévenir et gérer de façon amiable des conflits interpersonnels, individuels ou collectifs entre agents du CNRS ou avec des personnes exerçant leurs fonctions dans un laboratoire, département ou service du CNRS, ayant des répercussions sur la relation de travail. Elle peut ainsi intervenir dans le cadre de difficultés de communication ou de tensions entre deux scientifiques d'une unité, les agents et le directeur d'unité, un doctorant et son encadrant, au sein d'une équipe administrative, etc. Il s'agit d'un espace confidentiel d'écoute et de dialogue entre agents vivant un différend relationnel, qui permet la co-construction de solutions adaptées aux besoins de chacun. Les agents peuvent me contacter directement, à tout moment, qu'ils aient ou non tenté d'autres recours internes au préalable. Ma mission inclut également un rôle de conseil et de facilitatrice qui peut m'amener à intervenir comme intermédiaire en cas de difficultés administratives entre un agent et des services du CNRS.

Comment est géré un conflit ?

P. B. Lorsqu'un agent me contacte concernant un conflit interpersonnel avec un autre agent, je lui propose un entretien individuel en visioconférence afin d'échanger et de comprendre le contexte et la situation, et de lui

expliquer mon rôle et celui de la médiation. S'il souhaite entamer une démarche de médiation, je lui demande son accord pour contacter la personne avec laquelle il est en conflit, afin de lui proposer à son tour un entretien individuel. Le second agent est entièrement libre de refuser le rendez-vous ou la démarche de médiation, car celle-ci est basée sur le volontariat. Le contraire serait contre-productif. Les entretiens individuels, tout comme la rencontre de médiation sont confidentiels, c'est essentiel pour libérer la parole. Si les deux agents sont partants, j'organise une rencontre commune, en ma présence, qui va leur permettre de s'exprimer sur ce que chacun vit et de s'écouter. Car la médiation tient à cela : il faut vouloir faire cesser



© JAVISTOCK/ADORE.COM

En bref

le conflit, être capable de parler à la personne en face et d'écouter ce que l'autre a à dire. C'est ce qu'on appelle le « pas de côté ». Mon rôle est de faciliter cet échange et cette écoute. L'objectif est que ces personnes, au bout d'une ou deux rencontres, parviennent à trouver des solutions pour faire cesser le conflit et travailler plus sereinement.

Comment se gèrent des situations de conflits au sein de collectifs ?

P. B. La démarche est à peu près la même. Cependant, je dois être mandatée par une personne extérieure au conflit. Cela peut être le délégué régional ou le service des ressources humaines par exemple. Cela ne peut pas se faire par une personne qui est au cœur du conflit, car elle serait juge et partie. Dans une situation de conflit collectif, j'interviens systématiquement avec un autre médiateur – je fais donc appel à mes réseaux de médiateurs internes, comme celui de l'enseignement public et de la recherche. Nous proposons tout d'abord une réunion d'information à l'ensemble du collectif, suivie d'entretiens individuels avec les personnes volontaires. Nous faisons ensuite une analyse de la situation et regardons si la médiation nous semble appropriée et si une majorité de personnes sont volontaires, ou si, au contraire, un autre moyen nous semble plus adapté pour favoriser une sortie de conflit.

Combien de temps cela prend-il, et comment sait-on si le conflit est résolu ?

P. B. Cela peut se faire en quelques mois. Lorsqu'on me contacte – de préférence par mail –, je réponds sous 48 heures. Je réalise les entretiens individuels. Le plus long va être de trouver une date pour une rencontre commune. La rencontre de médiation en elle-même peut se faire rapidement et, si besoin, il y en a une deuxième, chacune durant deux à trois heures. Au bout de deux rencontres, il est possible de savoir si les personnes réussiront à parvenir à un accord ou pas. La procédure individuelle est donc assez rapide, un à deux mois. Pour les conflits collectifs, le processus peut être un peu plus long en raison du nombre de personnes concernées.

Y a-t-il des conflits particuliers liés au monde de la recherche ?

P. B. Les conflits sont inhérents aux relations humaines car nous sommes tous différents. Au travail, les personnes s'opposent en raison de divergences sur la vision qu'elles ont du travail ou du management, parce qu'elles ne partagent pas les mêmes valeurs ou le même mode de communication... La médiation permet à chacun de mettre des mots sur son ressenti. Il est très difficile de faire des typologies. Il me semble que le monde de la recherche présente les mêmes problématiques de conflit que l'ensemble du monde du travail. **||**

Pour contacter Pascale Beyma, médiatrice du CNRS :

la-mediatrice@cnrs.fr



Noema atteint ses pleines capacités

La douzième antenne du radiotélescope Noema, installé dans les Alpes françaises sur le plateau de Bure, a été inaugurée le 30 septembre dernier. Fruit d'une collaboration entre le CNRS, la Max-Planck-Gesellschaft (MPG, Allemagne) et l'Instituto Geográfico Nacional (IGN, Espagne), Noema devient ainsi le plus puissant radiotélescope millimétrique dans l'hémisphère Nord. Construit et géré par l'Institut de radioastronomie millimétrique (Iram) et déjà à l'origine de découvertes majeures, il est maintenant prêt à réaliser des observations sans précédent.

Décarbonons l'ESR

Un projet commun de l'IRD et du CNRS est lauréat du défi « Innovation écoresponsable », porté par le Commissariat général au développement durable (CGDD) du ministère de la Transition écologique et la Direction interministérielle de la transformation publique (DITP). Intitulé « Décarbonons ! Une trajectoire bas carbone pour l'Enseignement supérieur et la Recherche (ESR) », ce projet « flash » sera financé à hauteur de 42 000 € pour une durée de six mois, d'octobre 2022 à mars 2023.

Un club avec les entreprises

Le 7 octobre, le CNRS a lancé son club CNRS-Entreprises pour aider les dirigeants à saisir les nouveaux enjeux scientifiques et les éclairer sur les changements que la science pourrait apporter au monde socio-économique. Ce club, créé par la Direction des relations avec les entreprises (DRE) et dirigé par Sabrina Biarrotte-Sorin, propose au moins une rencontre mensuelle pour décrypter des sujets complexes avec des dirigeants de start-up, de PME, de grands groupes mais aussi de fédérations, de médias, d'institutions, de sociétés d'innovation.

Pour une réforme de l'évaluation

Le 28 septembre, la Commission européenne a ouvert à la signature un accord dont les signataires constitueront une coalition pour réformer l'évaluation de la recherche. Le CNRS a fait partie des premiers signataires.

Lire l'entretien avec Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS, paru sur CNRS Info : <https://bit.ly/3AqHWWK>

Ces échantillons qui ont marqué l'histoire

7381 échantillons

composent la collection. Ils sont présentés dans des vitrines installées dans la salle de cours de la première école de chimie en France, créée au Muséum par Edmond Frémy en 1864 et transférée rue Buffon en 1872, restaurée en 2021.



Voir l'intégralité du diaporama sur lejournald.cnrs.fr

MATIÈRE

Niché au cœur du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, le laboratoire Molécules de communication et adaptation des micro-organismes¹ abrite en son sein de précieux échantillons. Vieux de plus d'un siècle, ils viennent d'être nettoyés et inventoriés par l'équipe du laboratoire. Christine Maulay-Bailly, responsable technique de la chimiothèque, nous en fait découvrir une sélection.

de la chimie

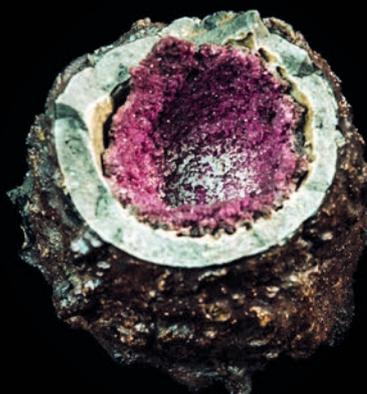


Résine de la Mecque

« De cette résine, sans doute étudiée par les chimistes du Muséum au début du XX^e siècle, était extraite le baume de Judée également nommé "baume de la Mecque" ou "baume de Galaad". Cette résine aux reflets dorés, à l'odeur citronnée et à la saveur amère, était utilisée dans la Grèce et la Rome antiques comme parfum et médicament, notamment pour cicatriser les plaies, et soigner les maux d'estomac ou intestinaux. »

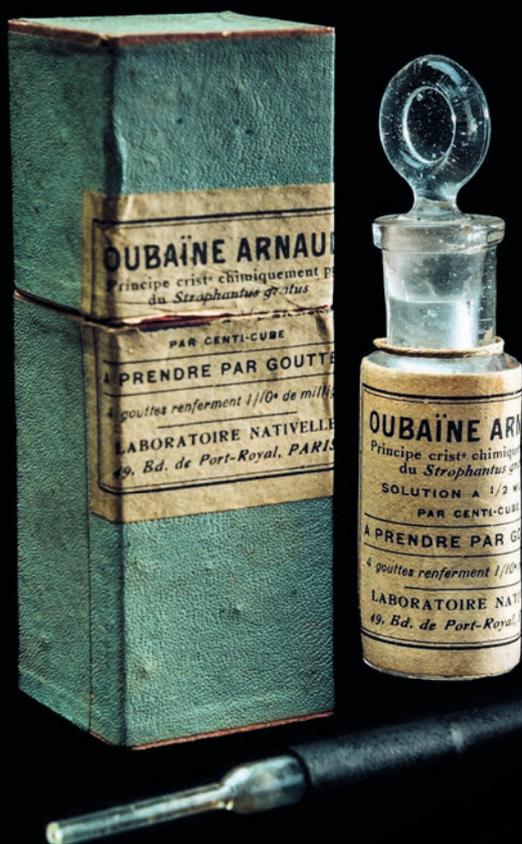
Rubis de synthèse

« Voici les premiers rubis de synthèse (présentés dans leur creuset) autrefois utilisés dans les mécanismes des montres. Et c'est au laboratoire de chimie du Muséum qu'Edmond Frémy, et ses collaborateurs Charles Feil puis Auguste Verneuil, ont réussi vers 1875 à réaliser la synthèse du rubis, une gemme rare, chère mais très recherchée pour son extrême dureté. Frémy en fit faire un collier pour sa femme qui suscita l'admiration lors d'une soirée au palais de l'Élysée. »



L'alun de chrome

« L'alun de chrome, qui se présente sous la forme d'octaèdres cristallins violets, est obtenu par un mécanisme très rare : en faisant s'évaporer ensemble une solution d'alun et une autre de chrome, les deux composants se combinent au lieu de se cristalliser séparément. Le résultat illustré par cet échantillon estimé de la fin du XIX^e siècle montre des cristaux beaucoup plus colorés que les deux éléments séparés. »



L'Oubaïne

« Le chimiste Léon Albert Arnaud avait reçu d'un célèbre voyageur, nommé Revoil, des poisons de flèches provenant de Somalie dont le waba, un poison foudroyant obtenu à partir d'une plante, l'Ouabaïa. En 1888, il isola le glucoside responsable des effets du poison qu'il nomma "oubaïne" et qui devint ensuite un médicament utilisé contre les insuffisances cardiaques aiguës. On sait depuis Paracelse, alchimiste, que c'est la dose qui fait le poison. »

1. MCAM - unité CNRS/MNHN

Les échappées inattendues du CNRS

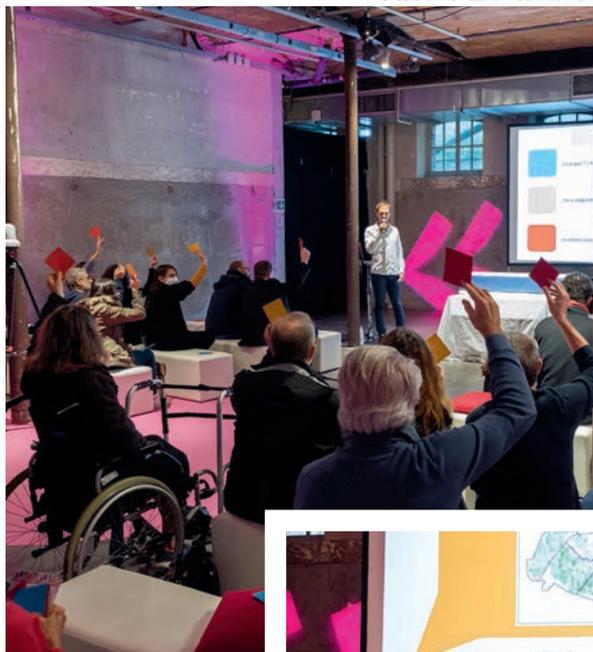
Les 18 et 19 novembre a eu lieu à l'espace parisien Centquatre le premier événement du CNRS sous la marque « Les échappées inattendues – la science racontée par le CNRS ».

PAR SOPHIE FÉLIX

« **A**voir un vrai scientifique devant soi qui nous explique et rend accessibles ses travaux, c'est vraiment très chouette ! » Venus au Centquatre en ce samedi 19 novembre pour une exposition d'art contemporain, Charles et Lucie auront finalement découvert les recherches menées à Notre-Dame de Paris et exploré Mars au travers d'une conférence immersive. Débats, ateliers, démonstrations en direct... Tous les formats du nouveau label « Les échappées inattendues – la science racontée par le CNRS » étaient représentés lors de cet événement de lancement parisien qui a reçu plusieurs centaines de visiteurs. Par-delà ce baptême réussi, c'est désormais sous cette nouvelle signature que les publics peuvent retrouver les événements de médiation scientifique du CNRS. « Cette marque "ombrelle" donne de la cohérence et de la visibilité à l'ensemble de nos actions sur tous les territoires : nous entendons ainsi devenir une référence identifiable par le public », explique Antoine Petit, président-directeur général de l'organisme.

Expositions, conférences, débats, ateliers pédagogiques et animations didactiques... Les chercheurs et chercheuses de l'institution participent en effet chaque année à de nombreuses opérations grand public et événements au niveau national comme régional. « La médiation scientifique fait partie de l'ADN du CNRS, depuis sa création, à la fin des années 1930, par le prix Nobel de physique Jean Perrin en même temps que le Palais de la Découverte », assure Antoine Petit. La marque vient donc structurer cette offre auprès des publics, en créant une identité forte, et donne encore plus d'ampleur et d'écho à l'action du CNRS pour partager les connaissances les plus en pointe dans tous les domaines, et montrer comment la recherche fondamentale peut se mettre au service de la société.

PHOTOS © DAVID PELL - DPMULTIMEDIA/CNRS



▲ Marc Baaden lors de la micro-conférence « De la santé à la cuisine, plongez dans les mondes nanoscopiques ».





► Carole Fritz lors de la conférence immersive « Une descente au cœur de la grotte Chauvet ».

► « L'informatique sans ordinateur, c'est possible ? », une conférence-démo animée par Éric Duchêne et Aline Parreau.

► Grégoire Borst, Aurélie Lebranchu Guillaume Huet et Céline Darnon au cours du débat grand format consacré aux inégalités éducatives.

Inspirées des opérations nationales Ma thèse en 180 secondes et Les Visites insolites – déployées en région sous une bannière commune et qui bénéficient d'une belle visibilité et d'un succès réel auprès du grand public – ces Échappées auront lieu partout en France, le temps d'une soirée, d'un débat. Elles s'adressent au public habituel du CNRS, déjà féru de sciences, mais vise aussi à « *élargir le cercle* » en allant davantage à la rencontre de curieux que la science impressionne parfois, qui pensent s'ennuyer dans une conférence scientifique ou craignent de ne pas tout comprendre. « *Nous avons décidé qu'il fallait effacer ces complexes inutiles et*

démontrer que, comme toute activité culturelle, la science peut intéresser, amuser et faire passer une bonne soirée à n'importe qui d'entre nous », déchiffre le PDG. Les échappées inattendues proposent donc une expérience qui tisse un pont entre médiation scientifique et sortie culturelle.

Au-delà des événements, le dispositif comprend aussi une rediffusion des conférences sur la chaîne Youtube du CNRS, un hashtag #EchappéesInattendues, une identité graphique originale, etc. Les dix-huit délégations régionales du CNRS pourront s'en saisir et mettre en place des Échappées sur tout le territoire. « *L'idée est de montrer que le CNRS est présent à l'événement organisé juste à côté de chez vous, mais aussi sur vos réseaux sociaux et dans toutes vos habitudes culturelles* », conclut Antoine Petit. ||



Retrouvez plus d'informations et tous les événements sur echappeesinattendues.cnrs.fr

Quatre formats pour tous les publics

La marque « Les échappées inattendues – la science racontée par le CNRS » s'organise autour de quatre formats qui ont déjà fait leur preuve par le passé dans des événements comme le Forum du CNRS ou les rencontres Sciences et Citoyens.

 **LE DÉBAT GRAND FORMAT** : un format sur un temps long, qui permet de débattre et de dialoguer librement avec les scientifiques sur des thèmes d'actualité.

 **LES MICRO-CONFÉRENCES** : trois courtes interventions se succèdent, offrant plusieurs éclairages issus de différentes disciplines autour d'un même thème scientifique.

 **LA CONFÉRENCE IMMERSIVE** : un format qui permet une plongée dans les recherches et l'environnement de travail des scientifiques grâce à un espace composé de trois murs d'écrans.

 **LA CONFÉRENCE-DÉMO** : basé sur l'interaction, ce format combine des manipulations faites par le public avec les explications scientifiques qui s'y rapportent.

En bref

À TOKYO, LE 3^E IRC DU CNRS

Le 4 octobre, le CNRS et l'université de Tokyo se sont associés pour créer un International Research Center (IRC), le troisième de l'organisme français à l'étranger. Ce nouveau pôle scientifique vise à impulser une recherche et une formation d'excellence sur les thèmes de collaboration existants ou sur de nouveaux axes. Ce partenariat s'inscrit dans une histoire ancienne, marquée par l'existence de trois International Research Laboratories (IRL) partagés : le Limms sur les microsystèmes électromécaniques, depuis 1995 ; le JFLI sur l'informatique, depuis 2012 ; et Ilance sur l'astrophysique, les neutrinos et la cosmologie, depuis 2021. À ces trois IRL s'est ajouté un quatrième créé ce même 4 octobre : Dynacom, commun entre le CNRS, l'université de Rennes 1 et l'université de Tokyo. Il explorera les matériaux sous toutes leurs formes : magnétisme, conductivité, ferroélectricité, photonique.

PREMIER ACCORD-CADRE AVEC UNE ETI FRANÇAISE

Le 23 septembre, le CNRS et Berger-Levrault, éditeur de logiciels notamment pour les collectivités locales, ont renforcé leur collaboration en signant un accord-cadre d'une durée de cinq ans pour répondre aux enjeux de la ville durable. L'objectif est en effet d'accélérer le développement de services numériques qui améliorent les performances sociales, environnementales et économiques des territoires et lancer de nouveaux projets de recherche pour relever ces différents défis. Ce partenariat favorisera la co-construction d'un programme scientifique commun sur le long terme et se traduira par la signature chaque année de plusieurs contrats avec des laboratoires, qu'il s'agisse de contrats de collaboration ou de thèses Cifre, ou encore de la création de laboratoires communs.



Sur la planète rouge, deux rovers en quête de vie

© CNES/DUCROS DAVID, 2021

UNIVERS

ASTROPHYSIQUE Petite cousine de la Terre, Mars a peut-être vu éclore la vie au début de son histoire. Pour en avoir le cœur net, les rovers de la Nasa Curiosity, lancé il y a dix ans et Perseverance, qui l'a rejoint sur la planète rouge en février 2021, poursuivent leur enquête de terrain.

PAR MATHIEU GROUSSON

À perte de vue, Mars est aujourd'hui un désert aride, plombé de soleil, impropre à la vie. Pourtant, les planétologues en ont la certitude : la planète rouge, dans son jeune âge, a suivi une évolution semblable à celle de la Terre et aurait offert, sans doute pendant plusieurs centaines de millions d'années, des conditions favorables à l'apparition de la vie et à son développement. Mieux, Mars étant dénuée de tectonique des plaques et moins soumise à l'érosion que la planète bleue, il est tentant de considérer que des traces de ce loin-

tain passé, correspondant à la période où la vie a éclos sur la Terre, sont toujours accessibles au sein des sédiments martiens, renfermant peut-être même le secret de nos origines.

Des instruments de pointe pour prélever et analyser

Pour tenter de le percer, le rover Curiosity arpente la surface martienne depuis maintenant dix ans. En 2021, il a été rejoint par son alter ego Perseverance, dont les derniers résultats viennent d'être publiés¹. En une décennie, les deux rovers de la

Nasa télécommandés depuis la Terre ont largement contribué à renouveler notre vision de la planète rouge. Précisément, Curiosity, imaginé par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) pour la Nasa, est un véritable laboratoire mobile. Pesant près d'une tonne, il est doté de dix instruments scientifiques complémentaires, dont deux sont à très forte participation française : ChemCam, qui permet l'analyse élémentaire des roches et des sols jusqu'à quelques mètres de distance et SAM, un laboratoire de physico-chimie miniature dédié à l'analyse des gaz.

Quant à Perseverance, sa mission essentielle consiste à poursuivre l'exploration géologique et à prélever une quarantaine d'échantillons qui seront ramenés sur Terre, au cours de la prochaine décennie, pour être analysés précisément. Le rover peut notamment compter sur l'instrument franco-américain SuperCam pour

1. Lire l'article sur CNRS Info : <https://tinyurl.com/2ezb6dvs> 2. Unité CNRS/Cnes/Université Toulouse Paul Sabatier 3. Unité CNRS/Sorbonne Université/UVSQ.

► **Illustration du rover Perseverance, avec son instrument SuperCam qui met en œuvre la technique de spectroscopie induite par laser.**

caractériser le contexte de prélèvement de ses échantillons. Celui-ci a été développé sous la responsabilité du Centre national d'études spatiales (Cnes) pour la partie française, et sa construction a également impliqué le CNRS et des universités. Sylvestre Maurice, astronome à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie² (Irap), en est le coresponsable scientifique. Comme ChemCam, SuperCam met en œuvre la technique de spectroscopie induite par laser, informant sur la chimie des cycles, mais également la spectroscopie Raman et la spectroscopie infrarouge qui permettent de déterminer la nature des minéraux visés ainsi que leur degré d'hydratation.

Une vie microbienne possible il y a 3,6 milliards d'années

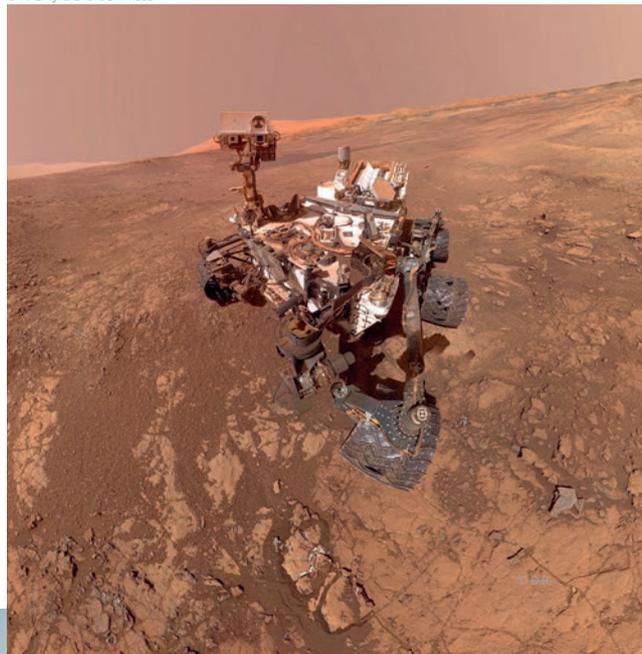
Depuis son arrivée en août 2012, plus précisément sur le plancher du cratère Gale, Curiosity travaille selon un programme décidé quotidiennement depuis la Terre, auquel participent les

scientifiques français dans le cadre d'une étroite collaboration entre le Cnes et le JPL, aux États-Unis, d'où les instructions sont envoyées au rover. Explorant pour commencer le site de Yellowknife Bay, une dépression couverte de sédiments dégagés par l'érosion, il y observe des cailloux dont la forme indique qu'ils ont été roulés dans l'eau. La batterie d'instruments scientifiques est alors mise en action. Conclusion : ces sédiments ont une origine lacustre, et les minéraux qu'ils renferment se sont formés dans une eau relativement douce et au pH neutre. De plus : carbone, hydrogène, azote, oxygène, phosphore et soufre, tous les éléments nécessaires à la vie sont présents. Enfin, certains des minéraux observés auraient pu être utilisés par des micro-organismes pour en extraire de l'énergie. C'est désormais une certitude : il y a environ 3,6 milliards d'années, Mars était habitable par d'éventuels micro-organismes.

► **Autoportrait de Curiosity sur le sol martien (en haut). En arrière plan, le Mont Sharp dont le rover explore actuellement les pentes, étudiant la succession des couches sédimentaires (en bas).**

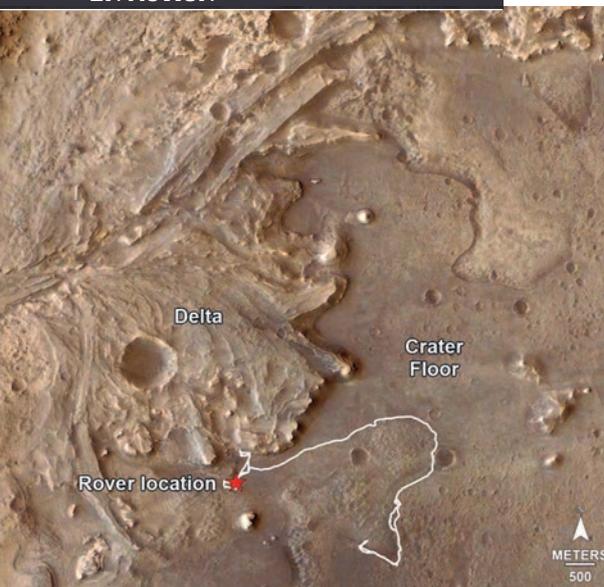
La suite de la mission ne fera que le confirmer. Comme le détaille Cyril Szopa, au Laboratoire atmosphères et observations spatiales³, « depuis son arrivée sur Mars il y a dix ans, Curiosity a parcouru 28 kilomètres et franchi un dénivelé de 600 mètres. Or partout où nous avons prélevé et analysé des échantillons de sol, plus d'une trentaine en tout, nous avons mis en évidence la présence possible de traces de matière organique, ainsi que des espèces inorganiques ... »

© NASA/JPL-CALTECH/MSS



© NASA/JPL-CALTECH





© NASA/JPL/CALTECH/UNIVERSITY OF ARIZONA/USGS/JHU/APL

utilisées par le vivant sur Terre, tels des nitrates. Il y en a partout ! Ainsi, la zone d'habitabilité d'abord circonscrite à Yellowknife Bay pourrait être plus largement étendue à l'ensemble du cratère Gale, renforçant l'image d'une Mars ancienne couverte de lacs. »

Tout récemment, les scientifiques ont par ailleurs réétudié les données de SAM enregistrées à Yellowknife Bay. Résultat annoncé lors de plusieurs conférences : la mise en évidence des produits de dégradation d'acides carboxyliques, soit les composants de base des membranes cellulaires !

Des indices sur l'histoire climatique

Curiosity a ensuite entrepris l'ascension du mont Sharp qui se trouve au centre du cratère Gale, étudiant la succession des couches sédimentaires. « Après avoir observé des sédiments riches en argiles, le rover se trouve maintenant dans ce que nous appelons la zone de transition vers les couches riches en sulfates, décrit Olivier Gasnault, chercheur à l'Irapet coresponsable scientifique de ChemCam. Cette transition témoigne probablement du changement climatique qui, il y a environ 3 milliards d'années, a vu la planète passer d'un climat humide au désert ardent qu'elle est devenue. » Comment précisément ? C'est désormais à cette question que les spécialistes vont s'atteler alors que

► **L'itinéraire de Perseverance, depuis son site d'atterrissage au fond du cratère Jezero jusqu'au delta de l'ancienne rivière qu'il explore actuellement. L'étoile rouge indique son emplacement en septembre 2022.**

la mission du rover vient d'être prolongée jusqu'en 2025 par la Nasa et ses partenaires.

Pour l'heure, les images ont révélé une architecture fine de couches alternativement friables et résistantes, typique de dépôts dans une plaine d'inondation fluviale. « C'est peut-être le signe que durant la période de transition, le climat a oscillé entre périodes humides et sèches, ou qu'elles ont coexisté, formule Oliver Gasnault, qui est également responsable de la fonction imageur de SuperCam. Dans tous les cas, cela élargit encore la fenêtre d'habitabilité qui sur le site s'est probablement prolongée pendant des millions d'années au fond du cratère, voire des centaines de millions d'années dans le sous-sol. » L'enquête se poursuit.

Des preuves de la présence d'eau à l'état liquide

En choisissant de faire atterrir Perseverance dans le cratère Jezero, les planétologues ont vu juste. Âgé de près de 4 milliards d'années, donc un peu plus ancien que Gale, ses terrains sont typiques de la période où l'eau liquide a dû être la plus abondante sur Mars. « C'est d'autant plus intéressant que c'est durant cette période que la vie est apparue sur la Terre », précise Cathy Quantin-Nataf, enseignante-chercheuse au Laboratoire de géologie de Lyon : Terre, Planètes, Environnement⁴ et co-investigatrice de SuperCam. Par ailleurs, les images prises depuis l'espace ont révélé ce que les spécialistes ont interprété comme le delta d'une rivière, « soit un lieu d'accumulation de matière où l'on peut s'attendre à ce qu'ait été enfouie et bien conservée une importante quantité de matière organique », poursuit la géologue.

« En imageant les sédiments de la colline Kodiak, nous avons nettement vu les strates typiques d'un ancien delta, ainsi que de gros galets arrondis de près d'un mètre de diamètre, témoignant de crues catastrophiques sans doute survenues dans les périodes tardives de la vie du lac », décrit Olivier Beyssac, chercheur à l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie⁵ et co-investigateur de

SuperCam. « Après presque deux ans de mission, l'échantillonnage du fond du cratère est terminé, celui du delta est en cours, puis nous explorerons les pourtours du cratère où l'on imagine trouver des carbonates typiques de sédiments lacustres, énumère Cathy Quantin-Nataf. Cela clôturera la mission nominale dont la fin est programmée pour 2023. »

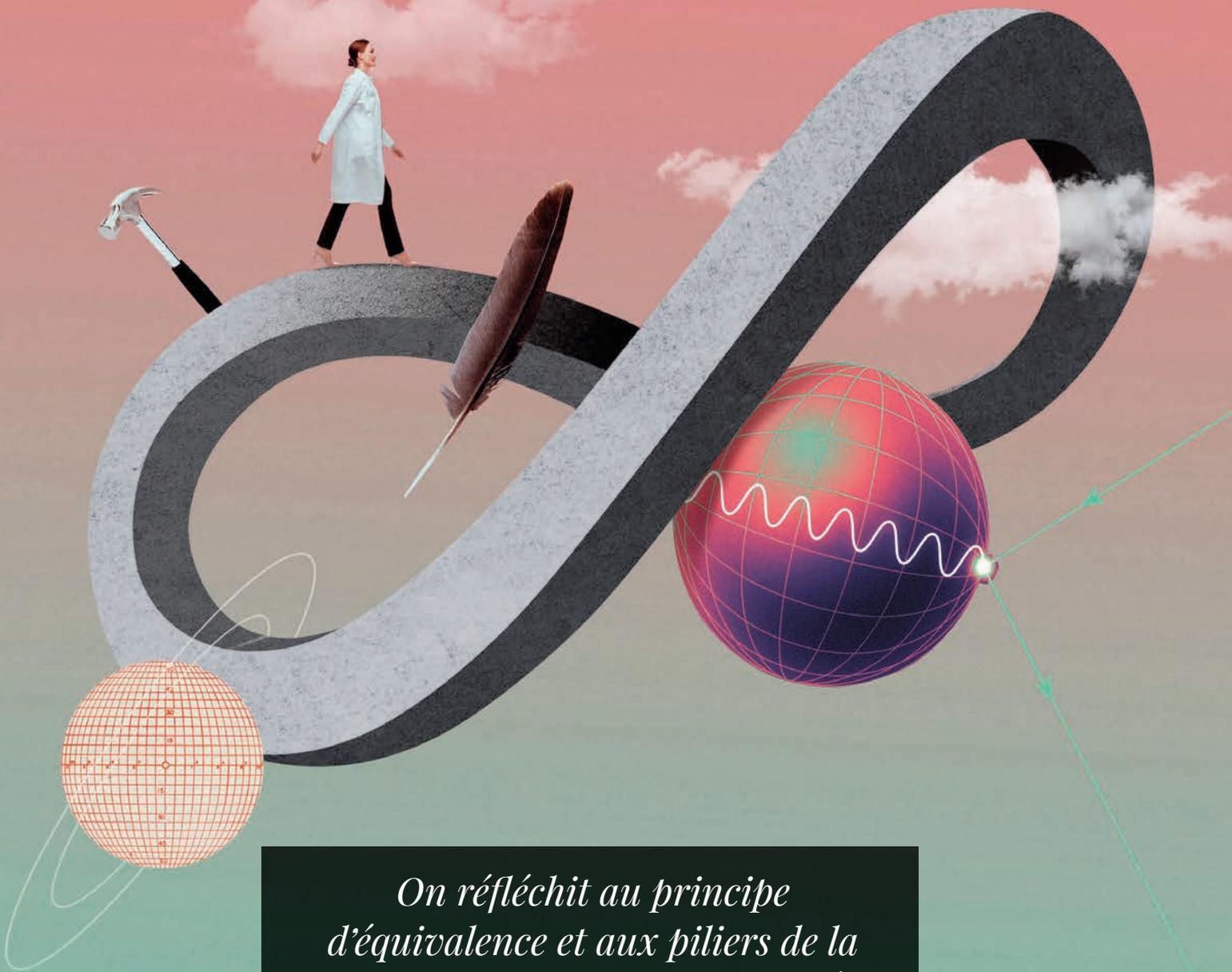
Des roches magmatiques qui intriguent

Parmi les roches déjà analysées in situ, certaines ont surpris les spécialistes. Une étude publiée fin août, pour laquelle tous les instruments de Perseverance ont été mis à contribution, révèle ainsi la présence de roches magmatiques au fond du cratère Jezero : des roches basaltiques issues de coulées de lave, mais également d'autres roches constituées d'une accumulation d'olivine. Or comme l'analyse Olivier Beyssac, « sur Terre, un tel cumulat d'olivine se forme en profondeur avant d'être exhumé via les processus tectoniques et l'érosion. Mais sur Mars, nous n'avons pas encore de scénario global pour expliquer leur présence au fond du cratère... » Une seule certitude, « nous pensons que ces roches sont antérieures à la formation du lac, et que les incrustations de sels présentes dans leurs porosités résultent probablement de l'évaporation de l'eau au fond du cratère », explique sa collègue.

Pour en avoir le cœur net, les scientifiques devront attendre au moins jusqu'en 2033, date prévue pour l'arrivée des échantillons, alors que les deux missions programmées pour leur récupération doivent décoller en 2026. Une partie de la suite de l'aventure martienne s'écrira alors depuis la Terre ! ▮

Retrouvez cet article en intégralité ainsi que tous nos contenus consacrés à la planète Mars et à son exploration dans le dossier « La recherche à la conquête de Mars » sur lejournal.cnrs.fr

LES IDÉES



*On réfléchit au principe
d'équivalence et aux piliers de la
physique, de l'infiniment petit à
l'infiniment grand.*

Du quark à l'Univers, la physique d'un infini à l'autre

Pourquoi aborder l'infiniment grand et l'infiniment petit dans un seul ouvrage ? Qu'est ce qui les lie l'un à l'autre ?

Ursula Bassler¹. L'ambition des physiciens est de faire une description cohérente de l'Univers basée sur des lois universelles. Le lien entre la physique de l'infiniment grand et celle de l'infiniment petit s'établit naturellement. On cherche à montrer à quel point les observations cosmologiques ont des conséquences sur la physique des particules, et vice-versa. Par exemple, le boson de Higgs découvert en 2011, a joué un rôle fondamental aux premiers instants de l'Univers. On sait aussi qu'au moment du Big Bang, il y avait autant de matière que d'antimatière. Or, nous sommes dans un Univers fait de matière. Savoir ce qu'est devenue l'antimatière est une question qui tracasse autant les cosmologistes que les physiciens des particules.

Autre exemple, on sait que l'Univers est en expansion sous l'impulsion d'une énergie noire et s'est structuré grâce à la présence de matière noire. Les physiciens de l'infiniment petit sont actuellement à la recherche des manifestations particulières de cette matière. Enfin, il y a tout un pan de la physique qui s'intéresse aux astroparticules. Les rayons cosmiques, les neutrinos cosmiques, les ondes gravitationnelles sont tous des messagers des phénomènes astrophysiques qui se déroulent dans l'Univers.

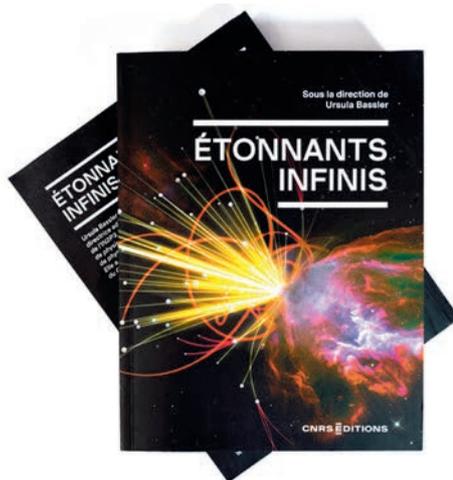


MATIÈRE

UNIVERS

ENTRETIEN Quels sont les liens entre l'infiniment petit et l'infiniment grand ? Comment les briques fondamentales de la matière s'assemblent-elles pour former des étoiles, des galaxies ou des trous noirs ? *Étonnants infinis* nous embarque au cœur d'une grande aventure scientifique retracée par une quarantaine de chercheurs. Ursula Bassler, coordonnatrice de l'ouvrage, nous en explique les enjeux.

PROPOS RECUEILLIS PAR SEBASTIÁN ESCALÓN



À lire :
Étonnants infinis,
Ursula Bassler (dir.),
CNRS Éditions,
nov. 2022, 336 p., 24 €.

Quel a été le processus de rédaction ?

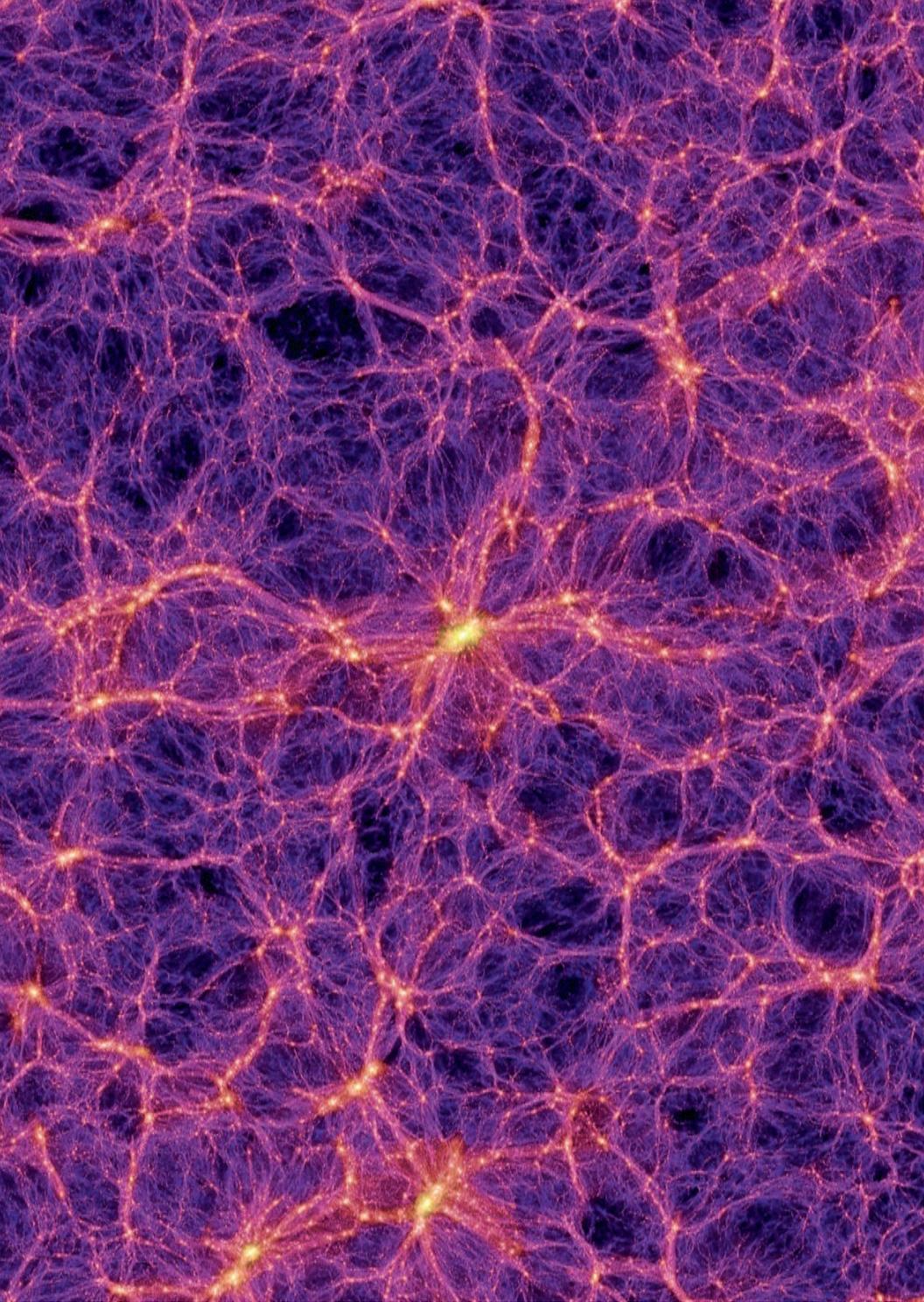
U. B. Il s'agit d'une œuvre collective basée sur les contributions de quarante chercheurs de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3), mais aussi de l'Institut de physique (INP) et de l'Institut national des sciences de l'Univers (Insu) du CNRS. Les scientifiques ont réalisé un effort important pour vulgariser et rendre concrète leur recherche. Ensuite, nous avons retravaillé les textes pour obtenir un récit

qui se lise facilement et qui présente le contexte historique des grandes découvertes. Quelque chose qui caractérise la recherche dans les sciences physiques est qu'elle se fait le plus souvent au sein de grandes collaborations internationales. Ce livre a été conçu dans le même esprit collaboratif pour donner un aperçu large de la recherche à l'IN2P3.

L'ouvrage est riche en phénomènes physiques qui dépassent notre expérience quotidienne et notre entendement. Comment faites-vous pour les rendre accessibles au grand public ?

U. B. En effet, on trouve de nombreuses idées étranges comme celle d'un vide qui n'est pas vide, mais produit des particules, des neutrinos qui oscillent, un espace-temps qui tremble ou de l'antimatière qui pourrait « tomber » vers le haut. Ce sont des phénomènes physiques bien éloignés de la vie de tous les jours. Au-delà du texte, nous avons tenté d'illustrer ces concepts avec des infographies qui guident le lecteur et l'aident à se faire une image mentale de ces concepts. Nous avons inclus

1. Directrice adjointe scientifique de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) du CNRS.



© SCIENCE PHOTO LIBRARY / SPRINGEL VOLMER / MAX PLANCK INSTITUTE FOR ASTROPHYSICS

beaucoup d'images, de belles images, car nous voulions aussi que ce livre soit beau regarder.

Étonnants infinis s'intéresse aussi aux méthodes et aux instruments ayant mené aux grandes découvertes. L'histoire des deux infinis, c'est aussi l'histoire des moyens et de l'inventivité des scientifiques ?

U. B. En effet, il y a un échange perpétuel entre science et technologie. Les avancées technologiques

permettent d'accéder à de nouvelles connaissances et en même temps, les questions scientifiques poussent au développement de nouvelles technologies. C'est fascinant de voir le chemin parcouru depuis les premières émulsions photographiques pour capturer la trace des particules et les grands détecteurs du LHC. Il faut aussi noter que dans ces disciplines, les instruments sont conçus et développés dans les laboratoires avant d'être construits en collaboration

► Les scientifiques cherchent des traces de la fameuse matière noire qui leur échappe encore.

avec des industriels. Un autre aspect important est le traitement des données. La physique des particules produit massivement des données, au point que, jusqu'en 2014, une part majoritaire des données qui circulaient via Internet étaient celles produites par le LHC.

Les applications technologiques qui découlent de ces grandes théories et expériences sont également abordées. Pourquoi s'intéresser aussi à ces questions ?

U. B. On croit souvent que la cosmologie et la physique des particules sont des sciences abstraites sans lien avec le quotidien. On voulait montrer que c'est le contraire, et qu'il y a un lien entre l'infiniment abstrait et l'infiniment concret. Les méthodes et les résultats de ces recherches ont des applications en imagerie médicale, par exemple, ou dans les instruments qui permettent d'imager l'intérieur d'un volcan. Sans oublier, bien sûr, la création du World Wide Web au Cern. On aborde aussi la problématique de l'énergie nucléaire et celle de la radioactivité dans l'environnement. Tout cela fait aussi partie de la physique des deux infinis.

Un des grands sujets qui parcourt ce livre est l'idée d'unification de la physique des deux infinis. Pensez-vous que nous sommes proches de ce moment charnière où l'on réussira à réunir ces deux physiques en une seule grande théorie ?

U. B. Je n'en ai aucune idée, mais la création d'une théorie de la gravitation quantique permettant d'unir la gravitation qui agit à grande échelle et la mécanique quantique qui décrit le monde microscopique est une des motivations pour continuer ces recherches. Pendant longtemps, les recherches expérimentales étaient guidées par les prédictions théoriques. Actuellement je crois que c'est l'expérimentation et les observations qui doivent montrer le chemin. Ce sont elles qui signaleront, peut-être, des incohérences dans les modèles physiques actuels et nous donneront ainsi les pistes d'une nouvelle physique. ▮

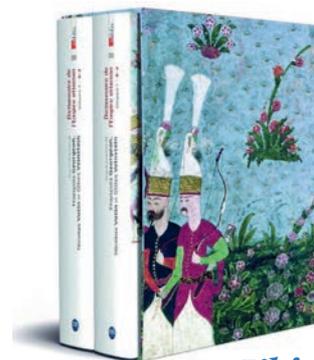
Les voix oubliées de la propagande française

C'est une réalité qui est sortie peu à peu de notre mémoire collective : dans les premières décennies du XX^e siècle, le disque était aussi un outil de propagande pour les organisations politiques de tous bords. Les discours communistes des années 1930, le chant militant « Ouvrier, prends la machine » produit par la SFIO, ancêtre du parti socialiste, les chansons royalistes de l'Action française, le discours de Léon Blum, alors futur président du Conseil, en 1929, ou encore le message patriotique adressé par le général de Gaulle aux enfants de France pour Noël 1941 et enregistré sur des disques parachutés par la Royal Air Force... Ces quelques archives font partie des 900 disques désormais rassemblés et répertoriés sur la toute nouvelle plateforme PSXX (Propagande sonore enregistrée au XX^e siècle) grâce au travail d'historiens passionnés, qui peuvent désormais étudier ce fonds jusqu'alors méconnu.

▶ [Voir la vidéo sur lejournal.cnrns.fr](https://www.cnrns.fr)



À voir, à lire



L'histoire de l'Empire ottoman

Grâce à la contribution de 175 auteurs de nationalités diverses, ce dictionnaire offre 720 notices pour percevoir et comprendre ce qu'était l'Empire ottoman. Formé à la fin du XIII^e siècle et disparu dans les premières décennies du XX^e, multilingue, multiconfessionnel, celui-ci s'étendait à son apogée d'Alger à Budapest, en passant par Alexandrie, Bagdad et bien sûr Constantinople, sa capitale.

Dictionnaire de l'Empire ottoman (coffret en 2 volumes), François Georgeon, Nicolas Vatin et Gilles Veinstein (dir.), CNRS Éditions, nov. 2022, 2 368 p., 39 €.

▶ La plateforme PSXX rassemble 900 références sonores dont 250 ont déjà un lien d'écoute.



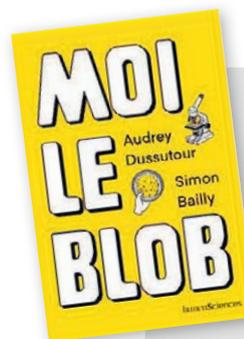
© CNRS 2022 - SONIA COLLEWITZA



Un dictionnaire pour les marins

En 1848, Augustin Jal, archiviste de la Marine, publie un inestimable répertoire de termes de marine anciens et modernes, le *Glossaire nautique*. En 1970, sous la houlette du CNRS, une équipe de chercheurs décida de reprendre cet ouvrage référence et de l'augmenter en élargissant ses horizons. Publiée en une dizaine de tomes jusqu'en 2021, cette œuvre collective se retrouve réunie en deux volumes qui offrent un panorama exceptionnel du langage des « gens de la mer ».

Nouveau glossaire nautique d'Augustin Jal. Dictionnaire des termes de la marine à voile. Révision de l'édition de 1848, Sous la responsabilité scientifique de Michel Mollat du Jourdin (vol. I), d'Élisabeth Ridet-Granger et André Zysberg (vol. II), CNRS Éditions, nov. 2022, 2 300 pages, 110 €.



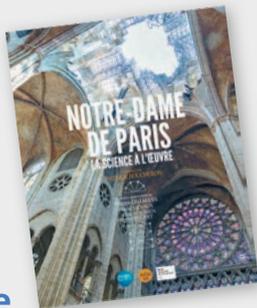
Le blob en librairie

Pour la première fois, et en exclusivité mondiale, le blob, superstar de la vulgarisation scientifique depuis quelques années,

nous livre son autobiographie. Aidé en cela par la plume d'Audrey Dussutour, directrice de recherche au CNRS et lauréate de la médaille de la médiation en 2021, et bande dessinées à l'appui, il nous parle de sa vie d'organisme sans système nerveux mais capable d'apprendre et de se régénérer.

Moi le blob, Audrey Dussutour et Simon Bailly, humenSciences, oct. 2022, 248 p., 18 €.

Notre-Dame, une aventure scientifique

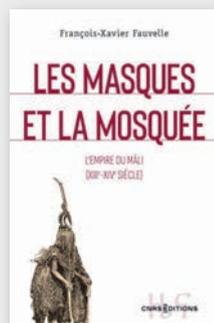


Le 15 avril 2019, l'impensable se produit : Notre-Dame de Paris brûle. Après la sidération, le besoin de sauver, mais aussi d'étudier, se manifeste rapidement. Un vaste chantier scientifique se met en place sous la direction du CNRS et du ministère de la Culture. Neuf groupes de travail sont constitués : acoustique, bois et charpente, métal, numérique, structures, pierre... Leur objectif ? Percer les secrets de la construction de la cathédrale la plus célèbre et paradoxalement la moins étudiée de France, et répondre aux questions que pose sa restauration. C'est leur apport que ce beau livre richement illustré retrace.

Notre-Dame de Paris. La science à l'œuvre, Philippe Dillmann, Pascal Liévaux, Aline Magnien et Martine Regert (dir.), Éditions du Cherche midi, coll. « Beaux livres », sept. 2022, 184 p., 35 €.

L'empire du Mâli

Constatant et analysant les carences, approximations, erreurs factuelles et lieux-communs qui remplissent la fiche Wikipedia consacrée à l'empire du Mâli, l'africaniste François-Xavier Fauvelle s'interroge sur les raisons de l'ignorance qui continue d'entourer l'histoire des entités politiques africaines antérieures à la colonisation. Partant de là, ce professeur au Collège de France, titulaire de la chaire Histoire et archéologie des mondes africains, reconstitue l'histoire politique, économique et religieuse de l'Afrique médiévale, en se basant sur les textes arabes, la tradition orale et les données fournies par l'archéologie.



Les masques et la mosquée. L'empire du Mâli (XIII^e-XIV^e siècle), François-Xavier Fauvelle, CNRS Éditions, coll. « Zéna », sept. 2022, 296 p., 25€.

Un monde éphémère

De la mer qui mousse à la flamme de l'allumette qui danse, en passant par le

nuage qui se forme dans notre bol de thé, notre quotidien est rempli de ces petits spectacles plus ou moins éphémères qui reposent sur la fluidité de la matière et illustrent l'impermanence du monde.

« *L'ambition de ce livre est de donner à voir le monde en mouvement, d'en explorer les rythmes, annoncent ses auteurs. Avec un parti pris assumé, celui de le voir sous l'angle de la physique, et plus précisément des écoulements de fluides, de décrypter les forces qui le dessinent et l'animent.* »

L'impermanence du monde. La physique de l'éphémère, Etienne Guyon, Jean-Pierre Hulin, Frédéric Moisy et Marc Rabaud, Flammarion, oct. 2022, 336 p., 26 €.



Des protéines aux super pouvoirs

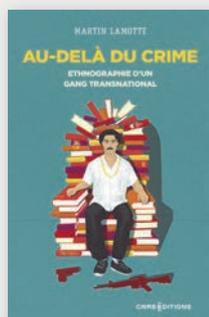
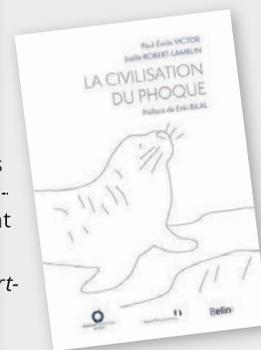
Du célèbre tardigrade au requin centenaire en passant par les guêpes parasites, le monde animal est plein de surprises dues à des protéines bien particulières. Ce livre, suite d'un premier opus sur les protéines paru il y a un an, nous fait découvrir ce drôle de bestiaire et ces molécules, véritables « ouvrières invisibles », leur rôle, leur diversité et leur complexité.

Protéines 2. Le carnaval du vivant, Sophie Sacquin-Mora, illustrations Anmryn, EDP Sciences, octobre 2022, 96 p., 19 €.

Au cœur d'un peuple arctique

Dans ce très beau livre préfacé par Enki Bilal, s'appuyant sur les textes et dessins de Paul-Emile Victor, l'anthropologue Joëlle Robert-Lamblin nous fait découvrir la société des Ammassalimiut au Groenland. Et percevoir à quel point les conditions de vie des populations de l'Arctique, entre sédentarisation et réchauffement climatique, ont radicalement changé ces cinquante dernières années.

La Civilisation du phoque, de Paul-Emile Victor et Joëlle Robert-Lamblin, Belin, oct. 2022, 448 p., 35 €.



Enquête sur un gang Qu'est-ce qu'un gang ? En retraçant le parcours de membres des Ñetas – un gang né dans les prisons de Porto Rico qui a pris son essor sur la côte est des États-Unis au cours des années 1990, avant de s'étendre à l'Amérique latine et à l'Europe –, l'anthropologue Martin Lamotte a enquêté à New York, Guayaquil et Barcelone sur la manière dont un tel collectif s'est construit et transformé à l'heure de « la guerre contre la drogue ». Une ethnographie qui met en lumière la structuration, les lois et les rituels de cette « Asociación » et ce que cette dernière peut offrir à une population rejetée dans les marges du capitalisme.

Au-delà du crime – Ethnographie d'un gang transnational, Martin Lamotte, CNRS Éditions, coll. « Logiques du désordre », nov. 2022, 328 p., 24 €.

En attendant la chute du principe d'équivalence

© CNES/VIRTUAL-IT, 2017



MATIÈRE

UNIVERS

PHYSIQUE Lancée en 2016, l'expérience Microscope a confirmé avec une précision inédite le principe d'équivalence qui est au cœur de la théorie de la relativité générale d'Einstein. Deux physiciens nous expliquent les implications de ce résultat.

PROPOS RECUEILLIS PAR MARTIN KOPPE

Qu'est-ce que le principe d'équivalence ?

Serge Reynaud ¹. Selon le principe d'équivalence, deux corps lâchés en même temps dans le vide tombent avec une même vitesse et une même accélération, y compris s'ils sont de masses ou de compositions différentes. Galilée avait déjà étudié ce phénomène, notamment en utilisant des pendules. L'idée a été renforcée par les lois de Newton, où deux types de masses interviennent : la masse inertielle (*celle qui « s'oppose » à l'accélération d'un corps massif, nldr*) et la masse grave (*celle qui provoque l'accé-*

lération d'un corps massif sous l'effet de la gravité, nldr). Alors que rien a priori ne les oblige à être égales, Newton a constaté qu'elles sont visiblement identiques. Les expériences avec des pendules ont été affinées jusqu'au début du XX^e siècle, où elles ont vérifié que deux corps en chute libre avaient la même accélération avec une précision relative de 10^{-6} . Depuis, la précision a été portée jusqu'à environ 2×10^{-13} en utilisant des balances de torsion. En analysant les premières données de la mission en 2017, Microscope ² avait permis d'atteindre une précision record de 2×10^{-14} ,

encore nettement améliorée cette année dans nos résultats finaux avec un principe d'équivalence vérifié à $2,7 \times 10^{-15}$.

Pourquoi cherche-t-on à vérifier ou infirmer ce principe ?

S. R. Si le principe d'équivalence était déjà connu de Newton, le terme est véritablement devenu essentiel avec Albert Einstein, qui a construit sa théorie de relativité générale en postulant que le principe d'équivalence était vrai. Cela lui a notamment permis de ne pas faire intervenir la masse dans les mouvements liés à la gravité, qui n'est alors plus décrite comme une attraction entre deux objets, mais comme une déformation de la géométrie de l'espace-temps.

La théorie de la relativité générale a prédit de nombreux phénomènes avec succès, comme les ondes gravitationnelles qui ont été découvertes un siècle plus tard, mais on sait qu'elle est appelée à être un jour remplacée, car elle appartient à la physique classique et ne prend donc pas en compte

1. Directeur de recherche émérite au Laboratoire Kastler Brossel (CNRS/Collège de France/ENS-PSL/Sorbonne Université) et membre du Science Working Group de Microscope.

2. Le projet Microscope (Microsatellite à traînée compensée pour l'observation du principe d'équivalence) a été mis en œuvre par le Cnes, avec la participation de l'Onera, du laboratoire GéoAzur, de l'ESA, du Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique (DLR) ainsi que d'un groupe de travail scientifique (SWG) composé de différents experts (CNRS, Institut des hautes études scientifiques, Imperial College, université de Brême, DLR, université de Delft, Institut national de l'information géographique et forestière).

► Éclaté de l'instrument au cœur du satellite Microscope.

les phénomènes quantiques. Parvenir à unifier les théories de la gravitation avec celles du domaine quantique est un des principaux défis de la physique fondamentale contemporaine. Or la plupart des propositions qui s'en approchent prédisent une violation du principe d'équivalence. Savoir jusqu'à quelle précision ce principe est vérifié permet à la fois de tester la relativité générale et de réduire l'espace des possibles pour les théories d'unification.

Gilles Métris³. Il y a une ambiguïté sur le terme même de principe d'équivalence, car, normalement, un principe est accepté et n'a pas besoin d'être testé. Il s'agit bien d'un principe dans le cadre de la théorie de la relativité générale et de la théorie classique, mais ce n'est pas un principe absolu pour toute la physique.

Comment l'expérience Microscope explore-t-elle le principe d'équivalence ?

G. M. Le principe de l'expérience est assez simple puisque nous comparons juste la chute de deux corps. Pour cela, nous essayons d'obtenir la chute libre la plus longue possible, dans des conditions parfaitement contrôlées et avec un chronométrage extrêmement minutieux. Sur Terre, il existe des tours d'impesanteur comme celle de l'université de Brême, en Allemagne, qui permettent d'observer très précisément des chutes libres pendant quatre secondes.

Avec Microscope, la durée totale de chute libre cumulée utilisée dans nos mesures atteint cent trente-huit jours. Microscope y est parvenue car l'expérience s'est déroulée dans un satellite, or les corps en orbite sont comme en chute libre permanente. Les objets ont été installés dans une cage qui les protégeait des perturbations issues des résidus d'atmosphère. Cet enclos fonctionnait également comme un accéléromètre qui assurait

que les masses libres ne percutent pas les parois du satellite lui-même freiné par ces frictions. Ainsi, les deux masses tombaient, mais demeuraient maintenues par une force électrostatique. C'est en mesurant la force nécessaire pour contrecarrer leurs déplacements qu'on pouvait alors calculer leur accélération.

La précision de Microscope revient à détecter le poids d'une mouche qui se poserait sur un supertanker. Il est impossible de le faire directement et nous avons contourné cette difficulté par deux stratégies complémentaires. D'abord, comme les masses cylindriques et le satellite sont en chute libre, nous ne mesurons que des différences d'accélération, de l'ordre de grandeur de la fameuse mouche, et non pas l'accélération totale. Ensuite, le satellite Microscope était équipé de tout un système de micro-propulsion qui permettait de compenser les variations d'accélération du satellite dues aux frottements de l'atmosphère résiduelle. Ce système a permis de stabiliser le mouvement de rotation du satellite sur lui-même à un niveau jamais atteint auparavant. Micro-

► La tour d'impesanteur au Centre de technologie spatiale appliquée et de microgravité, à l'université de Brême (Allemagne).



© FRANK GAYDE /ISTOCK/ADOBEL.COM

scope s'est arrêté en 2018, avec l'épuisement du gaz alimentant le système de micro-propulsion.

D'où viennent donc les gains de précision qui vont ont permis d'obtenir ces résultats finaux ?

G. M. Depuis la publication des premiers résultats en 2017, nous avons continué à travailler pour réduire deux catégories d'erreurs. Les erreurs statistiques diminuent avec le temps et l'accumulation des mesures. C'est ainsi que nous avons amélioré notre précision d'un facteur dix. Mais ce faisant, nous nous exposons aux erreurs systématiques, qui surviennent lorsque l'on mesure un signal qui n'est en fait pas celui que l'on veut étudier. Nous avons donc réalisé de gros efforts pour prendre en compte différents effets, en particulier thermiques, afin de réduire leurs contributions aux erreurs systématiques.

Quelles sont les pistes futures pour vérifier ce principe avec encore plus de précision ?

S. R. Microscope offre un extraordinaire retour d'expérience, nous pouvons analyser ce qui a bien fonctionné et ce qui a limité la précision finale. Pour la suite, on retrouve deux grandes approches : utiliser les enseignements de Microscope pour monter un projet similaire, mais en plus précis, et mener les expériences avec des atomes refroidis par laser jouant le rôle des masses à comparer. Ce domaine a bénéficié de nombreuses avancées ces dernières années, offrant un contrôle et une précision toujours plus poussés.

G. M. L'Office national d'études et de recherches aérospatiales et le laboratoire GéoAzur⁴ ont déjà entrepris, sous l'égide du Centre national d'études spatiales, des premières études pour un successeur de Microscope dans l'objectif de faire cent fois mieux. Par ailleurs, un projet basé sur les atomes froids a déjà passé un premier filtre de sélection de l'Agence spatiale européenne. Ces processus sont donc déjà engagés, mais, dans le domaine spatial, l'aboutissement des projets est toujours assez long. ||

3. Directeur adjoint du laboratoire GéoAzur (CNRS/IRD/Observatoire de la Côte d'Azur) et co-investigateur principal de la mission Microscope. 4. Cf. note 3



de Denis Guthleben,
historien au CNRS

2022, année de l'égyptologie

La chimie, les mathématiques, la biologie et bientôt la physique d'un côté, la cristallographie, la lumière ou les sciences pour le développement durable de l'autre, il faut se rendre à l'évidence : nationales ou internationales, il n'y aura jamais assez d'années, hélas, pour découvrir et partager toute la richesse de la science. On aimerait néanmoins fournir ici une occasion supplémentaire, avec un champ de recherche qui aurait pu lui aussi célébrer son année en 2022 : l'égyptologie. Pour nos collègues qui étudient l'Égypte ancienne, pour toutes celles et ceux qui s'émerveillent devant leurs travaux, cette année est en effet l'occasion d'une double célébration.

Champollion tient l'affaire !

Il y a deux cents ans, Jean-François Champollion est parvenu à déchiffrer les hiéroglyphes au terme d'un effort surhumain : le 14 septembre 1822, il se serait précipité dans le bureau de son frère en hurlant « *Je tiens l'affaire !* », avant de tomber en syncope – la recherche produit parfois de telles commotions ! Revenu à lui, il s'est empressé de transmettre à l'Académie des inscriptions et belles-lettres ses observations, qui feront écrire à Chateaubriand dans ses *Études historiques* que « les monuments muets séculaires viennent de reprendre la parole dans leur désert ».

Ça comme qu'elles pourraient dissimuler d'autres vestiges... En effet, une pierre à angle droit apparaît : la première marche d'un escalier qui mène à la dépouille de Toutankhamon et aux trésors qui ont accompagné le pharaon dans l'au-delà ! C'est « la découverte du siècle », annoncent les journaux, et Howard Carter qui est magistralement parvenu à la mettre en scène ne les démentira pas.

Le CNRS à Karnak, Assouan, Alexandrie et ailleurs

C'est peu dire que l'égyptologie soulève les passions, et que depuis Champollion – et Bonaparte... – la France nourrit avec elle un lien privilégié dont le CNRS est l'un des dépositaires. Elle traverse en effet l'histoire de notre établissement, où les temps forts ne manquent pas non plus. Dès la Libération, le CNRS a été le partenaire de plusieurs opérations archéologiques, à Karnak surtout où ses missionnaires ont marché dans les traces d'Auguste Mariette. Et si la crise de Suez en 1956 a mis à mal leurs travaux, ils ont repris ensuite de plus belle : le centre franco-égyptien d'étude des temples de Karnak, une unité du CNRS soutenue par le Service des antiquités de l'Égypte et par nos Affaires étrangères, voit le jour en 1967.

Au printemps de cette même année, les Français se pressent aux portes du Petit Palais, à Paris, pour visiter l'exposition « Toutankhamon et son temps » dont Christiane Desroches-Noblecourt assure le commissariat : de nombreuses photos ont immortalisé l'événement, dont certaines montrent « la grande dame de l'égyptologie » guider avec assurance le ministre de la Culture André Malraux... mais Christiane Desroches-Noblecourt est surtout une chercheuse de terrain, qui a su remuer ciel et terre pour garantir le sauvetage des temples de Haute-Égypte menacés par la construction du barrage d'Assouan. À ce titre, et pour son œuvre immense, le CNRS lui a décerné en 1975 sa médaille d'or – la première fois, soit dit en passant, que la prestigieuse distinction était attribuée à une femme !

De la fondation du centre d'études alexandrines en 1990 à la modélisation 3D d'Amarna, la capitale d'Akhenaton, dévoilée dans les pages de *CNRS le Journal*¹, bien d'autres projets et travaux auraient mérité de figurer dans cette chronique... trop courte : de Saqqarah à Taposiris en passant par Ouadi el-Jarf, le CNRS conduit actuellement pas moins de onze missions en Égypte ! Bien que l'ambition ne soit pas de susciter envie ni jalousie, on prendra quand même le risque d'une conclusion partisane : si tous les champs de recherche vendent du rêve, certains disposent, à l'image de l'égyptologie, d'un peu plus de stock en réserve... ||

“ En 1975, le CNRS décerne sa médaille d'or à l'égyptologue Christiane Desroches-Noblecourt, première femme à recevoir la prestigieuse récompense. ”

L'émotion n'est pas moindre cent ans plus tard, dans la Vallée des Rois. Le 4 novembre 1922, un ouvrier égyptien travaillant sous la conduite d'Howard Carter s'emploie à déblayer des gravats à proximité du tombeau de Ramsès VI. Les fondations des cabanes du chantier de cette sépulture ont été trouvées à cet endroit, et l'archéologue britannique soup-

1. <https://lejournal.cnrs.fr/articles/amarna-la-cite-disparue-dakhenaton>

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS #13

Entrez dans les coulisses
de la recherche

#13 actuellement
en vente
en librairie et Relay

200 pages / 12,50 €



www.carnetsdescience-larevue.fr



CNRS ÉDITIONS



RELEVEZ LES DÉFIS DE DEMAIN,
REJOIGNEZ LE CNRS !



©FRÉDÉRIQUE PLAS/CNRS/PHOTOTHÈQUE

Du 5 décembre 2022 au 5 janvier 2023, le CNRS
recrute 270 chercheurs et chercheuses

www.cnrs.fr/fr/concours-ch