



Une nouvelle ère  
dans l'exploration  
de la matière

Regards croisés  
sur la guerre  
en **Ukraine**

La première image  
du trou noir  
de la Voie lactée

**CLIMAT**  
La science et la société  
face au défi du siècle

# CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS #12

Entrez dans les coulisses  
de la recherche

#12 actuellement  
en vente  
en librairie et Relay

200 pages / 12,50 €

## CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS

#12

DOSSIER

**LITTÉRATURE**  
enquête sur un succès  
intemporel

FRANÇOISE GAILL,  
LA VOIX DE L'OcéAN

COMMENT LA  
LUMIÈRE RÉGITE  
NOTRE SOMMEIL

INTERNET,  
L'AUTOROUTE  
DE LA  
DÉSINFORMATION ?

+ Les promesses  
DES ORGANOÏDES



[www.carnetsdescience-larevue.fr](http://www.carnetsdescience-larevue.fr)

cnrs

CNRS EDITIONS

# CNRS LE JOURNAL

## Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

Téléphone : 01 44 96 40 00

E-mail : [lejournald@cnrs.fr](mailto:lejournald@cnrs.fr)

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

## Anciens numéros :

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

## Directeur de la publication :

Antoine Petit

## Directrice de la rédaction :

Marie Mora

## 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 :

Clément Baudet, Kheira Bettayeb, Anne-Sophie

Boutaud, Cyril Frésillon, Denis Guthleben, Martin

Koppe, Angélique Le Touze, Francis Lecompte,

Louise Mussat, Brigitte Perucca, Fabien Trécourt

## Secrétaire de rédaction :

Émilie Silvoz

## Direction artistique :

David Faure

## Iconographes :

Anne-Emmanuelle Héry, Sophie Léonard

## Gestionnaire :

Mathieu Chatellier

## Assistant de direction :

Frédéric Roman

## Illustrations :

Laura Liedo / Colagene Paris

## Impression :

Groupe Morault, Imprimerie de Compiègne

2, avenue Berthelot – Zac de Mercières

BP 60524 – 60205 Compiègne Cedex

ISSN 2261-6446

Dépôt légal : à parution



Photos CNRS disponibles à : [phototheque@cnrs.fr](mailto:phototheque@cnrs.fr) ;

<http://phototheque.cnrs.fr>

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

## En couverture :

Marche « Look up » pour inciter les gouvernements à

agir contre le changement climatique et l'injustice

sociale à Paris, le 12 mars 2022.

© BENOÎT TESSIER/REUTERS

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

Abonnez-vous gratuitement sur :

» [lejournald.cnrs.fr/abojournal](https://lejournald.cnrs.fr/abojournal)

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



Canicules extrêmes en Inde et au Pakistan, sécheresse inquiétante en France... les manifestations du dérèglement climatique se multiplient. Le CNRS est mobilisé sur ce sujet majeur pour notre civilisation. En effet, l'organisme a inscrit dans son contrat avec l'État (COP 2019-2023) six défis sociaux, pour lesquels il a l'ambition d'apporter une contribution substantielle dans les prochaines années, via une mobilisation coordonnée de tous les instituts.

Le changement climatique – son analyse, la diminution de son impact et l'adaptation de la société à ses conséquences – constitue un de ces défis.

Menées depuis de nombreuses années au CNRS, les recherches sur ce sujet impliquent des équipes issues de pratiquement toutes les disciplines. Citons par exemple le programme sur les enveloppes fluides et l'environnement, lancé en 2009, et qui a suscité et accompagné des recherches pluridisciplinaires et transverses sur le fonctionnement de l'atmosphère et de l'océan, leur couplage et leurs interactions avec les autres composantes du système climatique. Le dossier de ce numéro illustre cette grande et continue implication de nos scientifiques, tant dans leurs propres

recherches que dans leurs contributions aux rapports du Giec ou le partage des enjeux avec la société.

En 2017, le CNRS a mis sur pied une « task-force ODD » afin de « traduire en questions scientifiques » l'agenda que l'ONU s'est assigné pour 2030 au moyen de 17 objectifs de développement durable. Avec ses partenaires, les universités et aussi le collectif de chercheurs Labos 1point5, le CNRS a initié une démarche nationale pour intégrer le développement durable dans le fonctionnement de l'établissement.

Avec la volonté de réduire l'impact de la recherche française sur l'environnement, tout en maintenant son excellence, le CNRS s'est doté en 2020 d'une feuille de route et a mis en place un Comité

Développement Durable national et un réseau de correspondants dans les laboratoires et les délégations régionales. Ce comité s'est penché sur les mobilités (domicile-travail, conférences internationales, etc.), les achats, l'utilisation de l'informatique... Nous venons en outre de finaliser le bilan des émissions de gaz à effet de serre du CNRS, ce qui va nous permettre d'identifier les pistes d'amélioration.

Ainsi, à l'heure où les appels de chercheurs et d'étudiants en faveur d'une recherche responsable se multiplient, le plus grand organisme de recherche européen se positionne clairement pour aligner la pratique scientifique sur les enjeux impérieux du siècle.

Alain Schuhl,  
directeur général délégué à la science



© FRÉDÉRIQUE PLAS/CNRS PHOTOTHÈQUE



# GRAND FORMAT

# 11

Climat, l'urgence d'agir .....	12
Tourbières : une bombe climatique à retardement .....	26
Regards croisés sur la guerre en Ukraine .....	32

© MUSTAFA CITECI / ANADOLU AGENCY VIA AFP

## 06

Anne-Lise Soulet,  
assistante  
de prévention



© DAVID VILASCIENCEIMAGE

## EN PERSONNE 5

Un jour avec Anne-Lise Soulet, assistante de prévention ....	06
Jean-Bernard Lasserre en quête de l'optimum .....	08
Brèves .....	10

## 46

La Voie lactée  
dévoile  
son trou noir



© EHT COLLABORATION

## EN ACTION ..... 39

Une nouvelle ère dans l'exploration de la matière .....	40
Ne plus payer pour être publié ! .....	44
La Voie lactée dévoile son trou noir .....	46
Mathématiques : « <i>La France dispose d'un atout fort d'innovation et de compétitivité</i> » .....	48
Atlantique : sur la piste des fûts radioactifs .....	50
Quand les attaques informatiques ciblent le matériel .....	52
Le CNRS et Universcience : la science en partage .....	54
Un poumon artificiel biomimétique .....	56

## 64

L'oubli, la seconde  
mort des  
espèces éteintes



PATRICK FLEUDOPAZUMA - REA

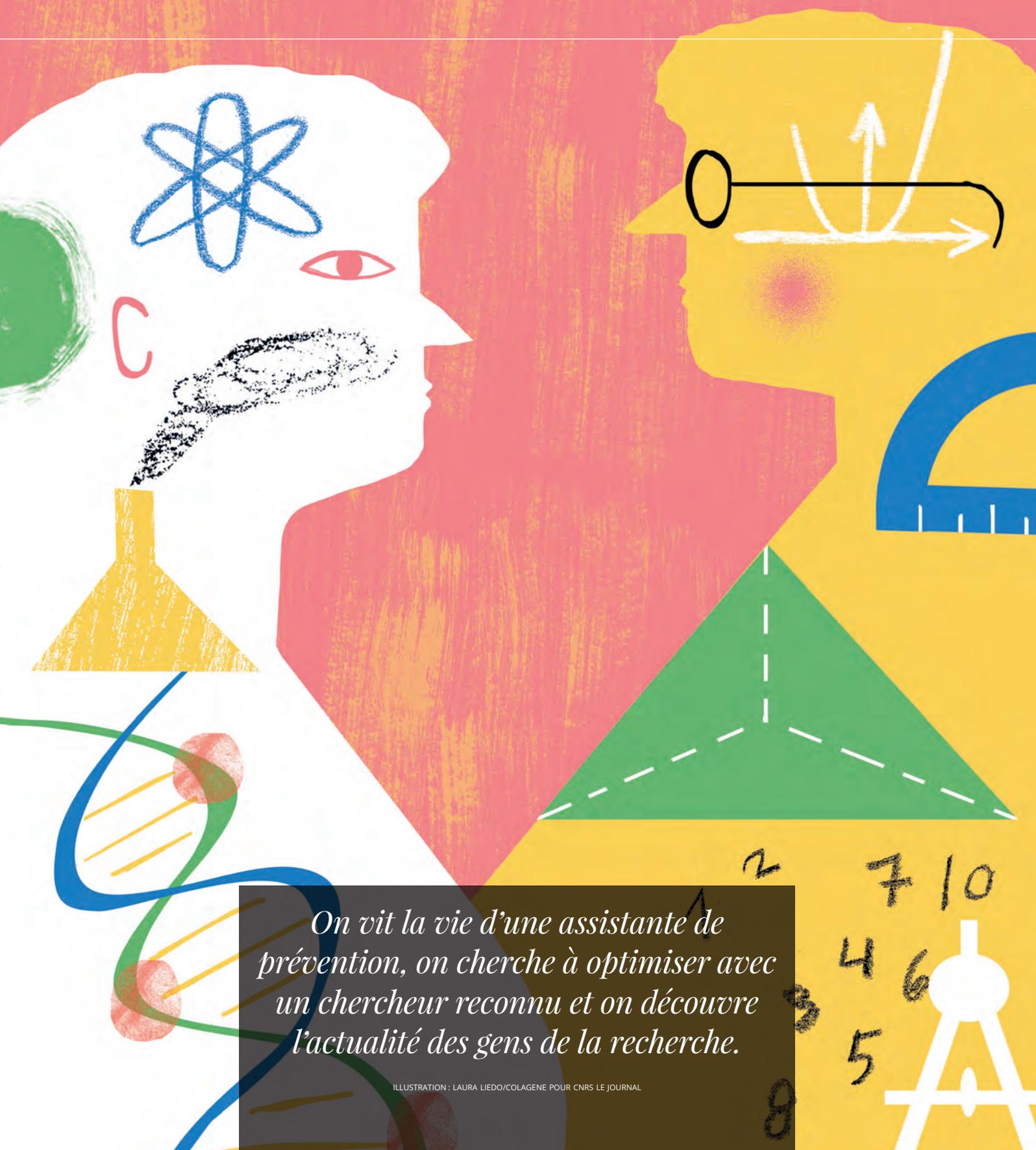
## LES IDÉES ..... 57

Le pluralisme des médias, un enjeu démocratique .....	58
Covid-19 : « <i>L'évolution virale reste largement imprévisible</i> » .....	60
L'oubli, la seconde mort des espèces éteintes .....	64

## LA CHRONIQUE

Une journée dans la vie de Pasteur .....	66
--	----

# EN PERSONNE



*On vit la vie d'une assistante de  
prévention, on cherche à optimiser avec  
un chercheur reconnu et on découvre  
l'actualité des gens de la recherche.*

# Un jour avec Anne-Lise Soulet, assistante de prévention

**PORTRAIT** Assistante ingénieur en microbiologie, Anne-Lise Soulet est également assistante de prévention de son laboratoire. Au cœur de cette mission mise à l'honneur cette année par le CNRS : identifier et prévenir l'intégralité des risques auxquels le personnel est exposé, pour mieux le protéger.

PAR ANGÉLIQUE LE TOUZE

**8 heures - Ses pas rapides résonnent dans le couloir. « Je viens d'apprendre que les deux PSM arrivent aujourd'hui ! » s'exclame Anne-Lise Soulet,** l'assistante de prévention du Laboratoire de microbiologie et génétique moléculaires (LMGM)<sup>1</sup> de Toulouse. La journée commence sur les chapeaux de roues. Grâce à ces deux nouveaux postes de sécurité microbiologique (PSM), le projet de second laboratoire de niveau L2 du bâtiment va enfin aboutir : les scientifiques seront plus nombreux à pouvoir travailler sur des micro-organismes classés 2 en sécurité biologique, qui peuvent présenter un risque de maladie chez l'humain.

Mais pour l'heure, réunion avec le directeur du laboratoire, Patrice Polard, afin de décider des manip du jour. Car avant tout, Anne-Lise Soulet est assistante ingénieur en microbiologie, spécialisée en biochimie des protéines. Elle est à la paillasse la majorité du temps, forme régulièrement des étudiants et gère aussi, en tant que Lab manager, l'organisation matérielle de l'équipe. Sa casquette d'assistante de prévention (AP) obtenue à l'issue d'une formation de six jours dispensée par le CNRS, n'est censée occuper que 20 % de son temps. « *En théorie ! s'en amuse-t-elle. En pratique, c'est variable. Il y a des moments où c'est du plein temps et d'autres qui sont plus calmes.* »

**9 h 30 - À peine le temps de finir une phrase qu'un bonjour retentit à la porte du bureau.** « *Les deux PSM arrivent !* » C'est Bertrand Griffe, l'AP logistique du Centre de biologie intégrative (CBI) qui héberge le LMGM.

« *Là, maintenant ? s'enquiert Anne-Lise Soulet. Alors, feu !* » Pendant le trajet entre l'ancienne bâtisse du CBI et la nouvelle, reliées par une passerelle, la microbiologiste dépeint la difficulté à harmoniser les règles de sécurité pour les huit AP du centre : d'un côté, le bâtiment suit les normes actuelles et d'un autre, c'est bien plus rétro... Le travail des AP, pensé en équipe, prend alors tout son sens : « *Cela contribue énormément à créer des liens scientifiques, se félicite Patrice Polard, une identité de lieu et une appartenance au site aussi, simplement au travers de cette chose essentielle qu'est la sécurité.* »

Ce lieu, pour Anne-Lise Soulet, c'est la moitié d'un bâtiment, sur deux étages, drainant plus de soixante-dix personnes. Et les risques sont partout : prises électriques, substances biologiques, chimiques ou radioactives, bruit, température, travailleur isolé ou encore les incapacités physiques qui pourraient par exemple empêcher une personne de fuir en cas d'incendie. De fait, souligne-t-elle, « *il faut être capable de prendre de la hauteur, avoir le sens de l'observation. Et être carré.* ». Pour relever ces défis, les AP peuvent compter sur l'ingénieur régional de prévention et de sécurité (IRPS), ici Stéphane Leblanc, et la direction du laboratoire.

Mais revenons à l'aire de réception des marchandises. Les PSM sont là, aussi imposants et lourds que prévu. Il faut maintenant répéter le trajet à suivre en attendant les gros bras chargés de leur déplacement.

**10 h 50 - Dès le retour au bureau, c'est la première demande du jour.** « *Nous sommes sollicités en permanence,* raconte Anne-Lise Soulet. *J'ai tendance à tout laisser en plan pour aider la personne mais il est important d'apprendre à jauger l'urgence de la situation [...] Il ne faut pas oublier qu'être AP est une mission et non pas un métier !* »

Depuis la pandémie de Covid-19, le travail des AP a explosé. Gel, masques, tests, plannings, tournées pour s'assurer de la santé physique et psychologique de chacun, paperasse en tous genres... éprouvant. Les AP étant confrontés à diverses personnalités, avec une acceptation variable du changement et des règlements, l'empathie et la diplomatie ne sont pas de trop. « *C'est à la direction du laboratoire de trouver la manière d'inciter le personnel à suivre les règles de sécurité* », indique Anne-Lise Soulet. Et aux AP de la seconder dans cette tâche ardue.

1. Unité CNRS/Université Toulouse Paul Sabatier.



© DAVID WILASCIENCEIMAGE

### 13 h 54 - Après un repas vite expédié, elle rejoint l'AP logistique et les cinq hommes venus pour l'aider.

Plus gros que l'autre, le PSM cytotoxique pour la manipulation des produits chimiques cause bien des soucis, par manque de matériel adapté à son placement sur pieds. Curieuse, Anne-Lise Soulet observe les techniques employées et propose divers outils pour aider à cette complexe entreprise.

Être AP, c'est aussi participer à des actions très variées et créer des liens humains sortant du cadre habituel de la recherche. Ainsi, au LMGM, elle a vécu deux accidents où les secours se sont perdus... En synergie avec Stéphane Leblanc, Anne-Lise Soulet a donc mis en place de nombreuses actions pour que cela ne se reproduise pas, qui l'ont amenée à interagir notamment avec les pompiers de

la caserne voisine et les médecins de la délégation Occitanie ouest du CNRS. Bien qu'alors peu habituée à l'exercice, elle a également organisé une assemblée générale hygiène et sécurité pour exposer le bilan de ses actions et rappeler les consignes.

### 16 h - Après 2 heures passées à s'occuper des PSM, Anne-Lise Soulet retourne à la paillasse.

Il faut au moins qu'elle exporte ses résultats, à défaut d'avoir le temps de les analyser aujourd'hui. Mais au loin, trois alarmes retentissent. L'assistante de prévention identifie immédiatement leur provenance : l'une, normale, vient d'une centrifugeuse ; les deux autres, par contre, concernent des congélateurs qui contiennent toutes les manipulations du labo. La biochimiste part aussitôt voir si elle peut régler elle-même le problème, avant de prévenir l'AP logistique qui trouvera rapidement la solution.

Au-delà de ces tâches quotidiennes, qui nécessitent vigilance et réactivité, les AP sont chargés de mettre à jour au moins une fois par an le document unique d'évaluation des risques de leur lieu d'affectation, avec les propositions de solutions aux problèmes identifiés. Autre mission cruciale : la formation des nouveaux arrivants, dispensée en commun par les huit AP du CBI étant donné la particularité des locaux.

### 16 h 30 - Un tour à la soute des déchets sonne le glas de ce mercredi bien rempli.

Le local est à l'extérieur du LMGM, les déchets sont exclusivement gérés par l'AP afin de s'assurer qu'ils sont triés et rangés correctement. Anne-Lise Soulet dispose ses déchets dans la caisse adaptée et vérifie les éventuelles erreurs de tri, avant de passer au récupérateur de verre puis à celui des déchets industriels. La journée est enfin finie. Reste une question : quels rebondissements viendront donc mouvementer celle de demain ? ||

**+**  
**En ligne** En 2022, le CNRS met en lumière les assistantes et assistants de prévention. Retrouvez toutes les ressources et actions sur [www.cnrs.fr/fr/2022-lannee-des-ap](http://www.cnrs.fr/fr/2022-lannee-des-ap)

# Jean-Bernard Lasserre en quête de l'optimum

NUMÉRIQUE 

C'est avec la sérénité de ceux qui ont trouvé le créneau exact de leur bonheur que Jean-Bernard Lasserre<sup>1</sup> nous accueille dans la salle attenante à la bibliothèque du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (Laas – CNRS), à Toulouse. Une fois n'est pas coutume, c'est lui qui entame les questions, porté par la curiosité inhérente au chercheur. Aucun mot n'échappe à l'attention bienveillante de ses yeux bleu-vert. Au moment d'expliquer le cœur de son métier, soucieux de la bonne compréhension de son auditoire, il s'anime soudain, et, tel un peintre dans un élan de création, noircit le tableau blanc de schémas, au fil de ses mots.

## Le Graal de l'optimum global

Ainsi, le cœur de son métier, c'est l'optimisation globale, ce champ des mathématiques où l'on cherche à évaluer par le calcul la meilleure option qui soit pour parvenir à un but donné, dans un contexte donné. En termes moins consensuels, il s'agit de minimiser une fonction sur un domaine afin de trouver son optimum global. Comme Jean-Bernard Lasserre aime à le représenter, imaginez que vous êtes en randonnée : « *Il est facile de trouver le point le plus bas localement, l'optimum local : il vous suffit de descendre. Quand vous ne pouvez plus que monter, vous y êtes.* » Par contre, il vous est impossible de savoir empiriquement si vous êtes au point le plus bas de toute la région. Cette altitude la plus basse c'est l'optimum global, le Graal en optimisation.

**PORTRAIT** Le grand prix Inria – Académie des sciences 2021, décerné à Jean-Bernard Lasserre pour distinguer l'ensemble de sa carrière, est l'occasion de revenir sur le parcours de ce chercheur à l'origine d'une nouvelle méthode en optimisation mathématique qui a fait sa renommée.

PAR ANGÉLIQUE LE TOUZE

Concrètement, trouver l'optimum global peut par exemple consister, en chimie quantique, à identifier la configuration électronique d'une molécule associée à l'énergie la plus basse possible. Dans les réseaux d'énergie électrique, il peut s'agir de déterminer la meilleure organisation de l'énergie à fournir, correspondant au coût le plus bas pour le fournisseur. Il en va de même en production agricole et industrielle. En fait, quasiment aucun domaine des sciences et de l'ingénierie n'échappe aux problèmes d'optimisation.

Dans certains cas, l'extrême complexité du problème le rend insoluble, que ce soit du fait d'un temps de calcul trop long de l'algorithme mis en place, ou simplement à cause de l'inexistence d'un tel algorithme. C'est ici qu'interviennent les travaux de notre mathématicien, et en particulier la méthode moments-sommes de carrés, ou hiérarchie de Lasserre, à laquelle il a donné naissance en 2000. Cette méthode de calcul permet en effet de résoudre certains problèmes d'optimisation globale auparavant insolubles, ceux dont la description ne requiert que des polynômes et des ensembles semi-algébriques.

Basée sur des résultats de géométrie algébrique réelle des années 1990, celle-ci remplace le problème initial difficile en une suite de problèmes plus simples de taille croissante que l'on sait résoudre efficacement. Comme avec les poupées russes, une fois le premier problème résolu et si un test d'arrêt est négatif, on résout un problème un peu plus gros, et ainsi de suite jusqu'à trouver la solution finale, le fameux optimum global.

Depuis 7-8 ans, entre autres nombreuses collaborations, Jean-Bernard Lasserre accompagne le gestionnaire du réseau de transport d'électricité français (RTE) pour améliorer le passage à plus grande échelle de sa méthodologie déjà utilisée par le groupe. Il étudie également son application en intelligence artificielle, plus précisément en apprentissage profond, pour évaluer et certifier a posteriori la robustesse des calculs en jeu dans les réseaux de neurones.

## L'innovation en ligne de mire

Améliorer la hiérarchie moments-sommes de carrés et lui trouver de nouvelles applications constituent aujourd'hui l'essence des activités de Jean-Bernard Lasserre. Que ce soit au

1. Directeur de recherche émérite au CNRS, au Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (Laas – CNRS) et à l'Institut de mathématiques de Toulouse (CNRS/Insa Toulouse/Université Toulouse Paul Sabatier), titulaire de la chaire Polynomial Optimization for Machine Learning and data analysis à l'Institut Aniti (Artificial and Natural Intelligence Toulouse Institute).



© ANGÉLIQUE LE TOUZE

► Jean-Bernard Lasserre  
au Laboratoire d'analyse et  
d'architecture des systèmes  
en février 2022.

Laas, en collaboration avec ses collègues de l'Institut de mathématiques de Toulouse ou dans le cadre de la chaire Polynomial Optimization de l'Institut interdisciplinaire d'intelligence artificielle de Toulouse (Aniti) dont il est titulaire. « Récemment, raconte-t-il, nous avons montré que notre méthode était pertinente et performante dans certains problèmes en statistiques et certaines équations aux dérivées partielles. J'espère qu'elle pourra être reconnue en tant que nouvel outil complémentaire des techniques plus classiques déjà utilisées dans ces domaines. »

Depuis, si ce versant de ses recherches est largement dominant ces vingt dernières années, d'autres facettes de l'optimisation ont au cours du temps titillé son intérêt. Au lendemain de sa thèse, c'est par la recherche opérationnelle qu'il a commencé, en gestion et ordonnancement de production, avant de passer une dizaine d'années sur les processus de décision markoviens et chaînes de Markov. À présent, c'est la fonction de Christoffel qui attise sa curiosité. « C'est un autre volet de ma recherche, dévoile-t-il. Cet outil existe déjà depuis longtemps en théorie de l'approximation. Avec les deux co-auteurs de notre livre sur le sujet, nous montrons qu'il peut être utilisé en

analyse de données, par exemple pour la détection de données aberrantes. »

Trouver des utilisations novatrices à des outils existants, établir des liens entre des domaines qui semblent a priori différents, c'est un peu le violon d'Ingres de Jean-Bernard Lasserre. « Si vous les regardez avec des lunettes un peu spéciales, explique-t-il, joignant le geste à la parole, vous voyez en fait le même problème. C'est par exemple le cas de la programmation linéaire et entière, de l'intégration et du comptage de points entiers dans un polyèdre. » L'idéal est alors, grâce à ce nouvel angle de vue, de transposer les connaissances d'un domaine plus avancé vers un autre. Même si déjà, saisir l'existence de ces analogies est pour ce passionné une satisfaction en soi.

### La recherche en toute liberté

Lorsqu'on lui demande comment il en est arrivé à devenir chercheur en mathématiques appliquées, la réponse a de quoi étonner. Aucune vocation, beaucoup de hasard et de chance, un bon timing. « Mes parents étaient médecins, se souvient-il, ils n'ont jamais cherché à me pousser vers les mathématiques. Je n'ai découvert qu'en terminale l'existence des préparations aux grandes écoles et que les maths me plaisaient bien. » Après une prépa à

Toulouse, il embraye sur l'école d'ingénieur Ensimag de Grenoble où les cours d'optimisation l'amènent à choisir son stage de 3<sup>e</sup> année dans ce domaine, tout comme le sujet de son doctorat d'ingénieur. C'est le premier déclic – un peu au dernier moment –, il veut faire de la recherche !

La deuxième révélation a lieu lors de son postdoctorat à Berkeley, aux États-Unis, juste avant son service militaire en tant qu'appelé scientifique à l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (Isae-Supaéro) à Toulouse. « Là-bas, il y avait encore les traces des sixties, j'adorais ça, s'enthousiasme-t-il. J'allais écouter du rock tous les soirs, l'atmosphère et la liberté étaient incroyables ! Mon parrain, P. Varaiya, était extraordinaire. Et puis le campus de Berkeley, San Francisco... quand vous faites de la recherche dans ces conditions-là, c'est le pied ! C'est là que j'ai su que je voulais entrer au CNRS. Si je n'avais pas pu, je crois que j'aurais été malheureux. »

Et malheureux, il ne l'est pas, c'est même plutôt le contraire. « Le CNRS, c'est la liberté, s'exalte-t-il. Cette espèce de liberté géniale de faire ce qui nous plaît dans notre domaine, de donner libre cours à notre imagination. J'ai eu des coopérations avec l'Australie, le Mexique... j'adorais découvrir des pays magnifiques tout en travaillant. Et puis le labo est toujours irrigué par des jeunes doctorants, c'est très stimulant... ça évite de s'encroûter. Un boulot où vous êtes content d'aller travailler quand vous vous levez le matin, c'est exceptionnel. J'ai eu une chance dans ma vie... C'est ce qui fait qu'on se sent redevable d'être sérieux, qu'on espère être utile à la société grâce à laquelle on peut faire ce boulot de rêve. » Si bien que pas un instant, cet amoureux de la liberté ne se voit occuper autrement sa retraite... qu'en continuant la recherche. ||



## Les premiers talents de l'année

Ces dernières semaines, le CNRS a dévoilé les lauréates et lauréats 2022 de la médaille d'argent, de la médaille de bronze et de la médaille de cristal. Découvrez

tous les noms sur le site

[www.cnrs.fr/fr/talement/index](http://www.cnrs.fr/fr/talement/index)

CYRIL FRÉSILLON/CNRS PHOTOTHÈQUE



## Marie-Pauline Gacoin nouvelle directrice de cabinet

Le 1<sup>er</sup> mai, Marie-Pauline Gacoin a été nommée directrice de cabinet du président-directeur général du CNRS, et intègre à ce titre le directoire de l'organisme. Elle était directrice de la marque et de la communication de l'université Paris-Saclay depuis sa création en janvier 2020, après avoir rejoint dès 2013 la Fondation de coopération scientifique du campus Paris-Saclay. Auparavant, son parcours l'a menée à l'Andra de 1995 à 2002, puis au synchrotron SOLEIL de 2002 à 2013, où elle a créé le service de la communication et de l'ouverture aux publics. Marie-Pauline Gacoin s'est tout du long investie dans le développement du dialogue entre sciences et société. Elle succède à Marie-Hélène Beauvais, qui occupait cette fonction depuis 2014 et qui a fait valoir ses droits à la retraite.

<https://bit.ly/3wxLXqF>

CYRIL FRÉSILLON/CNRS PHOTOTHÈQUE



## Lionel Buchaillot, nouveau directeur de l'Insis

Le 1<sup>er</sup> mars, Lionel Buchaillot, directeur de recherche au CNRS, a pris la direction de l'Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (Insis). Spécialiste de la physique des micro et nanosystèmes et des matériaux en film mince, il mène ses recherches à l'Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie, qu'il a dirigé de 2010 à 2019. Il a consacré plus de vingt années aux micro et nanorésonateurs, des capteurs utilisés dans l'industrie et la recherche pour détecter des masses ou des forces à l'échelle submicrométrique, plusieurs de ses travaux aboutissant à la création de start-up. Lionel Buchaillot succède à Jean-Yves Marzin.

<https://bit.ly/3NkaGFM>



## European Research Council

Established by the European Commission

## Les bourses ERC

Le 26 avril, le Conseil européen de la recherche (ERC) a annoncé les résultats de l'appel « ERC Advanced Grant 2021 » qui vise des chercheurs confirmés : le CNRS est l'institution hôte pour 12 bourses. Un mois plus tôt, l'ERC avait dévoilé les lauréats de l'appel Consolidator, qui soutient les projets de scientifiques en milieu de carrière, et pour lequel le CNRS compte cette fois 10 lauréats.

## Une ethnologue à l'affiche

La 41<sup>e</sup> édition du Festival international Jean Rouch « Voir autrement le monde », dont le CNRS est partenaire, s'est déroulée du 5 au 18 mai. Parmi les films remarquables et distingués, *La Combattante*, réalisé par Camille Ponsin, rend hommage à Marie-José Tubiana, une ancienne ethnologue africainiste du CNRS, qui aide les réfugiés du Darfour à obtenir l'asile politique en France. Le film avait déjà reçu le grand prix du documentaire national du Fipadoc, festival international du documentaire, en 2022.

Plus d'infos sur <https://images.cnrs.fr>



CYRIL FRÉSILLON/CNRS PHOTOTHÈQUE



## Hélène Harter, présidente du Comité pour l'histoire

Professeure des universités en histoire contemporaine et membre du laboratoire Sorbonne - Identités, relations internationales et civilisations de l'Europe, Hélène Harter est la nouvelle présidente du Comité pour l'histoire du CNRS. Elle succède à Michel Blay à ce poste.

# GRAND FORMAT



*En prise avec les défis de notre temps,  
les scientifiques livrent leur expertise  
sur le dérèglement climatique  
et le retour de la guerre en Europe.*



Marche pour le climat le 12 mars 2022 à Paris. À l'inverse du « déni cosmique » du film *Don't look up* (A. Mc Kay, déc. 2021), les manifestants regardent le problème « en haut », ou plutôt en face...

# *Climat, l'urgence d'agir*



## «Il y a encore aujourd'hui un déni de la gravité des enjeux climatiques»



© F. RHODES/CEA

**ENTRETIEN** Quel est l'impact des rapports du Giec ? La société, les médias et les politiques s'en saisissent-ils assez ? La voix des climatosceptiques porte-t-elle toujours autant ? Analyse avec Valérie Masson-Delmotte, co-présidente du groupe de travail I du Giec, qui figure parmi les cent personnalités les plus influentes en 2022 selon le magazine américain *Time*.

PROPOS RECUEILLIS PAR LOUISE MUSSAT ET LA RÉDACTION

**Depuis sa création en 1988, le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) tire la sonnette d'alarme, évalue les options, mais les actions menées ne semblent jamais à la hauteur des enjeux. Y a-t-il une sorte de dialogue de sourds entre le groupe d'experts et le monde politique ?**

**Valérie Masson-Delmotte** <sup>1</sup>. Je tiens d'abord à rappeler que le rôle du Giec est de fournir un socle scientifique robuste, reconnu par l'ensemble des pays du monde. Pour ce faire, le Giec évalue de manière objective et rigoureuse l'état des connaissances et les différentes options d'action, à partir de l'examen des éléments factuels, issus de dizaines de milliers de publications scientifiques, techniques, socio-économiques. Ses rapports ne sont pas des encyclopédies, mais une évaluation des connaissances permet-

tant d'éclairer des choix politiques, de manière neutre et non prescriptive. Cela permet d'ailleurs de séparer le constat scientifique du Giec des négociations politiques internationales menées dans le cadre de la Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique.

Il faut aussi souligner la dimension sociale. Vulnérabilités, équité, justice climatique, transition juste, etc., sont prises en compte dans les évaluations du Giec. Prenons par exemple le rapport spécial de 2018 sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C. Il avait souligné à quel point chaque incrément de degré de température, supplémentaire ou évité, compte vis-à-vis des risques liés au climat. Il montrait à quel point chaque année compte vis-à-vis de la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), et que chaque choix

SOCIÉTÉS  TERRE 

Partout sur la planète, les événements extrêmes se multiplient. Alors que le Giec finalise son 6<sup>e</sup> rapport, comment les scientifiques œuvrent-ils pour étudier le dérèglement climatique et trouver des voies d'atténuation et d'adaptation ? Comment s'organisent-ils pour informer la société et mobiliser les politiques ?

<sup>1</sup>. Climatologue au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CNRS/Univ. Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines/CEA), à l'université Paris-Saclay, et co-présidente du groupe I du Giec sur les bases physiques du changement climatique pour le 6<sup>e</sup> cycle d'évaluation (2015-2023).

*“Les rapports du Giec ne sont pas des encyclopédies, mais une évaluation des connaissances permettant d’éclairer des choix politiques, de manière neutre et non prescriptive.”*

compte, pour construire des trajectoires vers une économie bas carbone et résiliente qui soient éthiques, équitables, justes et perçues comme justes. Ce rapport spécial était par exemple explicite sur le fait que la redistribution des recettes d’une taxation du carbone aux ménages les plus modestes fait partie de la recherche d’un équilibre, entre l’incitation à des choix plus sobres en carbone et la prise en compte de ses effets redistributifs. La crise des « gilets jaunes » en France a montré l’importance de tenir compte de cette dimension sociale.

**En tant que co-présidente du groupe I, que reprenez-vous du troisième et dernier volet du nouveau rapport du Giec, publié lundi 4 avril ?**

**V. M.-D.** Ce récent rapport constate une montée en puissance de l’action pour le climat dans les politiques publiques. Une vingtaine de pays ont déjà dépassé leur pic et porté une baisse durable de leurs rejets de gaz à effet de serre, mais les émissions mondiales ont été records au cours de la dernière décennie. Il montre aussi que les coûts des batteries et la production d’énergie solaire et éolienne ont drastiquement baissé au cours de la dernière décennie. Il souligne que de multiples options dont la faisabilité est démontrée sont disponibles pour diminuer de moitié, voire davantage, les émissions mondiales de GES d’ici 2030, dans chaque secteur (énergie, villes, bâtiments, industrie, transport, agriculture, forêt et utilisation des terres), ainsi qu’en agissant sur la demande. Il montre en effet le poten-

tiel associé à des politiques publiques et infrastructures favorisant l’adoption de modes de vie bas carbone, avec de multiples bénéfices en matière de bien-être et de santé. Néanmoins, les politiques publiques existantes en 2020 nous placent plutôt sur une trajectoire d’émissions conti-

nuant encore à augmenter dans la décennie qui vient. Donc, sans un sursaut pour agir plus fortement et immédiatement, elles conduiraient à un réchauffement planétaire dépassant 1,5 °C dans les prochaines décennies, 2 °C d’ici 2050, et pouvant atteindre 3 °C (de 2,2 °C à 3,5 °C) en fin de siècle. Dans le cadre de l’Accord de Paris sur le climat, l’ensemble des pays s’est pourtant engagé à limiter le réchauffement largement sous 2 °C, avec l’aspiration à le limiter à 1,5 °C. Cela a encore été réaffirmé à l’issue de la COP26 en 2021. Réactualisés lors de cette dernière, les engagements des différents pays par rapport à l’évolution de leurs émissions de GES d’ici 2025 ou 2030, s’ils sont mis en œuvre, pourraient permettre d’engager une faible diminution des émissions. Mais ils restent insuffisants par rapport au rythme de baisse néces-

Des tempêtes et inondations destructrices ont frappé la ville d’Erfstadt-Blessem, en Allemagne, en juillet 2021, provoquant un gigantesque glissement de terrain.



© RHEIN-ERFT-REGIONSANREGE



La climatologue française rencontrait des éco-délégués du lycée Poincaré de Nancy, le 5 avril dernier.

saire pour tenir les objectifs (une baisse de l'ordre de 27 % de 2019 à 2030 pour limiter le réchauffement sous 2 °C, et de 43 % pour le limiter à un niveau proche de 1,5 °C). Or, chaque infrastructure mise en place peut aider à décarboner rapidement, ou au contraire, du fait de son inertie, verrouiller des émissions de GES pendant des décennies (vingt ans de durée d'utilisation pour un véhicule thermique, des décennies pour une centrale thermique...). Les émissions de CO<sub>2</sub> induites par les seules infrastructures existantes et planifiées dépasseraient le budget carbone résiduel associé à une limitation du réchauffement à 1,5 °C !

Enfin, ce troisième volet montre que d'un point de vue purement économique, il est bien plus rentable d'agir rapidement. Le montant des investissements nécessaires ne représente en effet qu'une faible fraction du PIB annuel (de l'ordre de 0,15 %) d'ici 2050. Un enjeu critique porte donc sur la réorientation des capitaux disponibles vers ces investissements, dans le cadre de politiques publiques coordonnées, y compris en matière d'innovation technologique. Prendre en compte l'ensemble des bénéfices

de l'action pour le climat, en matière de bien-être, de santé, d'emploi et de transitions justes, peut catalyser l'accélération requise pour permettre de stabiliser le réchauffement, éviter d'exacerber les vulnérabilités, préserver la biodiversité et assurer les conditions d'un développement qui soit soutenable dans un monde vivable.

#### **Pourquoi les politiques se saisissent-ils si peu des rapports successifs du Giec selon vous ?**

**V. M.-D.** Si ces rapports n'étaient lus que par les scientifiques, leur utilité serait très restreinte (réduite à la maturation des connaissances scientifiques). Je note qu'ils sont de plus en plus utilisés comme ressource pour construire des enseignements, pour la formation initiale et continue, pour la formation des décideurs, des élus, de l'administration publique et des entreprises. De nombreux citoyens, des organisations professionnelles se les approprient également, en font des traductions et des résumés spécifiques (pour les décideurs urbains,

pour les actuaire, pour les enseignants...). En 2021, des enseignements spécifiques ont commencé à être dispensés dans le cadre du tronc commun aux écoles de service public. Cet enjeu de montée en connaissances est critique pour une prise de décision fondée sur ces éléments factuels, et pour permettre une mise en œuvre efficace des stratégies nationales d'action pour le climat (stratégie bas carbone, plan national d'adaptation) et leur permettre de rayonner dans toutes les politiques publiques, de manière transverse aux différents ministères, secteurs, et à toutes les échelles de prise de décision.

#### **Comment avez-vous jugé la place du climat dans la campagne présidentielle, alors que l'invasion de l'Ukraine par la Russie fin février a provoqué une crise du prix du pétrole et du gaz ?**

**V. M.-D.** J'ai été frappée de l'absence de propositions claires de la part des différents candidats sur les leviers d'action qui permettraient de rapidement réduire notre dépendance par rapport aux producteurs de ces énergies fossiles, ainsi que les émissions de GES qui en résultent, en par- ●●●



## « La situation s'est significativement aggravée »

Wolfgang Cramer<sup>1</sup> a coordonné l'un des chapitres du second volet du sixième rapport d'évaluation du Giec, dévoilé le 28 février. Traitant du thème « impacts, adaptation et vulnérabilité », il confirme les prédictions des précédents travaux du groupe d'experts.

PROPOS RECUEILLIS PAR ANNE - SOPHIE BOUTAUD

Les scientifiques intègrent de mieux en mieux les scénarios climatiques, aux échelles globales et régionales, dans leurs

travaux. Ce deuxième volet montre par exemple une meilleure compréhension des conséquences des épisodes climatiques extrêmes, comme les sécheresses et les tempêtes, sur la nature et sur les populations humaines. Nous regardons ainsi comment le changement climatique affecte, et affectera, les écosystèmes et les hydrosystèmes, mais aussi les aspects sociaux et économiques.

Nous nous intéressons également à l'adaptation, pour savoir si les écosystèmes, mais aussi toute activité humaine, vont pouvoir s'ajuster naturellement ou par des actions spécifiques à tous ces changements. Mais la réponse à cette question touche souvent à des limites « dures », car l'évolution climatique est trop rapide pour, par exemple, le renforcement des digues face à la hausse du niveau de la mer. Ces travaux montrent également que la capacité des sociétés humaines à s'adapter diffère beaucoup entre des pays du Nord et du Sud, et même à l'intérieur d'un même État.

*Les progrès de la science depuis le dernier rapport du Giec, il y a sept ans, nous ont permis de démontrer que ces catastrophes sont de plus en plus courantes et que cette hausse est due, dans un grand nombre de cas, à l'activité humaine. Nous montrons également que la plupart des tendances et les projections des précédents rapports du Giec se sont confirmées, ou ont été en dessous de la réalité : la situation s'est significativement aggravée. Par exemple la hausse du niveau de la Méditerranée s'accélère et provoque des changements du littoral plus violents que prévu lors du dernier rapport.*

*La vulnérabilité du littoral méditerranéen, pour ses écosystèmes comme pour les installations humaines et le patrimoine, est particulièrement importante car, jusqu'ici, la mer ne montrait que de faibles marées et rarement de grosses tempêtes touchant les côtes. Le niveau pourrait monter d'un mètre d'ici à la fin du siècle, comme partout dans le monde, ce qui serait catastrophique car les villes n'ont absolument pas été conçues pour y faire face. On pense bien sûr à Venise (Italie), mais la plupart des cités côtières sont en fait menacées, et en particulier Alexandrie (Égypte) et ses cinq millions d'habitants.*

*Les efforts d'adaptation au réchauffement climatique restent insuffisants, notamment à cause des coûts qui augmentent en même temps que les températures. Pour changer les choses, nous avons besoin de davantage d'efforts financiers et technologiques, impliquant le soutien des pays du Nord, responsables de la plus grande partie des émissions de gaz à effet de serre (GES).*



Lire l'intégralité de l'entretien sur [lejournald.cnrs.fr](http://lejournald.cnrs.fr)

...

ticulier en agissant sur la demande. Prenons l'exemple du transport, premier secteur émetteur en France. Je vois peu ou pas du tout de propositions pour intensifier le covoiturage et le télétravail choisis, réduire la vitesse sur les autoroutes, accompagner fortement les artisans et petites entreprises ou encore les aides-soignantes à domicile (un métier difficile et sous tension) à accéder à des véhicules électriques (dans le cadre de transitions pensées pour être justes).

Concernant l'achat de gaz russe, qui finance la guerre en Ukraine, je note peu de débats sur les moyens permettant de réduire massivement l'utilisation de ce GES dans le chauffage des bâtiments publics, dans le secteur tertiaire, ou les logements. Quid d'un plan massif de formation pour le déploiement de pompes à chaleur en plus de la rénovation thermique ? Il y en a revanche nombre de débats toujours clivants sur telle ou telle option permettant de produire de l'électricité bas carbone : pour ou contre le nucléaire, pour ou contre le solaire, pour ou contre l'éolien... En France, l'électricité – essentiellement nucléaire – est déjà décarbonée, et il est évidemment essentiel de définir la stratégie optimale pour continuer à produire une électricité décarbonée, tout en agissant sur le premier secteur émetteur de GES dans notre pays, celui des transports.

Les approches clivantes relèvent à mon sens d'un faux débat opposant différentes solutions plutôt que de réfléchir à les combiner au mieux et avec la sobriété. Il masque les enjeux à réduire le plus rapidement possible l'utilisation des énergies fossiles dans tous les secteurs. Je note aussi peu de débats sur les propositions de politiques publiques en matière de santé, alors qu'il y a de multiples enjeux croisés aux interfaces santé-climat (alimentation saine et soutenable, mobilités actives, amélioration de la qualité de l'air...).

1. Directeur de recherche au CNRS, à l'Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale (IMBE, unité CNRS/Aix-Marseille Université/Avignon Université/IRD).

*“La couverture médiatique de l'état des connaissances scientifiques sur le changement climatique se heurte souvent à d'autres actualités.”*

**Quel regard portez-vous sur le traitement médiatique des rapports du Giec ?**

**V. M.-D.** La couverture médiatique de l'état des connaissances scientifiques sur le changement climatique se heurte souvent à d'autres actualités... En août 2021, l'arrivée d'un joueur de football à Paris avait fait la une lors de la publication du 1<sup>er</sup> volet du 6<sup>e</sup> rapport du Giec. Et en février dernier, l'invasion de l'Ukraine a occulté la publication du 2<sup>e</sup> volet portant sur les enjeux associés aux vulnérabilités, impacts et risques,

et aux leviers d'action en matière d'adaptation. Cette thématique a d'ailleurs été l'une des plus grandes absentes des débats publics en amont de l'élection présidentielle, alors qu'elle pose aussi la question d'agir, par anticipation, pour prévenir les risques, tout en soulignant le besoin de solidarité pour aider les plus vulnérables à faire face aux pertes et dommages croissants.

Pour communiquer sur les rapports des groupes II et III du Giec, beaucoup de médias ont choisi l'angle

des risques et de l'urgence. Les solutions, les leviers d'action, les enjeux de constructions de transitions justes et de trajectoires de développement résilientes, leurs bénéfices en matière de bien-être, les complémentarités des solutions technologiques et fondées sur la nature, les enjeux d'actions structurantes permettant de faciliter des modes de vie sobres en carbone ont été peu mis en lumière, alors que ce sont à mon sens les aspects les plus nouveaux des rapports du Giec depuis 2018. De même, sur les questions de sécurité alimentaire, affectée par les conséquences du changement climatique et par les autres crises (pandémie, guerre en Ukraine), les médias pourraient mettre ●●●

Sacs de sable déposés au pied des maisons du littoral à Buxton, en Caroline du Nord, pour les protéger de la montée des eaux (11 mars 2021).



...  
davantage l'accent sur les différents leviers d'action pour construire un système alimentaire soutenable, les enjeux complexes associés aux agro-carburants, et les possibilités d'action associées aux choix d'une alimentation plus végétale, plus saine, et plus durable... Les rapports du Giec fournissent une source formidable d'informations scientifiques, techniques, socio-économiques associées aux possibilités de construire un développement soutenable, résilient face aux différentes crises, vers la neutralité carbone.

**Pensez-vous que les climatosceptiques sont toujours aussi nombreux aujourd'hui, 35 ans après la création du Giec ?**

**V. M.-D.** Il y a encore aujourd'hui

un déni de gravité des enjeux et de l'urgence à agir, qui se manifeste parfois par des attaques virulentes. J'en ai moi-même fait l'expérience dans une récente tribune remettant en cause la nature scientifique des rapports du Giec et ma rigueur scientifique personnelle. Or chaque rapport est le résultat du travail de centaines de scientifiques (non rémunérés pour cela) et de milliers de relecteurs volontaires de la communauté scientifique, à partir de l'examen des éléments factuels des

publications scientifiques, techniques, et socio-économiques, sur lesquels s'appuient, de manière traçable et transparente, chaque conclusion et le niveau de confiance associé. Je pense qu'il existe peu de documents scientifiques aussi relus que les rapports du Giec. Pour fixer les idées, le rapport du groupe I, paru fin 2021 et dont je suis co-présidente avec mon collègue chinois Panmao Zhai, repose sur l'évaluation de 14 000 publications scientifiques, représente environ 3 000 pages

---

*“ Une jurisprudence serait à un moment donné utile pour mettre fin aux calomnies sur la rigueur scientifique des rapports du Giec. ”*

---

Pour Valérie Masson-Delmotte, les attaques des climatosceptiques visent bien souvent les femmes, à l'image de Greta Thunberg, militante climatique suédoise, ici à Berlin en 2021.



rédigées par 234 auteurs et 600 contributeurs, et a fait l'objet de plus de 80 000 commentaires par 1 890 relecteurs... Une jurisprudence serait donc à un moment donné utile pour mettre fin aux calomnies sur la rigueur scientifique des rapports du Giec. Je note aussi que les attaques personnelles ciblent souvent les femmes qui prennent la parole sur le climat, comme Greta Thunberg, qui doit déranger une certaine vision patriarcale du rôle des femmes dans la société. Une récente étude allemande montre d'ailleurs que l'on retrouve souvent des caractéristiques communes chez les climatosceptiques, comme une idéologie d'extrême droite, un genre masculin, et une difficulté à gérer des émotions désagréables liées à un sentiment de responsabilité personnelle ou de culpabilité, ou à la perte de certains privilèges.

Certes, les enquêtes d'opinion ainsi que les échanges publics auxquels je participe montrent que la plupart des personnes ont désormais compris que le climat change sous l'effet des activités humaines. Mais beaucoup n'ont pas encore intégré que celles-ci sont responsables de l'intégralité de l'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre (+1,1 °C depuis 1850). J'en ai souvent fait le constat en posant la question à des élus et décideurs. J'ai même eu des réponses du type : « Si je vous dis que la part de la responsabilité humaine est de seulement 20 %, vous allez me prendre pour un Donald Trump en puissance ? » Autre croyance à la vie dure : notre invulnérabilité. Nombreux sont ceux qui pensent encore que l'humanité « fera avec », comme elle s'est toujours adaptée aux aléas naturels. Or, il y a de multiples limites aux capacités d'adaptation. Le groupe II du Giec montre très clairement qu'il y a plus de 3 milliards de personnes très vulnérables face au changement climatique, avec des moyens de subsistance (agriculture, pêche) très sensibles au climat, et dont les ressources sont très limitées.

La vitesse du changement climatique au-dessus des continents, les multiples conséquences dans ●●●



© COLLE FIBS.

## « Il existe des options pour réduire les émissions de GES dans tous les secteurs »

Céline Guivarch<sup>1</sup>, économiste, a participé à la rédaction du troisième volet du sixième rapport du Giec, publié le 4 avril, consacré à l'atténuation du changement climatique et de ses conséquences.

PROPOS RECUEILLIS PAR ANNE-SOPHIE BOUTAUD

« Au total, plus de 18 000 publications ont été étudiées par des scientifiques du monde entier pour ce rapport. Le développement durable en est le fil rouge : toute l'analyse est faite par son prisme et en lien avec des objectifs multiples de réduction de la pauvreté, des inégalités, ou encore d'éradication de la faim. Nous y faisons le bilan des émissions de GES passées et présentes dans les secteurs de l'énergie, des transports, du bâtiment, de l'industrie, de l'agroalimentaire. Nous avons aussi évalué différentes trajectoires d'atténuation à court et à long terme compatibles avec, notamment, des objectifs de limitation à 1,5 °C et 2 °C d'augmentation de la température du globe par rapport à l'ère préindustrielle. Enfin, nous avons balayé les options de réduction des émissions par secteurs. Nous montrons ainsi qu'il y a des options pour réduire les émissions disponibles dans tous les secteurs aujourd'hui, à un coût raisonnable.

Ce rapport compte également un focus inédit sur des options d'action passant par la demande, que ce soit la demande en

énergie mais aussi la demande en biens et en matériaux : adoption de nouvelles technologies, transformation de nos modes de production et de consommation... Pour être efficace, le changement doit se faire à toutes les échelles : infrastructures collectives, territoires, villes, organisations sociales. Nous montrons qu'il ne s'agit pas uniquement de choix de consommation individuels.

Dans les derniers chapitres, nous faisons aussi le bilan des politiques d'atténuation qui ont été mises en œuvre depuis 2014 (date de précédent rapport, Ndlr) dans de nombreux pays à travers le monde au niveau national, local, à l'échelle des villes et des entreprises. Mais malgré ces initiatives, les émissions de GES sur la planète ont continué d'augmenter. La baisse de près de 5 % des émissions en 2020, due essentiellement au ralentissement des activités économiques durant la pandémie mondiale, a déjà été rattrapée. En fait, sur la dernière décennie, les émissions ont augmenté de 1,3 % en moyenne par an. Si des efforts d'atténuation existent, ils restent pour l'heure insuffisants.

Nous avons également travaillé sur la question des financements en évaluant, d'un côté, les besoins d'investissements sous-jacents à des trajectoires compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris (contenir la hausse des températures sous les 2 °C) ; de l'autre, en confrontant ces investissements nécessaires avec les flux actuels. Le but étant ici de parvenir à une cartographie des solutions pour réorienter l'épargne mondiale disponible vers les chantiers de transformation prioritaires.



Lire l'intégralité de l'entretien sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)

1. Directrice de recherche au Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired - CNRS/ Cirad/École des Ponts ParisTech/AgroParisTech).

...  
 l'océan, s'ajoutent aux pressions locales pour entraîner une dégradation croissante de nombreux écosystèmes marins, côtiers, terrestres. Mais la manière dont nos sociétés dépendent étroitement de la santé des écosystèmes reste encore quasi inconnue de nombreux décideurs politiques. Au fil de mes interventions publiques, j'ai aussi repéré la récurrence de discours qui justifient l'inaction, une nouvelle forme insidieuse de déni. Il y a le fameux : « *la France ne représente que 1 % des émissions mondiales* ». Or ce chiffre ne tient compte ni du cumul des émissions de CO<sub>2</sub> depuis la révolution industrielle (c'est ce cumul qui est le premier facteur du réchauffement planétaire), ni des importations (largement au-dessus de la moyenne mondiale), ni des capacités d'agir pour un pays qui est la

7<sup>e</sup> économie mondiale. Quant à l'argument du nucléaire et de l'électricité bas carbone de la France, il sert souvent d'alibi pour ne pas agir dans les autres secteurs (transports, bâtiments, système alimentaire, etc.). Il faut ainsi rappeler que le parc nucléaire a été développé dans les années 1970 suite aux chocs pétroliers et ne représente pas un effort spécifique pour agir pour le climat, et que l'empreinte carbone moyenne d'un Français, tenant compte des importations, est proche de la moyenne européenne et largement supérieure à la moyenne mondiale. Il y a aussi des arguments qui reportent la responsabilité sur les consommateurs : « *Ce n'est pas de notre faute si les personnes choisissent des SUV...* » Comme si les campagnes marketing et les stratégies de rentabilité des constructeurs automobiles ne contribuaient pas à façonner l'évolution de la demande !

Au « palmarès » des alibis de l'inaction, j'ai aussi noté : « *Dans mon entreprise, on a enlevé les touillettes en plastique pour le café, on a fait notre part !* » ou encore « *Je fais confiance au progrès technologique. Dans quelques années, une nouvelle solution sera accessible, je ne vois pas pourquoi je devrais faire un effort maintenant* », alibi pour ne rien changer à un style de vie parfois très émetteur de GES. Et le pire de tous : « *Tout va bien puisque les enfants apprennent les enjeux du changement climatique à l'école. Comme cela ils auront toutes les compétences pour agir* », où l'on fait peser la charge mentale de l'action pour le climat aux jeunes générations, plutôt que d'agir à hauteur de nos responsabilités, maintenant.

**Notez-vous tout de même une évolution positive des mentalités, chez les jeunes justement ?**

Violents incendies à Lake Conjola, en Australie, en décembre 2019.



“(...) l’empreinte carbone moyenne d’un Français, tenant compte des importations, est proche de la moyenne européenne et largement supérieure à la moyenne mondiale.”

**V. M.-D.** Tout à fait. Une culture de la transition écologique se met clairement en œuvre, prenant de multiples formes dans la société civile et tout particulièrement parmi la jeunesse. Celle-ci veut être formée, acquérir des compétences, réfléchit à des métiers qui ont du sens, elle est exigeante sur l’engagement des entreprises et des institutions... L’initiative Labos 1point5<sup>2</sup>, lancée par de jeunes scientifiques français et devenue un GDR, en est un exemple spectaculaire. Il y a également une montée en puissance des actions juridiques qui font jurisprudence. Cette diversité d’acteurs et d’approches (coalitions d’entreprises, collectivités territoriales et villes, initiatives citoyennes, des peuples autochtones) est soulignée dans les rapports du Giec. Car l’implication de la société civile est cruciale pour surmonter les blocages liés aux intérêts en place, au déni, aux habitudes, aux limites des institutions existantes, et pour motiver une action plus ambitieuse de la part des responsables politiques.

**Le Giec doit-il selon vous revoir certains aspects de son fonctionnement ?**

**V. M.-D.** Nous le faisons quand nécessaire. Par exemple, nous avons travaillé sur la mise en place de pratiques inclusives et participatives, aidés par des spécialistes, afin de permettre à chacun de contribuer au mieux, en tenant compte des biais inconscients et des différences culturelles. Certains

scientifiques, par exemple, ont du mal à se sentir légitimes et participer pleinement à la préparation des rapports, c’est le fameux syndrome de l’imposeur. Les aider à le surmonter permet de faire en sorte que l’évaluation soit la plus rigoureuse, objective et complète possible, s’appuyant sur l’engagement, les compétences, l’expertise de tous les auteurs.

Nous avons aussi renforcé la transparence de notre évaluation, avec une approche de données ouvertes, appliquant les principes « Fair » (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*), et un atlas interactif. Il reste encore beaucoup de réflexions à mener. Par exemple, des outils pourraient aider à automatiser l’analyse de la littérature scientifique. Et il a déjà été défini que le prochain cycle d’évaluation, qui démarrera en 2023, comportera un rapport spécial portant sur les villes et le changement climatique.

**Comment renforcer le dialogue avec le grand public, qui n’a pas toujours les outils pour comprendre et s’approprier vos conclusions ?**

**V. M.-D.** Il y a maintenant, au sein même du Giec, plusieurs personnes chargées d’apporter leur expertise en communication, et également beaucoup de scientifiques, auteurs des rapports, qui s’investissent fortement dans le partage des connaissances. Mais cela reste insuffisant. Les rapports sont techniques, longs, difficiles à lire. Nous avons produit des fiches de synthèse par région, et nous le

ferons aussi par secteur d’activité, pour proposer des documents de quelques pages seulement, accessibles, faciles à utiliser. D’autres acteurs ont produit des adaptations de rapports du Giec pour les décideurs urbains, des ressources utilisables en classe pour les enseignants, des résumés pour les citoyens. Un résumé pour les acteurs est en cours de coproduction. Il est plus que jamais essentiel de renforcer la formation des décideurs et des journalistes non scientifiques afin que les messages du Giec soient mieux compris et diffusés au grand public.

Quant aux réseaux sociaux, ils sont à présent incontournables pour toucher certains publics. Comment partager les points clés des rapports du Giec sur YouTube, Instagram ou TikTok ? Cela demande un savoir-faire maîtrisé par une nouvelle génération de médiateurs scientifiques mais pas par une institution comme le Giec. Je fais mon possible pour communiquer sur Twitter – ce qui prend beaucoup de temps ! – avec un réel intérêt sur les retours et échanges. D’ailleurs, lorsque j’ai réagi au film *Don’t look up* avec mon regard de femme climatologue, le fil de tweets a été vu davantage en quelques jours que celui que j’ai dédié au résumé du rapport du groupe I l’été dernier... C’est dire la puissance de frappe d’une plateforme comme Netflix. Cela pose aussi la question des interfaces entre sciences et création artistique, afin de mieux imbriquer la culture populaire et les connaissances liées au changement climatique et à l’action pour le climat. Et permettre d’imaginer une transition réussie pour le climat, pour la biodiversité, et pour nous. **II**

2. Issu de la communauté scientifique, le projet permet de construire des outils de référence pour mesurer l’empreinte carbone de la recherche académique et pour agir de manière cohérente avec les engagements de la France pour le climat.

# Un immense défi pour la recherche

Avec plus de 2 000 scientifiques qui y dédient leurs recherches, le CNRS est le principal contributeur national de la production de connaissance sur les différents aspects du changement climatique, et un des premiers à l'échelle mondiale. Le sujet figure ainsi parmi six défis inscrits dans le Contrat d'objectifs et de performance (COP) 2019-2023 entre le CNRS et l'État, des défis auxquels la société fait face dès aujourd'hui et sur lesquels l'organisme souhaite apporter des avancées significatives en décloisonnant les disciplines. Fortement transdisciplinaire, l'étude du changement climatique et la recherche de solutions pour le limiter ou s'y adapter impliquent les sciences du climat et de l'énergie tout comme l'écologie et les sciences sociales et politiques, à toutes les échelles d'observation, d'expérimentation et de modélisation. La question occupe donc tous les instituts du CNRS et s'appuie sur des dispositifs et infrastructures, distribués sur la planète et parfois uniques au monde, dans tous les domaines. Avec l'aide de la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires, les coordinateurs du défi développent un outil pour

visualiser les forces de recherche du CNRS, et faciliter la mise en relation de scientifiques pour développer leur projet ou construire une réponse commune aux appels à projets nationaux et internationaux sur le sujet. « Il faut être efficace et faire tout ce que nous pouvons pour accélérer les collaborations, afin d'avancer dans la résolution de ce défi majeur », assure Stéphanie Vermeersch, l'une des coordinatrices. En complément, le CNRS copilote plusieurs Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) sur des domaines en lien avec le climat, comme FairCarbon qui propose des solutions pour la neutralité carbone ou OneWater qui considère l'eau comme un bien commun à protéger. Au-delà de la recherche, le CNRS favorise aussi les dialogues au sein du monde académique et avec d'autres acteurs, notamment politiques, participant ainsi activement à l'aide à la décision. L'implication de nombreux chercheurs et chercheuses est importante dans les travaux du Giec, les Conférences des Nations unies sur les changements climatiques et plus généralement dans divers niveaux de diplomatie scientifique. Enfin, le CNRS se préoccupe

aussi de sa propre empreinte environnementale. Il met en œuvre les vingt mesures du plan « services publics écoresponsables » en matière de mobilité durable, achats responsables ou encore alimentaire. Des actions de mesure de l'empreinte carbone et l'identification de leviers d'actions pour réduire l'impact de la recherche sur l'environnement sont inscrites dans le COP depuis 2019. Une enquête auprès des personnels du CNRS montre qu'ils sont volontaires pour modifier leurs pratiques, notamment leurs déplacements, et portent de nombreuses initiatives pour répondre à ces enjeux.

Avec ses partenaires, le CNRS incite les laboratoires dont il est tutelle à s'emparer de ce sujet, avec par exemple des formations et la nomination de référents. Un comité dédié a même été créé en 2020. « Par son périmètre national et la diversité des domaines qu'il traite, le CNRS a une responsabilité particulière à jouer. Nous espérons être une force d'entraînement pour l'ensemble du monde de la recherche française », conclut Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS. II

Le président du Giec, le secrétaire et les coprésidents des trois groupes de travail, dont Valérie Masson-Delmotte à gauche, en Corée du Sud, octobre 2018.



## Un best-seller pour tout comprendre

Avec déjà plus de 15 000 exemplaires vendus, c'est un véritable succès de librairie que connaît cet ouvrage d'Anne Brès, responsable de communication à l'Institut national des sciences de l'Univers (CNRS), avec le blogueur BonPote et la graphiste Claire Marc. La recette du succès : des réponses claires, sous forme de bandes dessinées, aux questions fondamentales et aux idées reçues sur le climat. À lire ou à offrir sans modération, pour mettre à jour ses connaissances ou faire comprendre les enjeux de ce sujet incontournable.

**Tout comprendre (ou presque) sur le climat**, Anne Brès, BonPote et Claire Marc, sous la direction de Jean-François Doussin, préface de Valérie Masson-Delmotte, CNRS Éditions, fév. 2022, 136 p., 18 €

# Forty-Eighth Session of the IPCC and First Joint Session of Working Groups I, II and III

1-5 October 2018 | Incheon, Republic of Korea



© WANG JINGQIANG/XINHUA-REA

## *Le Giec, une institution sans équivalent*

Depuis plus de trente ans, cette coopération internationale dresse un état des lieux des connaissances scientifiques sur l'évolution du climat. Quelles sont ses forces et faiblesses ? Comment s'est-elle remise en question pour faire évoluer son modèle ?

PAR FABIEN TRÉCOURT

Lorsqu'il est créé en 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) est une organisation d'un genre complètement nouveau. Aucun groupement n'avait tenté de rassembler les résultats de toute une littérature scientifique, sur le climat et son évolution en l'occurrence, ainsi que sur les effets attendus des politiques pouvant être menées en conséquence. Réalisé à l'initiative de chercheurs, mais sous la houlette des Nations unies, ce travail devait non seulement parvenir à des consensus scientifiques sur des questions complexes, mais aussi recevoir un aval des représentants de pays membres de l'ONU. L'entreprise paraît colossale, presque folle... Et pourtant, cinq volumineux « rapports d'évaluation » ont déjà été publiés (le sixième le sera à l'automne 2022), accompagnés de « résumés à l'intention des décideurs », des synthèses destinées aux politiques comme au grand public, même sans formation scientifique. Tous ces docu-

ments sont accessibles sur le site du Giec. « *N'importe qui peut les consulter, s'y référer ; rien n'est tenu secret*, insiste la philosophe Anouk Barberousse, du laboratoire Science, éthique, société<sup>1</sup>. *La transparence des données et des méthodes de travail s'est imposée très tôt.* »

Le Giec est composé de trois groupes, traitant chacun d'un volet du rapport. Concernant le sixième rapport, le premier volet publié en août 2021 porte sur la physique du climat. Le second volet, dévoilé en février 2022, traite des impacts, de la vulnérabilité et des stratégies d'adaptation face au changement climatique. Le troisième et dernier volet, publié le 4 avril 2022, est consacré à l'atténuation du changement climatique et de ses conséquences. Les trois groupes ne sont cependant pas isolés et travaillent ensemble.

### Un pluralisme rare

Tout commence par une réunion de cadrage à laquelle peuvent participer, sur invitation du Giec, scientifiques, experts ou encore observateurs. Les personnes sélectionnées sont regroupées en fonction de leurs spécialités, au côté de représentants de pays membres de l'ONU. Cette première étape permet de définir les questions de recherche et les enjeux pertinents pour les décideurs devant être traités. Les États sollicitent ensuite des scientifiques pour participer à l'écriture – chaque chapitre comp-

1. Unité CNRS/Sorbonne Université. 2. Unité CNRS/Université Grenoble Alpes.

tera au final une bonne quinzaine d'auteurs. « *Autant la réunion de cadrage suit une procédure stricte, et impose un canevas dont on ne devrait pas s'éloigner, autant la rédaction se passe de façon plus libre et informelle* », observe Kari De Pryck, post-doctorante au Pacte, laboratoire de sciences sociales<sup>2</sup>.

Les auteurs se réunissent tous les quatre à six mois pour faire un état d'avancement, vérifier que le cadrage est respecté et que les différentes parties du rapport sont en voie de former un ensemble cohérent. Les textes aboutis sont soumis à la relecture d'experts et scientifiques du monde entier pour être commentés, questionnés et si besoin corrigés. Enfin, les représentants des États membres du Giec peuvent relire les différentes versions du rapport – notamment le résumé à l'intention des décideurs ; chacun peut le critiquer, demander des clarifications ou encore des changements avant de l'approuver. « *Cette phase de négociation est souvent la plus difficile*, souligne Kari De Pryck. *Les textes sont analysés ligne par ligne, parfois un simple mot peut susciter des heures de débat, chaque délégué ayant à cœur de défendre les intérêts et perspectives de son pays.* » Au début des années 2000 par exemple, les États-Unis et l'Arabie saoudite ont âprement bataillé pour remplacer l'expression « influence appréciable » (de l'activité humaine sur le climat) par « influence discernable », la première passant pour trop forte à leurs yeux...

### Le prix de la transparence

Cette intrication de la science et de la politique est une spécificité du Giec. « *Les chercheurs font l'essentiel du travail*, précise Anouk Barberousse. *Mais dès l'origine sa vocation était d'interpeller les décideurs du monde entier.* » Une vocation parfois source de critiques : le mélange des genres encouragerait une instrumentalisation de la recherche au service d'une idéologie... Le débat a notamment resurgi en 2009, à l'occasion du « climategate » : le piratage de mails attribués à une équipe de recherche en climatologie est instrumentalisé par des militants climatosceptiques, pour dénoncer une supposée exagération du réchauffement et de son origine humaine. La même année, des erreurs minimales sont signalées dans le quatrième rapport du Giec et utilisées pour décrédibiliser les travaux de l'organisation. Bien qu'exagéré, le débat en a consolidé le fonctionnement : « *La publication des données et la relecture par les pairs ont été encore élargies au début des années 2010* », relève notamment Anouk Barberousse.

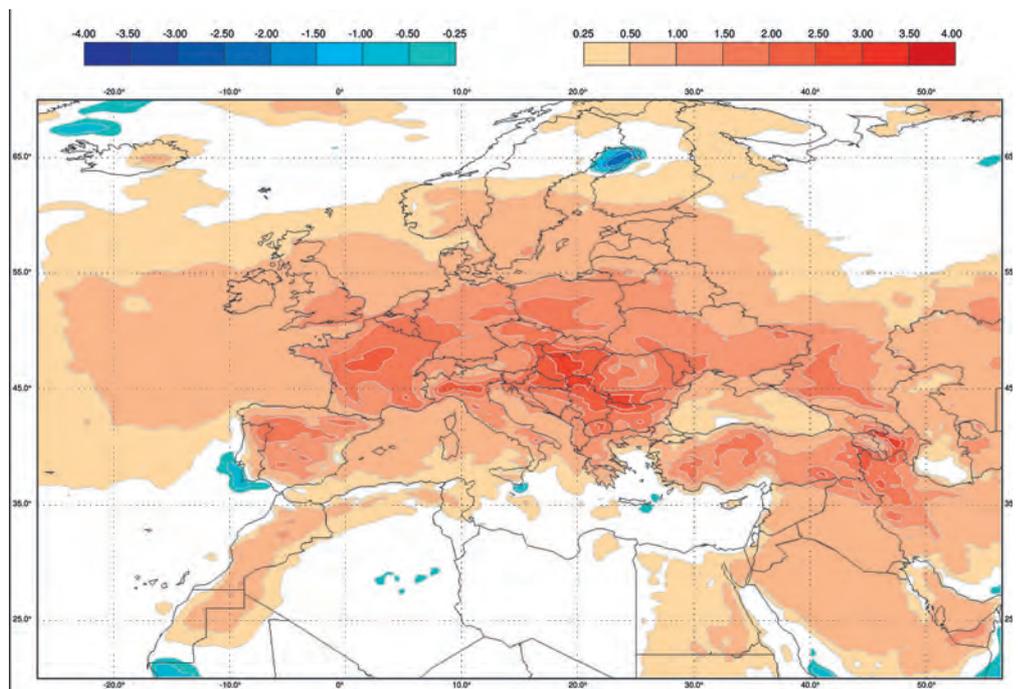
De manière générale, l'attention au processus d'édition et à sa transparence n'a cessé de progresser. « *Dès la fin des années 1990, rappelle*

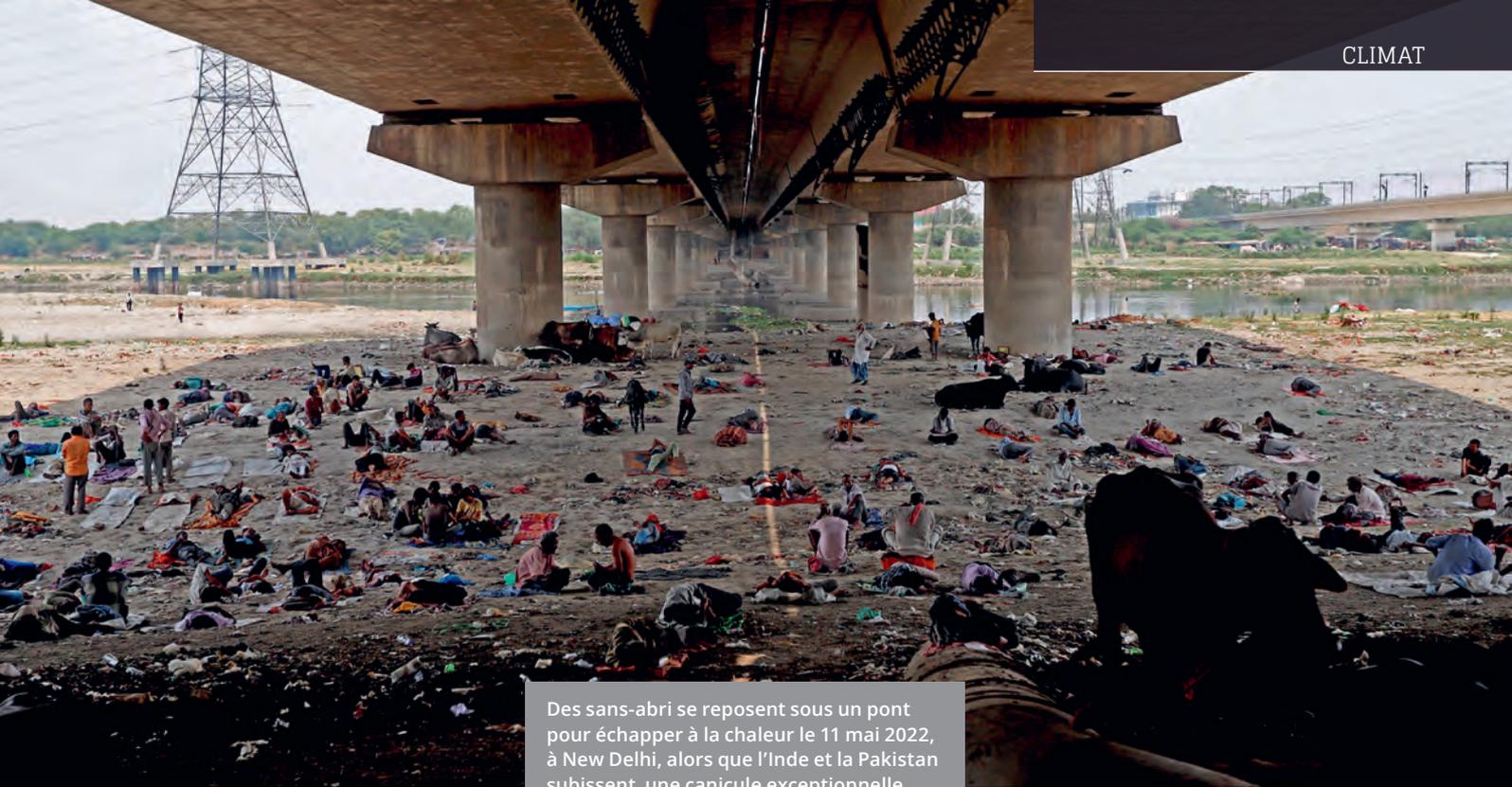
“*Les rapports du Giec présentent avant tout un état de l'art, exposant toutes les pistes étudiées dans les laboratoires et leur état d'avancement.*”

Kari De Pryck, le Giec a par exemple introduit des rôles d'éditeur réviseur », des personnes chargées de vérifier que toutes les procédures sont respectées, que toutes les voix peuvent se faire entendre, qu'il n'y a pas de rapports de forces déséquilibrés ou de conflits d'intérêts, etc. À l'autre bout de la chaîne, la relecture des textes préliminaires a été rendue presque universelle. « *En caricaturant à peine, poursuit la chercheuse, depuis 2010 n'importe qui pouvant attester d'une compétence, voire d'un simple intérêt professionnel pour les sujets du Giec peut se faire accréditer pour commenter et critiquer les premières versions.* »

Si ce processus a le mérite d'être transparent, il rend difficile le travail des auteurs qui se retrouvent rapidement à couler sous des milliers de commentaires, d'objections, ou encore de demandes de révision. « *C'est en train de devenir un problème car ils sont supposés répondre à tous les commentaires* », relève Kari De Pryck. D'autant que la participation à un rapport du Giec n'est pas rémunérée, ne donne pas lieu à des compensations et ne fait que s'ajouter à leur travail habituel. Ce qui rend encore plus injustes les

Dans ce modèle de prévisions à long terme (modèle européen ECMWF), les anomalies de températures pour juillet 2022 dépassent les +2 °C sur la majorité de la France.





Des sans-abri se reposent sous un pont pour échapper à la chaleur le 11 mai 2022, à New Delhi, alors que l'Inde et la Pakistan subissent une canicule exceptionnelle.

© AMARJEET KUMAR SINGH/ANADOLU AGENCY VIA AFP

attaques de mauvaise foi dont les scientifiques font parfois l'objet. Une autre évolution importante du Giec a trait à l'expression des incertitudes et des divergences au sein du rapport. Des notes méthodologiques et un même système de conventions ont été imaginés pour aider les auteurs à exposer non seulement des consensus, mais aussi des débats, des marges d'erreur ou encore des données inconnues à ce stade.

### Une réussite malgré tout

« D'un point de vue purement physique, donne en exemple Anouk Barberousse, *les modèles utilisés sont fondés sur des équations connues depuis le XIX<sup>e</sup> siècle ! Il n'y a pas vraiment de débat sur ces fondements ; à partir de là, on sait que les températures vont augmenter du fait de l'activité humaine. En revanche quand on entre dans le détail de cette évolution, dans des prédictions ou encore dans les effets de politiques publiques, il y a des divergences et c'est bien normal.* » Les rapports du Giec n'ont pas vocation à trancher ou à produire de nouvelles connaissances, mais présentent avant tout un état de l'art, exposant toutes les pistes étudiées dans les laboratoires de recherche et leur état d'avancement aujourd'hui. Malgré d'importants efforts de vulgarisation, cependant, ils restent techniques et difficiles à lire. « *Honnêtement je pense que presque personne ne peut comprendre les rapports dans leur totalité,* poursuit Anouk Barberousse. *Mais l'important est qu'ils donnent une légitimité scientifique et épistémologique aux résumés pour les décideurs.* »

Ces synthèses sont loin d'être tranchées d'ailleurs. Chacune expose différents scénarios, par exemple les suites possibles de telle ou telle décision politique concernant les émissions de gaz à effet de serre (GES) par exemple. À partir de là, le détail des projections dépend du modèle scientifique et des indicateurs retenus en leur sein. Certaines mettent davantage l'accent sur l'élévation de la température

globale, un critère important aux yeux de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. D'autres privilégient les événements extrêmes, le nombre de canicules par exemple. D'autres encore s'intéressent aux minimales saisonnières, etc. Ces différentes projections peuvent mener à des divergences d'appréciation quant à l'évolution du climat. Mais elles permettent aussi d'identifier des consensus, par exemple sur le fait que toutes font état d'une élévation des températures due à l'activité humaine. Cette conclusion n'a rien d'un message politique que le Giec aurait pour mission de démontrer a posteriori.

D'autant que les conclusions sont en général l'objet d'après négociations : « *lorsque des États membres négocient sur des formulations ou des mots utilisés dans le résumé, c'est plus souvent pour protéger leurs intérêts divers. Cela peut revenir à souligner l'urgence d'agir ou à minorer leurs responsabilités dans la crise climatique, voire les risques liés au réchauffement,* constate Kari De Pryck. *On a donc des acteurs aux intérêts très différents qui valident les conclusions du Giec.* » L'organisation est cependant parvenue à faire bouger les lignes : en diffusant le meilleur des connaissances actuelles sur le climat, et en obtenant à échéance régulière une approbation des Nations unies sur ces conclusions, le Giec est parvenu à mettre la question climatique au centre de la géopolitique. « *Des chercheurs ont parfois été déçus car ils s'attendaient à avoir une influence immédiate,* constate Anouk Barberousse. *Mais on ne devrait pas sous-estimer la réussite de cette entreprise : il reste exceptionnel qu'une coopération scientifique ait acquis une telle influence sur la scène internationale.* » II

**+**  
**En ligne** Retrouvez tous nos contenus (podcast, articles, vidéos) sur le climat sur le [journal.cnrs.fr/climat](http://journal.cnrs.fr/climat)

# Tourbières : une bombe climatique à retardement

**1.** Menacée par un déficit en eau, par l'envahissement d'arbres et de graminées, et par la perte d'une mousse prospérant en milieu humide (la sphaigne), la tourbière de la Guette (Cher) pourrait disparaître d'ici une vingtaine d'années. Les chercheurs veulent estimer sa vulnérabilité à relâcher des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, voire aussi du méthane) dans l'atmosphère et vers les rivières.

MATIÈRE

TERRE

Les tourbières couvrent 3 % de la surface du globe mais représentent 30 % du carbone total piégé dans les sols. Problème : le dérèglement climatique et les activités humaines affectent ces puits de carbone qui se mettent à relâcher des gaz à effet de serre... aggravant encore le changement du climat. Focus sur la tourbière de la Guette, dans le Cher, où les chercheurs<sup>1</sup> tentent de poser un diagnostic.

TEXTES PAR LA RÉDACTION

PHOTOS © CYRIL FRÉSILLON/ISTO/CNRS PHOTOTHÈQUE

1. Les scientifiques qui étudient la tourbière de la Guette appartiennent à l'Institut des sciences de la Terre d'Orléans ou Isto (Unité CNRS/Bureau de recherches géologiques et minières/Université d'Orléans).



**3.** En 2017, les chercheurs ont installé un dispositif automatique équipé de capteurs qui mesurent la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), en méthane ( $\text{CH}_4$ ) et en eau du site, ainsi qu'une station de mesure des caractéristiques physiques du sol. Tous les mois, Juliette Mazon, ingénieure à l'Isto, s'occupe de nettoyer les capteurs et de relever les données.





2. L'accumulation de ce genre de mousse - la sphaigne - participe à la formation de la tourbe, matière organique morte et véritable réservoir de carbone. La Guette correspond à des millénaires d'accumulation de tourbe de sphaigne. À l'échelle mondiale, les émissions annuelles de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) par les tourbières dégradées représentent déjà 5 à 10 % des émissions anthropiques (causées par l'activité humaine) annuelles.

4 et 5. Juliette Mazon enfonce dans le sol un carottier pour effectuer un prélèvement. Dans la carotte de tourbe obtenue (en bas), 1 cm de matière correspondrait, selon la profondeur, à environ une centaine d'années de dépôts de matières organiques.

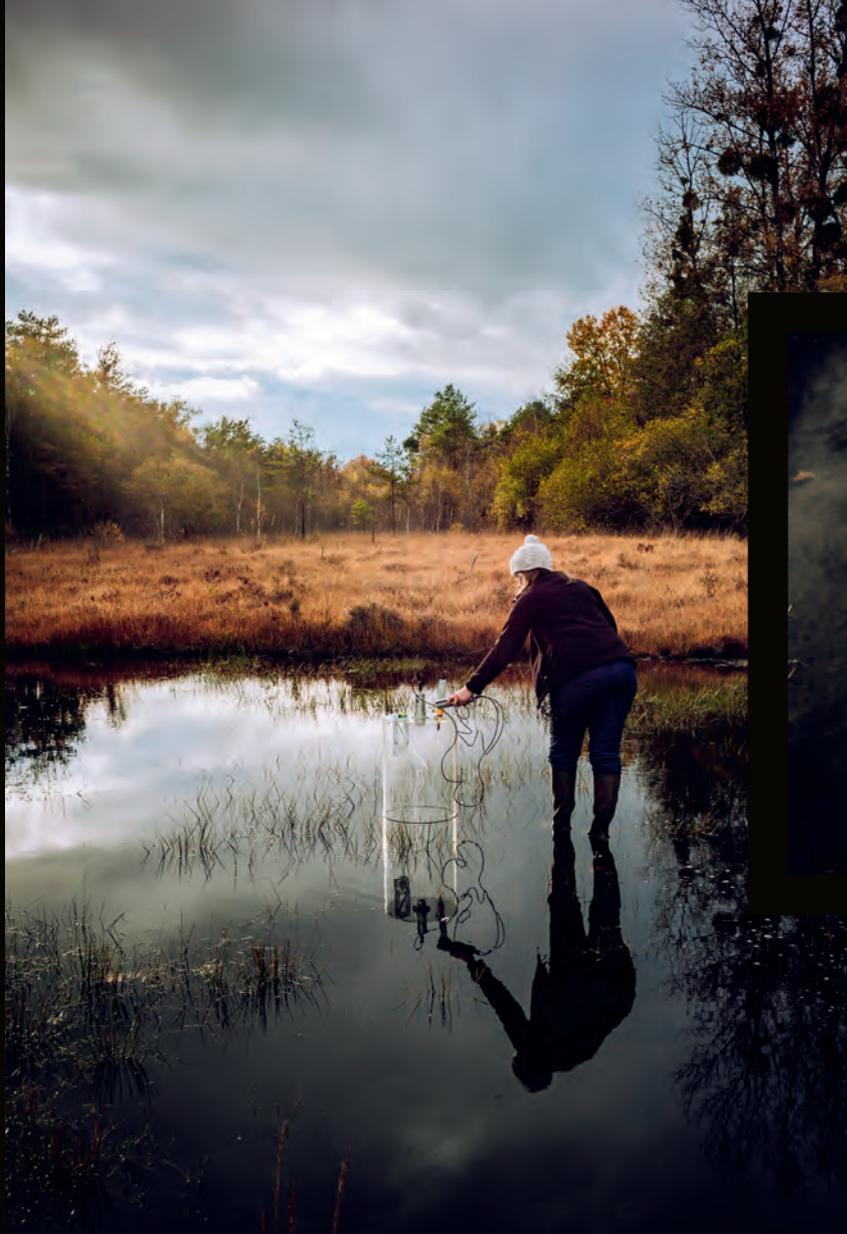




**6,7.** Les carottes sont conditionnées en tranches dans des feuilles en aluminium (en haut) pour éviter les contaminations extérieures. Après les avoir pesés, les échantillons sont séchés à 40 °C dans une étuve pendant une semaine (à gauche). Puis, ils sont à nouveau pesés. La différence de masse permettra de modéliser la teneur en eau des tourbes.



**8.** Les échantillons sont ensuite chauffés à 550 °C pendant quatre heures dans un four. Après cette procédure, dite « perte au feu », il ne reste plus de l'échantillon que la matière minérale qui permet d'évaluer le stock de carbone du sol. Les chercheurs suivent ainsi l'évolution de ce stock dont la baisse correspond à une moins bonne santé de la tourbière.



**9 et 10.** Ce cylindre de plastique est une chambre de mesure. Échanges gazeux, température, luminosité, tout y est pris en compte. Le dispositif permet ainsi d'évaluer le bilan entre la photosynthèse réalisée en pleine lumière par les plantes mises « sous cloche » et la respiration des plantes et micro-organismes du sol. C'est ce flux de carbone qui indique si, au point de mesure, le milieu fonctionne en source ou en puits de carbone.

### 11.

Le taux d'humidité du sol est essentiel au développement de la sphaigne. Juliette Mazon mesurer donc la hauteur d'eau en différents points du site et prélève des échantillons d'eau à analyser. Son taux de silice, nutriment de la matière organique, entre lui aussi dans l'équation de la formation de la tourbe et donc du stockage du carbone. Selon les premières estimations, le site fonctionne hélas en source de carbone.





SOCIÉTÉS



INTERNATIONAL

Trois mois après le début de l'invasion russe en Ukraine, le 24 février, historiennes, sociologues, chercheuses en sciences politiques ou en sciences du numérique nous livrent des clés pour mieux comprendre le conflit et ses enjeux.

DOSSIER RÉALISÉ PAR LA RÉDACTION

# *Regards croisés sur la guerre en Ukraine*

# Les racines du conflit

“

Si l'année 1991, date de l'effondrement de l'Union soviétique et de l'indépendance de l'Ukraine, marque évidemment un tournant, les relations entre Moscou et Kiev n'étaient déjà pas simples pendant la période soviétique. Dès les années 1960 et 1970, un nationalisme ukrainien a ainsi émergé, débouchant sur des revendications d'ordre culturel et dans une certaine mesure politique. Dans son livre *L'Empire éclaté*, publié en 1978, Hélène Carrère d'Encausse parle même de « frères ennemis » pour qualifier Russes et Ukrainiens. Ce nationalisme avait déjà été fortement alimenté par ce que les Ukrainiens appellent *Holodomor*, à savoir la grande famine organisée par Staline en 1932-1933, qui a fait plusieurs millions de morts en Ukraine.

Parallèlement, l'idée que l'Ukraine faisait partie de la Russie était très répandue au sein de la société russe et le pays a longtemps été désigné comme la « petite Russie ». C'était même son nom officiel sous les tsars ! Une façon de montrer que les Ukrainiens appartenaient à un peuple panrusse. En conséquence, aux yeux des Russes, l'Ukraine relève plutôt de la politique intérieure que de la politique extérieure. En 1991, son indépendance suscite en Russie une très vive émotion, résumée ainsi par Boris Eltsine : « *Nous nous sommes séparés dans la douleur. Il a fallu diviser l'indivisible.* »

## Contraindre plutôt que convaincre

Nombreux sont ceux qui n'accepteront jamais sa pleine souveraineté. C'est le cas de Vladimir Poutine qui, dans un article publié sur le site du Kremlin en juillet 2021, explique que Russes et Ukrainiens ne forment qu'un seul peuple, que l'État ukrainien est artificiel et que la souveraineté de l'Ukraine n'est possible que dans le partenariat avec la Russie. L'attitude de la Russie se caractérise également par une ingérence continue dans les affaires intérieures ukrainiennes, qui s'avère contre-productive. Par exemple en 2004, Vladimir Poutine se rend à Kiev pour soutenir le candidat prorusse à la présidence, Viktor Ianoukovytch, et se coupe complètement de l'autre candidat, Viktor



© INSTITUT MONTAIGNE

Historienne et politiste, Anne de Tinguy<sup>1</sup> nous livre son éclairage sur l'invasion russe en Ukraine. Elle revient sur les rapports tumultueux que les deux nations entretiennent depuis des décennies.

PROPOS RECUEILLIS PAR CLÉMENT BAUDET

louchtchenko, qui sera finalement élu. Ou encore, fin 2013, alors que l'Ukraine négocie un accord d'association avec l'Union européenne, Moscou fait fortement pression sur le président Ianoukovytch (élu en 2010), qui accepte de suspendre les négociations. Des manifestations pro-européennes éclatent, qui aboutiront en février 2014 à la révolution de la Dignité (Maïdan) et à la fuite de Ianoukovytch. D'une manière générale, la politique russe est marquée par l'idée qu'il suffit de contraindre et que ce n'est pas la peine d'essayer de convaincre l'Ukraine. Contraindre via des pressions économiques, puis via le recours à la force, avec l'annexion de la Crimée (mars 2014) avant l'intervention militaire dans le Donbass, région prorusse de l'est de l'Ukraine.

Aujourd'hui, en prétendant vouloir libérer le pays d'un pouvoir « nazi », en qualifiant les Ukrainiens de « *marionnettes des États-Unis* », Poutine s'est mis à dos toute la population. Des termes injurieux et révoltants, qui ont aggravé le ressentiment des Ukrainiens, moteur de l'impressionnante résistance à laquelle sont aujourd'hui confrontées les forces russes sur le terrain (*lire p. 35*). La politique de Vladimir Poutine constitue donc un échec patent : elle a conforté l'identité et la nation ukrainiennes.

## Un « divorce civilisé »

Revenons-en à l'indépendance. Dès le début des années 1990, la politique ukrainienne a commencé à saper, lentement mais sûrement, les positions de la Russie dans l'espace post-soviétique. Bien qu'en décembre 1991, l'Ukraine soit l'un des trois pays fondateurs de la Communauté des États indépendants, celle-ci n'est à ses yeux que l'instrument d'un divorce civilisé, car son objectif premier est de se tourner vers l'Europe. Elle ne signera finalement

1. Anne de Tinguy est rattachée au Centre de recherches internationales de Sciences Po (Ceri - CNRS/IEP Paris), professeure émérite des universités à l'Institut national des langues et civilisations orientales (Inalco).

Des fumées s'élèvent de l'usine d'Azovstal à Marioupol, au sud-est de l'Ukraine, le 2 mai 2022.

**+**  
**En ligne** Retrouvez tous nos contenus en intégralité sur le [journal.cnrs.fr](http://journal.cnrs.fr)

pas la charte de cette Communauté, pas plus qu'elle n'adhèrera au pacte de sécurité collective (1992), ni à l'union douanière (1994), ni à l'Union économique eurasiennne née en janvier 2015.

La relation entre l'Ukraine et les États-Unis s'est développée dans le cadre de sa dénucléarisation. L'Union soviétique avait en effet un arsenal nucléaire très important et les pays occidentaux, États-Unis en tête, ont déployé des efforts considérables pour empêcher ces armes de proliférer. Ils ont reconnu la seule Russie comme État nucléaire et ont demandé aux autres États de l'ex-URSS, sur le territoire desquels il y avait des armes nucléaires stratégiques (Ukraine, Biélorussie et Kazakhstan), d'y renoncer. Les négociations, longues et compliquées, ont débouché en 1994 sur le mémorandum de Budapest : l'Ukraine confirme alors son engagement à transférer sur le sol russe la totalité des armes nucléaires stationnées sur son sol et à signer le traité de non-prolifération en tant qu'État non nucléaire, en échange de garanties de sécurité de la part des États-Unis, de la Russie, de la Grande-Bretagne, de la Chine et de la France. L'Ukraine a respecté scrupuleusement ses engagements. Mais en 2014, lorsque la Russie a annexé la Crimée et qu'elle est intervenue militairement dans le Donbass, tout le monde avait oublié le mémorandum de Budapest... Ces garanties avaient en fait une valeur très limitée, dans la mesure où les engagements n'étaient pas contraignants.

### Intégrer l'Otan et se démocratiser

Dès 2002, sous la présidence de Leonid Koutchma, l'intégration à l'Otan – qui s'ouvre aux pays de l'Est dès décembre 1991 – devient un objectif de la politique étrangère ukrainienne. En juin 2017, le parlement ukrainien vote une loi qui en fait un objectif stratégique. Le processus de



Viktor Loukatchenko, candidat pro-occidental à l'élection présidentielle de 2004, salue ses partisans rassemblés sur la place principale de Kiev, le 22 novembre.



© CELESTINO ARCE LAMINZUMARÉA

démocratisation a été – et reste – très complexe, mais depuis les années 1990, l'Ukraine est une démocratie électorale. Contrairement à la Russie, l'alternance politique a eu lieu à plusieurs reprises. Par ailleurs, l'Ukraine a connu deux révolutions, la Révolution orange en 2004 et Maidan

en 2014. Révélatrices du fossé qui existe entre les deux pays, celles-ci le sont aussi de la volonté d'une large partie du peuple ukrainien de faire de leur pays un État de droit, un pays européen, et du rôle que la société entend jouer : en Ukraine, la société civile est depuis longtemps très dynamique. Mais Vladimir Poutine n'a jamais imaginé que ces révolutions pouvaient être autre chose que le fruit de manipulations occidentales. Si l'Ukraine parvient à mener à terme les différentes réformes qu'elle avait engagées avant la guerre, elle deviendra dans l'espace post-soviétique un pôle d'attraction concurrent de la Russie, une perspective inacceptable pour Moscou. II





Une femme volontaire de la 112<sup>e</sup> brigade de défense territoriale de Kiev s'entraîne lors d'un exercice militaire pour les civils dans la banlieue de la ville, le 5 février 2022.

# Quand les citoyens prennent les armes



© D.R.

Spécialiste de la région, la sociologue Loulia Shukan<sup>1</sup> analyse l'attachement du peuple ukrainien à la nation, à la lumière de l'histoire récente du pays.

PROPOS RECUEILLIS PAR CLÉMENT BAUDET

“

La résistance ukrainienne nous impressionne car on voit toutes ces images d'hommes et de femmes mobilisés, à la fois sur les lignes de front avec les forces armées mais aussi, pour les civils, dans ce qu'on appelle les unités de la défense territoriale. Beaucoup de solidarité, de personnes qui s'impliquent dans l'évacuation des civils, dans la distribution de provisions dans les villes assiégées, ou d'autres encore qui collectent des fonds pour approvisionner et équiper leur armée. Pour comprendre cette résistance citoyenne, il faut se rappeler que pour beaucoup d'Ukrainiens, la guerre a véritablement commencé il y a huit ans, dans le Donbass.

## Un pays en guerre depuis 2014

En effet, les événements s'enchaînent à une vitesse incroyable depuis février 2014 et la révolution de la Dignité (ou Maïdan), qui se déclenche trois mois après à la décision du président de l'époque, Viktor Ianoukovytch, de céder aux pressions du Kremlin et de suspendre la signature de l'accord d'association entre l'Ukraine et l'Union européenne en novembre 2013. Immédiatement, une grande mobilisation pro-européenne (Euromaïdan) a alors gagné Kiev, autour de la place de l'Indépendance (Maïdan), mais également d'autres villes. Bien que le régime ait refusé de

négocier et misé sur une réponse sécuritaire, violente, les manifestants ont eu raison de Ianoukovytch et l'ont poussé à la fuite. La Russie a profité de cette faiblesse pour annexer la Crimée, puis, très rapidement, le sud-est de l'Ukraine s'est embrasé, car il y a avait une grande méconnaissance de ce qui s'était réellement passé à Maïdan, et un certain nombre de craintes identitaires de la part des populations locales ont fait descendre les gens dans la rue. La Russie a alimenté ces angoisses, favorisant les sentiments prorusses et déclenchant une guerre dans le Donbass entre forces armées ukrainiennes et forces séparatistes prorusses.

## Un sentiment d'appartenance nationale ravivé

Au terme de ces huit ans, la guerre est devenue le quotidien de beaucoup de citoyens qui sont restés mobilisés sur place à travers des réseaux de bénévolat, ravivés par l'invasion russe. Soulignons également le retour estimé de 300 000 Ukrainiens qui avaient émigré dans d'autres pays européens. Beaucoup reviennent pour évacuer leur famille avant de retourner prendre les armes et défendre leur pays. Le sentiment d'appartenance, qui pouvait auparavant être très local, devient aujourd'hui un sentiment d'appartenance à une nation au sens politique du terme. En Ukraine, pays bilingue (94 % de la population parle russe et ukrainien), nombreux sont ceux qui renoncent au russe. Une distanciation avec la Russie qui ne fait que se renforcer face à la violence pratiquée à l'encontre des populations ukrainiennes. ||

1. Maîtresse de conférences à Paris Nanterre, rattachée à l'Institut des sciences sociales du politique et associée du Centre d'études des mondes russe, caucasien et centre européen (Cercec, unité CNRS/EHESS).



© ALEKSEY NIKOLSKIY/KREMLIN/SPLUNK/REUTERS

# « Le pouvoir de Poutine s'exerce à travers un réseau d'emprises sur la société »

Même s'il apparaît de plus en plus isolé, le président russe ne pourrait en aucun cas diriger seul son pays. C'est ce que souligne Françoise Daucé, spécialiste des relations entre l'État et la société en Russie, qui décrit comment Vladimir Poutine a mis en place des relais de pouvoir auprès de toutes les composantes de la société.



© F. DAUCÉ

PROPOS RECUEILLIS PAR FRANCIS Lecompte

## Que sait-on du pouvoir au Kremlin ?

**Françoise Daucé**<sup>1</sup>. Vladimir Poutine a construit un pouvoir centralisé, coercitif, mais également appuyé sur un réseau décentralisé d'encadrement de la société. La coercion est distribuée et déléguée à différents acteurs. Il s'agit bien sûr des agents des « ministères de force » chargés de maintenir l'ordre dans le pays (le ministère de l'Intérieur, le Service fédéral de Sécurité, les centres de lutte contre l'extrémisme) mais aussi des administrations régionales et locales. Le ministère de la Justice surveille le monde associatif. Cela a abouti à la dissolution, en décembre 2021, de l'ONG Memorial. Côté médias, l'agence

1. Sociologue, directrice du Centre d'études des mondes russe, caucasien et centre-européen (Cercec, unité CNRS/EHESS). 2. Elle militait pour la réhabilitation des victimes du stalinisme et la défense des droits de l'homme.



V. Poutine face à son Conseil de sécurité, demandant à chacun de ses membres de se prononcer sur l'indépendance des zones séparatistes du Donbass le 21 fév. 2022, au Kremlin, à Moscou.



© J.M. GALAN

## La résistance est aussi numérique

PAR FRANCESCA MUSIANI <sup>1</sup>

“ Depuis les années 2010, une stratégie d'autonomisation de l'Internet russe est opérée pour contrer les influences étrangères. En sont des exemples la loi sur l'Internet souverain, adoptée en 2019 dans le but officiel de protéger le pays des cyberattaques, et la loi anti-Apple, adoptée en 2020 pour pré-télécharger des applications de fabrication russe sur les smartphones vendus en Russie. Un des objectifs affichés est aussi la possibilité d'isoler physiquement l'Internet russe du reste du monde, en créant sa propre version du système de noms de domaine et en montrant que les fournisseurs d'accès Internet (FAI) peuvent diriger les flux d'information vers des points de routage contrôlés par le gouvernement.

En dix ans, Roskomnadzor (RKN), organisme de contrôle des communications du gouvernement fédéral, a étendu sa compétence pour bloquer des sites et les placer sur liste noire. Le nouveau système d'inspection approfondie des paquets (deep packet inspection) ralentit ou bloque Facebook, Instagram et Twitter, et bloque les médias indépendants.

En Ukraine, les perturbations sont dues aux opérations militaires endommageant les câbles optiques ou les antennes relais. En Russie, c'est orchestré d'en haut, le plus souvent par RKN. La messagerie Telegram, au chiffrement peu fiable mais réputée « imblocable » est devenue le principal outil de communication. Elle sert aux Ukrainiens pour se coordonner dans les situations d'urgence et aux militants russes pour organiser des actions anti-guerre. Des utilisateurs plus experts plaident eux pour une plus grande utilisation des messageries chiffrées décentralisées telles que Briar, Matrix ou Delta Chat.

Les citoyens se tournent aussi vers des outils « anciens » : SMS, courrier électronique... Les FAI ukrainiens travaillent à amener Internet jusque dans les bunkers, grâce à des « bricolages ». Les médias d'opposition russes reviennent, eux, aux « classiques » listes de diffusion car leurs sites web sont officiellement bloqués.”

1. Directrice adjointe du Centre Internet et Société du CNRS et membre de ResisTIC, projet sur les « résistances numériques » à la surveillance et à la censure dans l'Internet russe.

Roskomnadzor assure la surveillance des communications (*lire encadré ci-contre*). On pourrait étendre les exemples aux domaines de la recherche, de l'enseignement, de la culture, etc. Tous ces organes peuvent être mobilisés pour mettre en œuvre une politique impulsée par le centre fédéral.

### Donc Poutine ne gère pas seul son immense pays...

**F. D.** Non bien sûr, il s'appuie sur une série de réseaux, de nœuds et d'emprises sur la société. L'exercice du pouvoir passe par des relais locaux, gouverneurs de région, maires des grandes villes et administrations locales. Ces acteurs font parfois preuve de zèle à l'égard du pouvoir central, en anticipant les décisions et les volontés de Moscou.

### Comment le pouvoir central contrôle-t-il ses relais ?

**F. D.** Les élections locales et régionales ont été fortement encadrées. Gouverneurs et maires doivent donc leur poste au pouvoir central et sont tenus à une grande loyauté. Idem pour les administrations locales. Et il n'y a pas de contre-pouvoir institutionnel. Les forces politiques d'opposition ont été écartées de la Douma (le parlement) depuis 2003. Militants libéraux et démocrates ont été rejetés dans une opposition dite « hors système ». L'émergence de mouvements critiques, comme celui d'Alexei Navalny, a d'abord ...

...  
été tolérée avant d'être démantelée, à l'image de sa Fondation de lutte contre la corruption, qualifiée d'extrémiste et interdite à ce titre.

### Quand l'emprise du pouvoir central s'est-elle renforcée ?

**F. D.** À partir de 2011, suite aux manifestations contre la fraude électorale et le retour de Poutine à la présidence après le tour de passe-passe avec Dmitri Medvedev (*président et Premier ministre, ils avaient permuté de fonction pendant une législature pour contourner la règle des deux mandats présidentiels successifs maximum, Ndlr*). Un arsenal législatif répressif a été mis en place à l'encontre des forces critiques dans la société (associations, journalistes, militants, activistes). L'administration russe s'est refermée, au point qu'il est devenu impossible pour les chercheurs d'y mener des enquêtes.

### Poutine a-t-il décidé seul de l'agression de l'Ukraine ?

**F. D.** Nous manquons de sources pour l'affirmer. Les rares témoignages qu'a pu recueillir le média indépendant *Agentstvo* auprès de hauts fonctionnaires de l'appareil d'État donnent cependant quelques indices. Ils racontent, sous couvert d'anonymat, avoir été surpris par l'ampleur de l'agression militaire. Pour la plupart, ils pensaient que la Russie allait reconnaître les républiques autonomes du Donbass mais que cela n'irait pas plus loin.

### Que pourraient provoquer les sanctions économiques ?

**F. D.** Soit une forme d'union sacrée derrière le président Poutine, avec une population se sentant victime d'une agression des Occidentaux. Soit au contraire la montée du mécontentement et d'une pensée critique vis-à-vis du pouvoir. Soit des formes d'adaptation aux difficultés de la vie quotidienne, sans engagement politique. Un peu de ces trois scénarii se développe sans doute en même temps...

### Poutine ne risque-t-il pas d'être lâché par l'élite économique ?

**F. D.** Encore faut-il savoir de quoi est faite cette élite... Dans le développement des grosses fortunes de ces dernières années, il est difficile de faire la part de l'enrichissement « honnête » et celle de la corruption. Or, la corruption – les détournements de l'argent public, les placements off-shore, l'évasion fiscale, etc. – est l'un des autres ressorts de l'exercice autoritaire du pouvoir, dans la mesure où elle rend difficile, sinon impossible, la critique politique. Elle crée des liens de loyauté obligée.

### L'opinion a-t-elle quelque poids dans ce contexte ?

**F. D.** Il y a un effort permanent du régime poutinien pour encadrer l'opinion et construire le soutien de la population à ses dirigeants. On a pourtant vu se lever des voix critiques, des tentatives de manifestations dans la rue, particulièrement courageuses. Il y a aussi des pétitions en ligne contre le conflit. L'une d'elles a réuni un million de signatures, c'est considérable. Mais la coercition frappe très durement la liberté d'expression, presque tous les médias indépendants sont désormais interdits (*utiliser les*

*mots « guerre » ou « invasion » pour parler du conflit pourrait valoir aux journalistes jusqu'à quinze ans de prison, Ndlr*).

### Quelle est la rhétorique du Kremlin ?

**F. D.** Il y a un vocabulaire emprunté à tort et à travers à la Grande guerre patriotique, désignation russe de la Seconde Guerre mondiale. Il assimile Ukrainiens et gouvernement ukrainien à des nazis, instrumentalisant ces heures sombres. Dans les médias officiels, la révolution de Maïdan en 2014 avait déjà été présentée ainsi pour discréditer les nouvelles autorités ukrainiennes souhaitant se rapprocher des institutions européennes. Le pouvoir russe se pose aussi en défenseur des opprimés en Ukraine et dans les républiques autoproclamées du Donbass. En endossant l'habit humanitaire, il assure que l'armée russe est là pour sauver les femmes et les enfants prétendument martyrisés par l'armée ukrainienne.

### À quoi mène ce conflit sur le plan politique russe ?

**F. D.** Le pouvoir russe peut encore se durcir et imposer des contraintes plus sévères sur sa population. Mais un échec militaire en Ukraine pourrait aussi provoquer la remise en cause des équilibres politiques à Moscou, permettant d'envisager un renouvellement du pouvoir... II



À lire :

*L'Âge soviétique. Une traversée de l'empire russe au monde postsoviétique.*

A. Blum, F. Daucé, M. Elie, I. Ohayon, Ed. Armand Colin, oct. 2021., 432 p.

## La recherche solidaire

Face à la guerre en Ukraine, le Programme national d'accueil en urgence des scientifiques et des artistes en exil (PAUSE), créé en janvier 2017 et piloté par le Collège de France, a lancé un fond d'urgence exceptionnel d'aide permettant l'accueil pendant trois mois de scientifiques ukrainiens et ukrainiennes dans un établissement d'enseignement supérieur ou un organisme de recherche français, sans critère d'excellence scientifique. « *L'idée est de créer un sas afin de permettre à ces scientifiques de trouver un refuge et de pouvoir reprendre une activité professionnelle le temps de voir comment la situation évolue et de préparer, éventuellement, une candidature à un prochain appel régulier du programme* », précise Laura Lohéac, directrice exécutive du programme. Fin avril, l'appel avait reçu environ 200 candidatures éligibles, majoritairement de chercheuses. « *Ce financement indexé sur la composition familiale permettra de soutenir indirectement entre 500 et 800 personnes. C'est une belle action mais nous aimerions pouvoir aider davantage* », reconnaît Laura Lohéac. Mobilisé depuis le début de la crise, le CNRS a condamné le 2 mars avec la plus grande fermeté l'invasion de l'Ukraine par la Russie. Son président-directeur général, Antoine Petit, rappelle que « *le CNRS a respecté les consignes gouvernementales et suspendu toutes nouvelles formes de collaborations scientifiques avec la Russie. Toutefois les projets de recherche déjà engagés doivent pouvoir se poursuivre et nous y veillerons avec tous nos partenaires académiques* ».

# EN ACTION



*Explorer les tréfonds de la matière ou de la Voie lactée, mettre au point un poumon artificiel, et partager la science avec le plus grand nombre.*



# Une nouvelle ère dans l'exploration de la matière

MATIÈRE

**PHYSIQUE** Grâce à une nouvelle utilisation du rayonnement synchrotron, on peut désormais plonger au cœur de la matière et l'observer en temps réel. De quoi relever plusieurs défis essentiels.

PAR KHEIRA BETTAYEB

**R**epousser les frontières de la connaissance en biologie, chimie, physique, sciences des matériaux, archéologie ou encore en sciences de la Terre, et répondre à des problématiques mondiales majeures touchant la santé, le stockage d'énergie ou l'environnement : voilà ce que laisse entrevoir l'utilisation du rayonnement synchrotron pour réaliser des analyses dites *operando*, une méthode qui ouvre une nouvelle ère dans l'exploration de la matière et des métaux complexes.

Véritables bijoux de technologie, utilisés depuis la fin des années 1970 et améliorés sans cesse, les synchrotrons sont d'énormes infrastructures qui accélèrent à haute énergie des électrons dans un anneau de stockage d'une circonférence pouvant mesurer plusieurs centaines de mètres. Atteignant une vitesse proche de celle de la lumière (près de 300 000 kilomètres par seconde), les électrons émettent alors un puissant rayonnement électromagnétique situé entre l'infrarouge (longueurs d'onde comprises entre 700 et 100 000 nanomètres – nm, soit un milliardième de millimètre) et les rayons X (de 0,01 à 1 nm).

 Lire l'intégralité de l'article sur [lejournale.cnrs.fr](http://lejournale.cnrs.fr)



© WUEDICIONG / ESRF

Ce rayonnement synchrotron est ensuite dirigé vers les lignes de lumière : des laboratoires d'analyse disposés en périphérie de l'anneau de stockage et dotés d'appareils exploitant ce rayonnement (cristallographie aux rayons X, spectroscopie, imagerie...).

### Un rayonnement d'une luminosité exceptionnelle...

À ce jour, il existe quelque cinquante synchrotrons dans le monde. La France en abrite à elle seule deux majeurs : l'Installation européenne de rayonnement synchrotron, ou ESRF (pour *European Synchrotron Radiation Facility*), à Grenoble, cofinancée par 22 pays, dont la France (à hauteur de 27,5 %) ; et le synchrotron SOLEIL<sup>1</sup> de Saint-Aubin (91), cofinancé par le CNRS pour 72 % et le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) pour 28 %. « Fondé en 1988 et doté d'un anneau de stockage de 844 mètres de circonférence, l'ESRF est devenu le synchrotron de quatrième génération le plus

brillant au monde depuis sa modernisation, achevée en 2020. Doté d'un anneau de stockage de 354 m de circonférence, SOLEIL est quant à lui un synchrotron de troisième génération datant de la fin 2006. Sa modernisation est en cours d'étude », précise Sylvain Ravy, directeur adjoint scientifique aux infrastructures de recherche de l'Institut de physique du CNRS. Ces deux sources sont complémentaires, SOLEIL produisant des rayonnements de plus basse énergie, infrarouges (IR), ultraviolets (UV) et rayons X « mous ».

L'atout de ces super machines ? Le rayonnement qu'elles produisent est mille milliards de fois plus intense que celui issu d'un tube à rayons X classique ! Or cette exceptionnelle luminosité permet de voir à travers la matière la plus opaque et de la disséquer à la manière d'un scalpel, ceci à l'échelle du nanomètre, celle des atomes. Ainsi, on peut étudier l'agencement des atomes du principe actif d'un médicament, détecter des doses de polluants indétectables autrement ou cartographier, cellule par cellule, un organe tel que le poumon ou le cœur. En novembre 2021, à l'aide des rayons X produits par l'ESRF, des chercheurs britanniques ont par exemple réussi à capturer les dommages induits par le Covid-19 aux plus petits vaisseaux sanguins des poumons<sup>2</sup>.

### ... pour disséquer la matière en train de fonctionner

Les récentes améliorations techniques des synchrotrons ont permis d'obtenir un rayonnement encore plus lumineux. Depuis sa mise à niveau, l'ESRF est ainsi capable de générer des faisceaux de rayons X cent fois plus brillants ; d'où son nouveau nom : « ESRF-EBS », EBS signifiant « source extrêmement brillante » (*Extremely Brilliant Source*). Cette luminosité accrue offre deux grands avantages : elle permet d'effectuer plus de mesures en moins de temps et de « zoomer » à plus petite échelle sur l'échantillon analysé. Ceci facilite l'observation en temps réel du comportement des matériaux nanométriques. C'est ce qu'on appelle l'approche *operando* (« en fonctionnement », en latin). Réalisée également à l'aide d'autres instruments, comme le microscope électronique en transmission, cette approche voit ses possibilités démultipliées grâce au rayonnement synchrotron. Et pour cause : « cette lumière permet de se focaliser sur des endroits très précis de l'échantillon et est utilisable dans toutes sortes d'environnements permettant l'operando : sous atmosphère contrôlée, sous très hautes pressions et/ou températures, etc. », précise Sylvain Ravy.

Résultat : les demandes d'accès aux synchrotrons pour réaliser des études *operando* ont littéralement explosé. « Par exemple, au synchrotron SOLEIL, le nombre de mesures operando en absorption des rayons X a été multiplié par 3,5 lors des cinq dernières années », chiffre Jean Daillant, directeur du synchrotron SOLEIL. Et de préciser : « c'est même là l'évolution la plus marquante de cette dernière décennie dans le domaine des synchrotrons ».

► Le synchrotron européen ESRF est situé sur la presqu'île de Grenoble entre l'Isère et son affluent, le Drac.

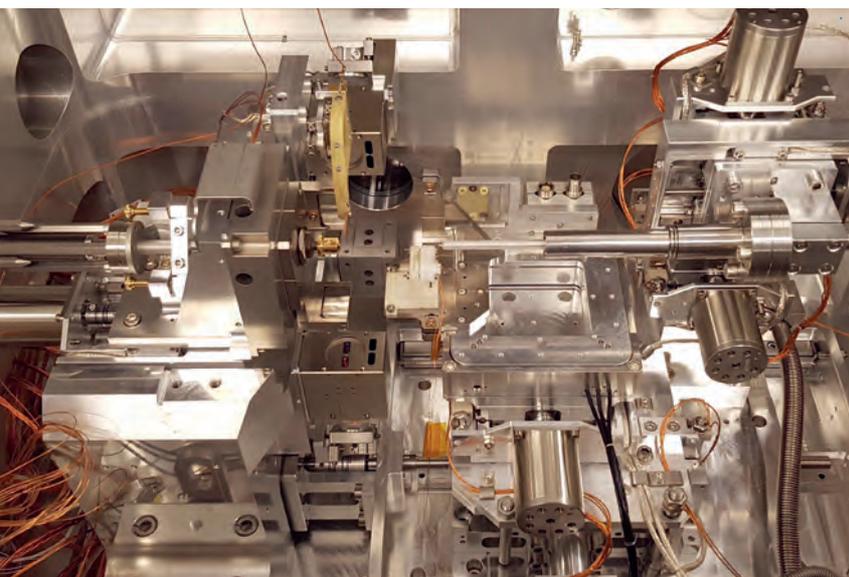
1. Acronyme de Source optimisée de lumière d'énergie intermédiaire du Lure. Lure étant lui-même l'acronyme de Laboratoire d'utilisation du rayonnement électromagnétique, le laboratoire pionnier dans l'utilisation du rayonnement synchrotron en France. 2. C. L. Walsh et al., *Nat Methods*, déc. 2021. doi: 10.1038/s41592-021-01317-x. 3. Unité CNRS/Univ. de Montpellier/ENSCM.

L'analyse *operando* utilisant la lumière synchrotron est désormais utilisée dans plusieurs domaines de recherche. Elle est devenue un précieux outil pour suivre le fonctionnement des batteries au lithium. « *Un des principaux buts de la recherche est ici d'accroître les performances de stockage d'énergie de ces systèmes, afin par exemple d'utiliser un téléphone portable sans le recharger avant trois jours, ou de faire d'une traite le tour de France avec un véhicule électrique* », éclaire Jean-Pascal Rueff, responsable de la ligne de lumière Galaxies au synchrotron SOLEIL.

### Des limites bientôt dépassées ?

Pour progresser, « *il est indispensable de mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement et de défaillance pouvant survenir aux interfaces de ce type de batteries, par exemple entre les électrodes et l'électrolyte* », explique Lorenzo Stievano, de l'Institut Charles Gerhardt Montpellier<sup>3</sup>. De nombreuses méthodes physicochimiques classiques ont été utilisées dans le passé pour étudier ces mécanismes. Mais souvent sur des batteries à l'arrêt (in situ), ou après extraction des matériaux à étudier du dispositif (ex situ). Or, « *il est indispensable d'adopter non seulement une approche in ou ex situ, qui présentent l'avantage d'étudier le système réel, tel qu'il est envisagé dans l'application finale ; mais aussi une approche operando, pour accéder à des informations en temps réel, lors du fonctionnement de la batterie – même si en contrepartie le système doit être transformé pour s'adapter aux contraintes expérimentales* », souligne Rémi Dedryvère, chercheur à l'Institut des sciences analytiques et de physico-chimie pour l'environnement et les matériaux<sup>4</sup>.

▲ **Chambre de mesure de la station STXM (Scanning Transmission X-Ray Microscopy) de la ligne de lumière Hermès du synchrotron SOLEIL.**



© DANIEL LACOUR, CNRS ILL SPIN TEAM

L'utilisation du rayonnement synchrotron pour des analyses *operando* pourrait également changer la donne dans un autre domaine high-tech : celui de la spintronique, une branche de l'électronique qui exploite le « spin » de l'électron (une propriété magnétique/quantique), afin de stocker et de véhiculer des informations, voire de récupérer de l'énergie. « *Susceptible d'aider à dépasser certaines limites de l'électronique classique en termes de densité d'informations stockées, de rapidité et d'énergie utilisée, la spintronique a fait son entrée dans le monde industriel grâce à la jonction tunnel magnétique, un nanodispositif formé de deux électrodes ferromagnétiques séparées par un isolant ultramince (moins de 10 plans atomiques)* », développe Martin Bowen de l'Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg<sup>5</sup>.

Problème : si de tels nanodispositifs sont déjà utilisés dans les têtes de lecture des disques durs et les mémoires magnétiques à accès aléatoire (STT-MRAM) des ordinateurs de nouvelle génération, leur fonctionnement intime reste encore mal compris. « *Les défauts structuraux présents dans l'isolant concentrent le transport électrique selon un nanocanal reliant les deux électrodes. L'approche operando utilisant la lumière synchrotron permet de révéler les propriétés de ce canal tout en ignorant les autres atomes, afin d'élucider comment fonctionne le nanodispositif* », détaille Martin Bowen. Étayer les connaissances dans ce domaine sera crucial pour tenter de façonner le nanocanal afin non seulement de développer de nouvelles mémoires, mais aussi de transformer la chaleur en énergie. « *À l'avenir, l'idéal serait que tout industriel examine le fonctionnement intime de son dispositif grâce à l'efficacité d'une approche synchrotron operando* », raisonne le chercheur.

### Vers la valorisation du méthane dans l'air

À Grenoble, les géochimistes Jean-Louis Hazemann, Antonio Aguilar et leurs collègues de l'Institut Néel (CNRS), utilisent la lumière synchrotron en mode *operando* dans un tout autre domaine de recherche appliquée : l'étude des processus catalytiques qui facilitent la « déshydroaromatation » du méthane (CH<sub>4</sub>).

Cette réaction permet de valoriser ce gaz à effet de serre en le transformant en composés aromatiques<sup>6</sup> produits habituellement à partir de pétrole. Parmi ces composés à haut intérêt industriel : le benzène (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), utilisé pour la synthèse de nombreux composés organiques (matières plastiques, solvants, parfums, etc.). L'objectif ici est de « *développer de nouveaux catalyseurs plus performants permettant de faire de la déshydroaromatation du méthane à grande échelle* », explique Jean-Louis Hazemann. Lors de récents travaux menés en collaboration avec des chercheurs néerlandais et saoudiens au synchrotron ESRF<sup>7</sup>, le scientifique et ses collègues ont analysé les produits se formant quand cette réaction est facilitée par un catalyseur prometteur : le

4. Unité CNRS/UPPA. 5. Unité CNRS/Univ. de Strasbourg. 6. Molécules présentant un ou plusieurs cycles, une structure où les atomes sont arrangés de façon à former une structure cyclique plane. 7. I. Vollmer *et al.*, *Chem. Sci.*, avril 2018. doi: 10.1039/C8SC01263F 8. Unité Inserm/Aix-Marseille Université / Service de santé des Armées. 9. J. Vergalli *et al.*, *Nat. Protoc.*, Juin 2018. doi: 10.1038/nprot.2018.036.

« Mo/HZSM-5 » (à base notamment du métal Molybdène – Mo). Au final, ils ont découvert que le site actif de ce dernier acquiert trois structures différentes. Forts de ce premier résultat, les chercheurs ont prévu de lancer de nouvelles expériences en juin 2022. Avec un espoir : modifier la composition du catalyseur et les structures successives de son site actif, ceci afin d'accroître son efficacité.

### L'antibiorésistance dans le viseur

Côté recherche médicale, le rayonnement synchrotron utilisé en mode *operando* pourrait – entre autres – accélérer la recherche de nouveaux traitements antibiotiques et lutter contre l'apparition de souches bactériennes résistantes à ces médicaments. Posent notamment problème les bactéries de type « Gram négatif », qui ont pour particularité d'être entourées d'une enveloppe dotée de deux membranes successives et de complexes moléculaires qui expulsent les antibiotiques à l'extérieur via des « pompes d'efflux ». Deux caractéristiques qui contribuent à empêcher l'accumulation de ces médicaments dans ces bactéries, facilitant ainsi l'antibiorésistance.

Afin de développer de nouveaux traitements efficaces, « *il est absolument nécessaire de mesurer, en temps réel, la cinétique (vitesse, Ndlr) d'entrée de l'antibiotique étudié dans ces bactéries, et de déterminer de façon précise la concentration interne capable d'inhiber la croissance de ces micro-organismes* », souligne Jean-Marie Pagès, au laboratoire Membranes et cibles thérapeutiques <sup>8</sup> à Marseille. Récemment, son groupe a décrit trois nouvelles approches « non invasives et non perturbantes pour les bactéries », basées sur l'utilisation du rayonnement UV de la ligne Disco délivré par le synchrotron SOLEIL <sup>9</sup>, qui permettent de quantifier les médicaments accumulés à l'intérieur de ces cellules. « *Comme la ligne de lumière Disco rend possible l'étude de bactéries non congelées et vivantes, ces trois techniques permettent de suivre en temps réel tout le processus d'entrée et de diffusion des antibiotiques dans une seule bactérie* », précise Jean-Marie Pagès. Désormais, le biologiste et son équipe tentent de mieux comprendre comment les antibiotiques pénètrent l'enveloppe et leur sensibilité aux pompes d'efflux des bactéries résistantes. Leur espoir : trouver un moyen de limiter la protection conférée par les membranes des bactéries à Gram négatif devenues résistantes aux antibiotiques.

Grâce aux mesures *operando*, le rayonnement synchrotron a déjà commencé à révolutionner plusieurs domaines de recherche. À l'avenir, cette révolution devrait s'accélérer avec le développement de nouvelles sources synchrotron extrêmement brillantes. « *La mise à niveau du synchrotron SOLEIL sera indispensable pour rester compétitif* », insiste Jean Daillant. Un tel « upgrade » élargirait l'accès – limité à ce jour – à des mesures synchrotron *operando* encore plus rapides et précises, en particulier dans le domaine IR, UV et rayons X de basse énergie, qui ne sont pas disponibles à l'ESRF. Cette évolution sera indispensable pour qu'un plus grand nombre d'équipes de recherche puissent bénéficier de cette avancée et contribuer ainsi, à l'accélération de la recherche. **II**

## En bref

### SIGNATURE AVEC LA RÉGION SUD

Le 17 mai, Renaud Muselier, président de la Région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur, et Antoine Petit, président-directeur général du CNRS, ont signé un protocole de coopération. D'une durée de 3 ans, ce protocole viendra soutenir et renforcer les capacités en recherche, formation et innovation sur le territoire de la région.

### LES INNOVATIVES SHS

Les 18 et 19 mai, le Campus Condorcet à Aubervilliers a accueilli la 5<sup>e</sup> édition des Innovatives SHS, salon de valorisation en sciences humaines et sociales du CNRS. Les visiteurs ont pu découvrir une quarantaine de projets innovants autour de l'intelligence artificielle allant de technologies dédiées au patrimoine à un camion équipé pour documenter le langage parlé, en passant par l'appareil connecté.

[À voir sur lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)

### DES BUREAUX AU CANADA ET EN AUSTRALIE

Le CNRS a récemment ouvert ses 9<sup>e</sup> et 10<sup>e</sup> bureaux à l'étranger. La première inauguration a eu lieu le 14 février, à Ottawa, au Canada. Ce bureau, dirigé par Jan Matas, a pour mission de mieux coordonner et renforcer les activités de recherche partenariale sur l'ensemble du pays, avec lequel le CNRS compte notamment quatre International Research Laboratories (IRL) et 4 International Research Projects (IRP). Quelques semaines plus tard, l'organisme a ouvert un bureau à Melbourne, en Australie. Dirigé par Jean-Paul Toutain, il s'inscrit dans une zone de multiples collaborations scientifiques (dont 1 IRL et 12 IRP) et porteuse de thématiques fortes telles que le pôle, le corail ou encore la radioastronomie.

### DEUX NOUVEAUX LABORATOIRES COMMUNS

Début mai, le CNRS a lancé deux nouveaux laboratoires communs avec des partenaires industriels : 3ALP, dédié à l'aluminium et créé avec l'université Grenoble-Alpes et Constellium, groupe leader de produits aluminium ; et iHub Poly-9, centré sur les batteries lithium-ion ou lithium-soufre, et inauguré avec Arkema, l'université Claude Bernard Lyon 1 et CPE Lyon.



© COOPERR/STOCKADOBÉ.COM

# Ne plus payer pour être publié !



© E. PLASONS PHOTOGRAPHE

**RECHERCHE** Dans le cadre de sa politique de science ouverte, le CNRS encourage ses chercheurs et chercheuses à publier et diffuser leurs articles sans frais supplémentaires pour les auteurs et les lecteurs. Détails avec Alain Schuhl, directeur général délégué à la science.

PROPOS RECUEILLIS PAR SOPHIE FÉLIX

## Le libre accès exigé par la politique de science ouverte du CNRS peut-il engendrer des frais pour les laboratoires ?

**Alain Schuhl.** Certaines revues proposent de payer des frais de publication (ou APC pour *Article Processing Charges*) pour mettre un article en accès libre dans une revue dite « hybride », c'est-à-dire déjà financée par les abonnements (système auteur-payeur). Même si un contrat de recherche, par exemple issu de l'Agence nationale de la

recherche (ANR) ou de l'Europe, permet parfois d'utiliser le financement pour payer des APC, le CNRS demande instamment à ses chercheurs et à ses chercheuses de ne surtout pas payer pour publier un article dans une de ces revues. Ce serait payer deux fois. La solution recommandée et gratuite pour l'auteur est de déposer son manuscrit dans les archives ouvertes. Il est donc possible de publier en accès ouvert gratuitement dans les revues hybrides.

## En quoi le système auteur-payeur n'est-il pas vertueux ?

**A. S.** Que la revue soit hybride ou en accès ouvert intégral (*full open access*), ce système a de nombreux défauts. D'abord, il remplace l'inégalité de l'accès aux résultats par l'inégalité dans la capacité à publier. Il peut aussi suggérer que payer suffirait pour être publié, ce qui potentiellement contribue à décrédibiliser la recherche. Et pour celles et ceux qui disposent des moyens, il favorise la publication inutile. D'autre part, il nourrit le développement d'une édition scientifique dite « prédatrice » multipliant les revues douteuses, voire frauduleuses, et jette le discrédit sur la production scientifique en général. Enfin, il participe à l'inflation des coûts : les montants d'APC décorrés du coût du service rendu par l'éditeur ne cessent d'augmenter, année après année, chez la plupart des éditeurs, en particulier ceux qui sont réputés « prestigieux » et ceux qui ont pour objectif principal de faire des profits. En conclusion, il n'y a pas de raison de payer des APC, que l'on pourrait aussi nommer « article prestige charges », pour être publié.

1. <https://hal.archives-ouvertes.fr> 2. Association créée en 2011 qui rassemble les principales organisations de recherche et de financement de la recherche. Elle compte 38 membres issus de 29 pays européens. 3. Consortium européen d'agences et d'organisations de financement de la recherche, qui vise à accélérer la transition vers un accès libre et immédiat aux résultats de la recherche scientifique.

“100% des articles du CNRS en accès ouvert [...] pour les scientifiques, c'est possible !”

### Qu'en est-il des articles déposés dans des revues sous abonnement (système du lecteur-payeur)

**A. S.** Le CNRS demande à celles et ceux qui publient dans une revue sous abonnement de déposer, dès sa parution, le manuscrit auteur accepté (MAA) dans l'archive ouverte HAL<sup>1</sup>, ce que de nombreuses revues permettent. Si la revue ne l'autorise pas, il est possible d'utiliser les leviers fournis par la loi pour une République numérique, qui permet de déposer le MAA sur une archive ouverte avec un éventuel embargo ne dépassant pas six mois en sciences, techniques et médecine (STM), ou douze mois en sciences humaines et sociales. HAL permet une telle option d'embargo et l'accès devient automatique une fois la durée de l'embargo écoulée.

Un guide sur l'application de la stratégie de non-cession des droits (*Rights Retention Strategy*), recommandée par le CNRS, sera mis en ligne prochainement par le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. Elle permet de publier le MAA sans embargo sur une archive ouverte, ce

qui sera d'ailleurs obligatoire pour les projets financés par l'ANR ou Horizon Europe. Le CNRS recommande l'application de cette stratégie.

### Quel modèle le CNRS conseille-t-il à ses chercheurs et chercheuses ?

**A. S.** Il est possible de publier dans une des nombreuses revues en accès ouvert qui n'exigent pas de frais de publication. Ce modèle dit « diamant », financé par des subventions académiques, permet aux chercheurs et chercheuses de diffuser leurs travaux en accès ouvert sans payer de frais de publication et d'y lire les articles gratuitement. L'ANR, Science Europe<sup>2</sup>, l'infrastructure de recherche Operas et la « cOAlition S<sup>3</sup> » ont d'ailleurs publié le 2 mars 2022 le plan d'action d'accès ouvert « diamant » annoncé lors des Journées européennes de la science ouverte (Osec). Le CNRS recommande cette voie depuis longtemps, afin de diversifier les voies de publications en accès ouvert, et est l'un des premiers signataires de ce plan. 100 % des articles du CNRS en accès ouvert sans frais supplémentaires pour les scientifiques, c'est possible ! **||**

## L'évaluation s'adapte aussi

La réforme de l'évaluation des chercheurs et chercheuses s'attache à donner plus d'importance à la qualité de la recherche qu'à la quantité de publications ou au type ou nom de la revue où sont publiés les résultats. Elle propose aussi de valoriser les multiples aspects du travail des scientifiques : publications mais aussi logiciels, données, actions de médiation scientifique, activités collectives, enseignement, ou envers l'accès ouvert. Lors des évaluations, il n'est ainsi plus demandé la liste exhaustive des productions scientifiques et les sections du Comité national ont adopté des principes d'évaluation conformes à la science ouverte. Avec l'Appel de Paris<sup>1</sup>, la France invite les institutions à rejoindre une coalition d'acteurs de la recherche européenne qui s'engagent à mettre en œuvre ces transformations dans leurs pratiques d'évaluation.

1. <https://osec2022.eu/fr/appel-de-paris/>

## En bref

### ACCORD-CADRE AVEC INRIA

Le 10 mars, le CNRS et Inria ont officialisé un accord-cadre renforçant la synergie des actions menées dans le cadre de leurs politiques de site. Les objectifs stratégiques définis par cet accord sont de mener des recherches communes dans les domaines impliquant les sciences du numérique, de renforcer l'impact économique, le rayonnement et l'attractivité au niveau mondial de la recherche française ainsi que son apport aux politiques publiques, de renforcer la présence française au sein de l'Espace européen de recherche et d'innovation et de contribuer au développement de la science ouverte.

### UN DEUXIÈME IRC À L'ÉTRANGER POUR LE CNRS

Le 8 avril, un International Research Center (IRC) a été créé par le CNRS et l'Imperial College London. Ce nouveau pôle scientifique permettra de développer des collaborations interdisciplinaires dans les sciences mathématiques, l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA), les sciences des données et les systèmes d'ingénierie.

En ligne : l'entretien avec Alice Gast, présidente d'Imperial College London, sur CNRS Info :

<https://bit.ly/38wPJsB>

### LE CNRS DANS L'ÉLITE DE L'INNOVATION

Le 3 mars dernier, Clarivate Analytics a publié l'édition 2022 du « Top 100 Global Innovators » basé sur une analyse des inventions brevetées. Après deux années d'absence, le CNRS fait son retour dans le classement et apparaît aux côtés de sept représentants français : le CEA, Airbus, Alstom, Michelin, Safran, Thales et Valeo.

### UNE STRATÉGIE POUR LES PÔLES

Le 5 avril, Olivier Poivre d'Arvor, ambassadeur chargé des pôles et des affaires maritimes, a présenté la première stratégie polaire française, marquant un engagement ambitieux à l'horizon 2030. Le CNRS, acteur de premier plan dans la recherche sur les pôles, s'est félicité de cette stratégie qui soutient le besoin de moyens renforcés pour la science, afin que la France reste pionnière en termes de recherche dans et sur les mondes polaires.

# La Voie lactée dévoile son trou noir

© EHT COLLABORATION

UNIVERS

**ASTRONOMIE** On devinait sa présence au centre de notre Voie lactée et on supposait qu'il n'avait pas de cheveux : grâce à la collaboration EHT, on dispose enfin de la photo de Sagittarius A\*, le trou noir géant de notre galaxie.

PAR YAROSLAV PIGENET

Jusqu'à présent, on ne connaissait qu'indirectement la présence de Sagittarius A\* (Sgr A\*), que ce soit à partir de quelques émissions radio ou en observant les trajectoires des étoiles orbitant à grande vitesse autour d'une masse gigantesque, mais invisible. Grâce à la collaboration Event Horizon Telescope (EHT) et son réseau de télescopes terrestres, on connaît désormais le « visage » de ce trou noir géant tapi au centre de notre Voie lactée. Après celle obtenue par l'EHT en 2019 du trou noir central de la galaxie M87, c'est donc la seconde image directe de ce type d'astre dont on dispose à ce jour.

« Nous pouvons maintenant étudier les différences entre ces deux trous noirs supermassifs afin d'obtenir de nouveaux indices précieux sur le fonctionnement de cet important processus », a déclaré Keiichi Asada, scientifique de l'EHT, de

► **Première image du trou noir géant Sagittarius A\*, produite en faisant la moyenne de milliers d'images créées par la collaboration EHT à l'aide de différentes méthodes de calcul...**

L'Institut d'astronomie et d'astrophysique de l'Academia Sinica, à Taipei. Visible grâce au disque d'accrétion brillant qui orbite autour de ses 4,3 millions de masses solaires à une vitesse proche de celle de la lumière, Sgr A\* a un diamètre équivalent à 30 fois celui du Soleil. Mais comme il est situé à 27 000 années-lumière de la Terre, sa taille apparente est celle d'une orange qu'on verrait sur la Lune. Ainsi, pour obtenir cette image, il aura fallu combiner les données recueillies nuit après nuit par les huit télescopes disséminés sur notre planète, puis affiner ensuite les images « brutes » ainsi obtenues en s'appuyant sur les modélisations numériques de trou noir à la disposition des chercheurs. Les résultats de l'équipe de l'EHT ont été publiés le 12 mai dans un numéro spécial de la revue *The Astrophysical Journal Letters*.

### Un radiotélescope de 10 000 km de diamètre

Le projet international EHT, lancé en 2016 par Sheperd Doeleman et Heino Falcke, respectivement astronome au MIT (États-Unis) et professeur à l'université de Radboud (Pays-Bas), est financé pour sa partie européenne via une bourse du Conseil européen de la recherche d'un montant de 14 millions d'euros. Exploitant la technique d'interférométrie VLBI (*Very Long Base Interferometry*) sur la longueur d'onde de 1,3 mm (un rayonnement capable de « traverser » les nuages de poussières présents sur la ligne de visée), l'EHT synchronise avec une précision d'une fraction de milliardième de seconde les instruments de huit – bientôt dix – observatoires répartis sur la surface du globe, produisant des clichés d'une résolution équivalente à celle qu'aurait un unique radiotélescope de 10 000 km de diamètre !

Même 2 000 fois moins éloigné de nous que ne l'est M87\* (situé à 50 millions d'années-lumière), Sgr A\* s'est avéré bien plus difficile à visualiser. Et pour cause : si le gaz à proximité des trous noirs se déplace à la même vitesse (proche de celle de la lumière), il met des jours à compléter une révolution autour de M87\* – 1 500 fois plus massif que Sgr A\* et donc bien plus grand –, tandis qu'il le fait en quelques minutes autour de Sgr A\*. « Ces changements rapides de luminosité et de configuration autour de Sgr A\* génèrent un jeu de données bien plus complexe que celui de M87\*, nous avons donc dû développer de nouveaux outils numériques de simulation et d'analyse du mouvement des gaz pour générer une image nette, précise Frédéric Gueth, chercheur CNRS et directeur adjoint de

► ... Toutes les images utilisées peuvent être regroupées sur la base de caractéristiques similaires. Les graphiques à barres montrent le nombre relatif d'images appartenant à chacun des quatre groupes.

l'Institut de radioastronomie millimétrique (Iram). *Ce qui explique qu'il nous a fallu trois ans de plus pour visualiser Sgr A\**. » Cinq ans de calculs intensifs sur les données recueillies en 2017 auront de fait été nécessaires aux 300 chercheurs pour obtenir l'image publiée aujourd'hui.

### Pas de cheveux mais des gaz autour des trous noirs

Cette seconde image confirme ce à quoi les théoriciens s'attendaient : malgré leur grande disparité de masse et le fait qu'ils se situent dans des galaxies de types différents, les deux trous noirs ont un aspect très similaire, à leur taille près. Et pour cause, à l'instar des particules élémentaires, on peut les décrire complètement à partir de trois valeurs : masse, vitesse de rotation et charge électrique. Une simplicité – et une uniformité – que le physicien Archibald Wheeler avait résumé par la formule « les trous noirs n'ont pas de cheveux ».

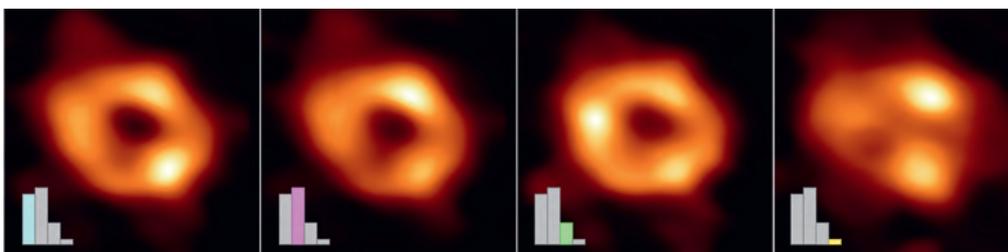
« La relativité générale régit ces objets de près, toute différence que nous voyons plus loin est due à des dissemblances dans la matière qui entoure les trous noirs », explique Sera Markoff, coprésidente du conseil scientifique de l'EHT et professeure d'astrophysique théorique à l'université d'Amsterdam, aux Pays-Bas. Disposant enfin d'images de deux trous noirs de tailles très différentes, les chercheurs vont pouvoir tester des théories et des modèles sur le comportement du gaz autour des supermassifs. Un processus pas encore totalement compris, mais dont on pense qu'il joue un rôle clé dans la formation et l'évolution des galaxies.

### Les yeux de l'Iram

Le CNRS contribue à l'EHT via les deux observatoires de l'Iram : le télescope de 30 mètres situé à 2 850 m d'altitude, sur les pentes du Pico Veleta, dans le sud de l'Espagne, rejoint en 2018 par Noema (Northern Extended Millimeter Array), un radiotélescope dont les 12 antennes de 15 mètres de diamètre viennent d'être déployées sur le plateau de Bure, dans les Alpes françaises. Avec le télescope Alma au Chili, le télescope de 30 mètres de l'Iram a fourni la plus longue ligne de base et, par conséquent, les images les plus nettes, contribuant ainsi de manière décisive à la haute résolution spatiale des images de Sgr A\*.

Les progrès de l'EHT vont se poursuivre : une grande campagne d'observation en mars 2022 a inclus plus de télescopes que jamais auparavant. C'est notamment le cas du deuxième observatoire de l'Iram, Noema, qui a effectué ses premières observations en 2021. La poursuite du développement de technologies de réception de pointe, pour Noema et le télescope de 30 mètres de l'Iram, permettra à la collaboration EHT de faire des timelapses

avec des détails encore plus précis. « Avec Noema, on espère d'ici quelques années pouvoir générer une image toutes les toutes les heures – en obtenir huit plutôt qu'une seule image en intégrant 8 heures d'observation, explique Frédéric Gueth. On pourrait ainsi visualiser les modifications et les mouvements dans le disque d'accrétion, ce qui constitue une information absolument capitale ». ||



# Mathématiques: «la France dispose d'un atout fort d'innovation et de compétitivité»

© CHRISTOPHE HARGOUES/INSTITUT DE LA VISION/CNRS PHOTOTHÈQUE

**RECHERCHE** Congrès international en juillet, Assises françaises des mathématiques de mars à novembre et publication des actes... Le point sur une année riche pour la discipline avec Christophe Besse, directeur de l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (Insmi) du CNRS.

PROPOS RECUEILLIS PAR SOPHIE FÉLIX

**En 2022, l'Insmi organise les Assises des mathématiques, en partenariat avec le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (Mesri). Quels en sont les objectifs ?**

**Christophe Besse.** Ces Assises sont un rendez-vous pour tout le paysage mathématique, afin de réfléchir au futur de la discipline, les mathématiques ayant un impact majeur sur le monde socio-économique. La révolution numérique est maintenant bien

avancée et il est nécessaire de prendre un temps de réflexion sur cette évolution et ses conséquences : le pays est-il suffisamment armé en mathématiques, avec suffisamment d'ingénieurs et techniciens bien formés et une recherche bien organisée, pour en tirer le plein profit ? Peut-on anticiper les besoins futurs en mathématiques ? Avec ces Assises, l'Insmi joue son rôle d'animation de la communauté soudée des mathématiciens et mathématiciennes : nous avons

ainsi sollicité tous nos partenaires, dont les sociétés savantes comme la Société mathématique de France qui vient de fêter ses 150 ans, France Universités, la Conférence des directeurs des écoles françaises d'ingénieurs (CDEFI), les autres organismes de recherche comme le CEA, Inrae ou Inria. Nous proposons notamment à la communauté mathématique plusieurs défis, pour qu'elle puisse faire remonter ses propositions par exemple sur les dix défis du plan France 2030<sup>1</sup> pour « mieux comprendre, mieux vivre, mieux produire en France à l'horizon 2030 ».

**Comment s'organisent ces Assises ?**

**C. B.** Elles se déroulent en trois temps. Une évaluation de l'impact des mathématiques sur le PIB et les emplois en France est en cours de

1. <https://www.gouvernement.fr/actualite/france-2030-un-plan-d-investissement-pour-la-france-de-demain>

► Les Assises des mathématiques aborderont un ensemble de sujets liés à la discipline, à la communauté et à la place des mathématiques dans la société.

rédaction. Elle actualisera un rapport de 2015 qui a révélé que 15 % du PIB français était alors impacté par les mathématiques. Le second temps a été lancé à la mi-mars : sept groupes de travail feront se rencontrer les mathématiciens et mathématiciennes, les autres disciplines de recherche et un ensemble d'acteurs du monde socio-économique pour faire un diagnostic et des propositions sur un ensemble de sujets, en comparant ce qui se fait en France et dans les autres pays où les mathématiques sont développées. Ils aborderont par exemple leur impact sur la société, notamment sur le développement économique de la compétitivité et de l'innovation, mais aussi les carrières, académiques et dans les entreprises de toute taille. Leurs propositions seront discutées lors des journées des Assises organisées du 14 au 16 novembre. Des actes rassembleront l'ensemble de ces discussions et nous espérons qu'ils pourront éclairer les décideurs, à l'image du plan national lancé au Royaume-Uni.

**Pourquoi la France doit-elle soutenir les mathématiques ?**

**C. B.** Avec les mathématiques, la France dispose d'un atout fort d'innovation et de compétitivité. À l'instar d'autres pays, comme le Royaume-Uni, la Corée du Sud ou la Chine, elle doit amplifier son investissement pour ne pas perdre cet atout. De son côté, la communauté de recherche doit trouver les leviers pour augmenter ses forces en préservant la forte cohésion nationale qui fait sa spécificité, dans un cadre qui tend à mettre l'ensemble des acteurs en compétition.

**Quelle sera la place de l'enseignement des mathématiques lors des Assises ?**

**C. B.** Les Assises aborderont la place des mathématiques dans l'enseigne-

ment supérieur, les liens entre le secondaire et le supérieur, ou encore le rôle des chercheurs et enseignants-chercheurs dans la formation continue, du personnel enseignant comme des entreprises. La formation par la recherche, le doctorat et ses débouchés sont aussi un point important qui sera abordé. Nous interrogerons la place des docteurs mais aussi de tous les diplômés de mathématiques dans l'entreprise et l'administration. Aborder un problème difficile, dont on ne sait pas si elle existe, demande des compétences qui ne sont pas que techniques et qu'il faut mettre en avant. Même si la communauté est très impliquée dans les réflexions sur l'enseignement primaire et secondaire, l'organisation de l'enseignement des mathématiques n'est pas du ressort des Assises. En revanche, nous espérons que les personnes qui ont cette charge trouveront intérêt à en étudier les conclusions.

**Un autre événement important de l'année est le Congrès international des mathématiciens (ICM) qui devait avoir lieu à Saint-Pétersbourg du 6 au 14 juillet. Mais la guerre en Ukraine en a bousculé l'organisation...**

**C. B.** L'ICM est le congrès incontournable des mathématiques mondiales. Il est organisé tous les quatre ans, en lien avec l'International Mathematical Union (IMU), et y sont remises notamment les médailles Fields. Nous ne pouvons pas cautionner son organisation à Saint-Pétersbourg et avons déclaré que nous n'y enverrions pas de délégation française. Vu l'importance de la rencontre, il a finalement été décidé de l'organiser de manière virtuelle, aux mêmes dates, ce qui permet notre participation. Seuls deux événements auront lieu en présentiel, à Helsinki : l'Assemblée générale de l'IMU qui s'organise avant chaque ICM et la remise des médailles Fields et des autres prix remis à cette occasion, le 5 juillet. ||

## En bref

### LE CNRS PRÉSENT À VIVATECH

Présent pour la troisième fois au salon Vivatech, du 15 au 18 juin prochains à Paris, le CNRS compte parmi les grands acteurs de la deeptech en France et en Europe. L'organisme présente une dizaine d'entreprises et technologies issues de laboratoires placés sous sa tutelle, en particulier dans les domaines de la santé, du développement durable et du numérique. L'espace CNRS accueillera également des interventions et discussions autour des thèmes prioritaires du plan d'investissement France 2030, comme par exemple les technologies quantiques, la décarbonation de l'industrie, la medtech et la biotech.

### IDYLLE, UNE NOUVELLE VOIE DE VALORISATION

L'entreprise Idylle, avec laquelle le CNRS vient de signer un partenariat public-privé, cherche à mettre à disposition du plus grand nombre de scientifiques les outils de recherche innovants mis au point au sein des laboratoires. Entreprise spécialisée dans les technologies de R&D, pour le moment avec des applications en sciences du vivant, Idylle propose une plateforme complète de conception, production et vente de ces produits. Après deux années de collaborations, le CNRS est entré au capital d'Idylle fin 2021, devenant un associé fondateur à hauteur de 20 %. À lire : <https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/idylle-une-nouvelle-voie-de-valorisation-pour-les-outils-de-recherche>

### DEUX NOUVEAUX PEPR EXPLORATOIRES

Deux nouveaux Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) exploratoires copilotés par le CNRS viennent d'être lancés : le PEPR FairCarboN, doté de 40 millions d'euros sur six ans, qui étudiera les écosystèmes continentaux pour mieux comprendre le cycle du carbone et identifier des leviers et trajectoires pour la neutralité carbone ; et le PEPR OneWater - Eau bien commun, doté d'un budget de 53 millions d'euros sur dix ans. Structuré en six défis scientifiques, il a vocation à mettre les recherches sur les ressources en eau au cœur de la transition durable des territoires.

# Atlantique : sur la piste des fûts radioactifs

MATIÈRE

TERRE

**ENVIRONNEMENT** Entre les années 1950 et les années 1990, 200 000 fûts remplis de déchets radioactifs ont été jetés dans l'Atlantique Nord-Est. Avec quelles conséquences pour les écosystèmes ? C'est ce que des scientifiques vont chercher à savoir.

PAR LAURE CAILLOCE

Les plastiques, métaux lourds, engrais et autres pesticides, ne sont pas les seuls à polluer la grande bleue. Des milliers de tonnes de déchets radioactifs dorment également au plus profond des mers, conséquences de nos activités nucléaires civiles et militaires. « Dès le début s'est posé le problème de la gestion des déchets nucléaires », raconte Patrick Chardon, spécialiste des effets de la radioactivité sur l'environnement au Laboratoire de physique<sup>1</sup> de Clermont-Ferrand. *Les plaines abyssales sont apparues comme un lieu d'évacuation possible. Situées à plusieurs centaines de kilomètres des côtes, et à plus de 4 000 mètres de profondeur, elles étaient loin des humains...* » On sait désormais que les abysses ne sont pas les déserts sans vie que l'on croyait, et la question se pose de l'impact sur les écosystèmes de ces déchets radioactifs. Deux campagnes océanographiques françaises programmées à partir de 2023-2024 devraient permettre de l'évaluer avec précision.

## 36 petabecquerels de déchets immergés

Entre 1946, date à laquelle les États-Unis ont procédé aux premières immersions de déchets radioactifs, et le début des années 1990, des centaines de milliers de fûts ont été jetés au fond des océans. « Pour la zone de l'Atlantique Nord-Est, dans laquelle l'Europe a évacué ses déchets, on parle de plus de 200 000 fûts métalliques de 200 litres, contenant des résidus radioactifs liés à du bitume ou à du béton pour résister au choc de l'impact », détaille Patrick Chardon. Parmi les principaux pays « contributeurs » : la Grande-Bretagne, qui a mené 34 opérations entre 1949 et 1982 et immergé plus de 140 000 fûts, la Belgique avec 55 000 fûts, et enfin la France, dont les deux campagnes de 1967 et 1969 ont vu l'immersion de plus de 46 000 fûts. Rien d'illégal dans ces rejets effectués dans les eaux internationales... Dès la fin des années 1960, cependant, les rejets ont été encadrés par l'Agence internationale pour l'énergie atomique, qui a délimité des zones d'immersion, jusqu'à ce que la Convention de Londres sur la prévention de la pollution des mers (ratifiée en 1975) décide d'un moratoire, puis d'une interdiction totale de cette pratique.

« Aucun déchet à haute activité ou à vie longue n'a été mis à l'eau », précise le physicien. *Il s'agit pour ce que l'on en sait de gants, matériaux de laboratoire, échantillons, assimilables à des déchets classés TFA (très faible activité), FA (faible acti-*

*tivité) ou MA (moyenne activité).* » Pour autant, le cumul de ces immersions est loin d'être négligeable et totaliserait près de 36 petabecquerels, environ 300 fois moins que les rejets de l'accident de Tchernobyl, selon le chercheur. « Ce type de déchets renferme plusieurs sortes de radionucléides, dont le comportement, la toxicité et la durée de vie varient grandement », précise-t-il. Certains ont déjà disparu à l'heure qu'il est, comme le césium 134 ou le fer 55 ; d'autres, comme les isotopes du plutonium (plutonium 238, 239, 240, 241, 242) ont des durées de vie pouvant aller de quelques dizaines d'années à plus de 300 000 ans ; d'autres encore, comme le tritium, sont réputés faiblement toxiques mais se lient facilement à la matière organique et donc au vivant.

« Six fûts ont été retrouvés lors de la campagne scientifique CEA/Ifremer de 1984. »



© IFREMER/ÉPAILLARD (1984). [HTTPS://IMAGE.IFREMER.FR/DATA/00639/65072](https://image.ifremer.fr/data/00639/65072)

1. Unité CNRS/Université de Clermont Auvergne. 2. Unité CNRS/ENS-PSL.



© GREENPEACE / PIERRE GLEIZES

▼ [Largage de fûts par le navire britannique GEM, lors d'une action de Greenpeace en 1981, dans l'Atlantique Nord.](#)

Dans les faits, les scientifiques n'ont aucune idée de la radioactivité résiduelle de ces immersions, ni de la distribution des fûts sur les fonds marins ou de leur état. Malgré l'engagement pris par les pays d'effectuer un suivi scientifique régulier, seules deux campagnes scientifiques ont été organisées dans les années 1980 dans l'Atlantique Nord-Est (dont une conduite par le CEA et l'Ifremer). Et ce, alors que la durée de vie des fûts métalliques avait été estimée entre 20 et 25 ans tout au plus. « À l'époque, six fûts avaient pu être localisés et présentaient un bon état général. Qu'en est-il aujourd'hui ? Nul ne le sait », indique Javier Escartín, géologue marin au Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure<sup>2</sup>, qui pilotera avec Patrick Chardon les campagnes océanographiques.

### Cartographier les fonds et localiser les fûts

Quarante scientifiques, parmi lesquels des océanographes, des écologues mais aussi des radiochimistes, embarqueront pour une durée d'un mois à chaque fois. « Nous nous concentrerons sur deux zones d'une superficie d'environ 6 000 kilomètres carrés situées à la latitude de Nantes, à environ 600 kilomètres des côtes françaises », détaille Javier Escartín. La mission des scientifiques se déroulera en deux temps. La première campagne, prévue pour 2023 ou 2024, effectuera une cartographie fine des fonds marins dans les deux zones concernées, et localisera les fûts qui s'y trouvent. « À ce jour, en effet, nous n'avons aucune information sur les endroits précis où se trouvent les fûts », témoigne le chercheur. Des prélèvements d'eau de mer seront également réalisés à proximité des barils afin d'évaluer la pollution générale de la zone.

La deuxième campagne se concentrera sur les radionucléides présents et leur impact sur les écosystèmes. De nombreuses questions se posent : ces radionucléides sont-

ils sortis des fûts ou pas, et si oui, sous quelle forme, ont-ils diffusé dans la colonne d'eau ? Certains ont pu se fixer aux sédiments présents dans le fond, mais n'en bougeront plus guère, ce qui limite leur dangerosité. La question de leur biodisponibilité est également cruciale : ont-ils une forme chimique qui leur permet d'être assimilés par les êtres vivants ?

Des prélèvements seront aussi réalisés dans les écosystèmes et les sédiments directement à proximité des fûts : micro-organismes, coquillages ou encore poissons des grands fonds, et ce afin d'étudier les effets sur ceux-ci d'une possible radioactivité. « Toutes les précautions seront prises à bord pour éviter la contamination des hommes ou celle des équipements utilisés (robots, notamment), précise Patrick Chardon. L'ensemble des prélèvements sera confiné dans de gros sacs en vinyle et placé dans des contenants en plomb pour éviter toute irradiation. »

Les scientifiques bénéficieront lors de cette mission des dernières technologies de la flotte Ifremer, et notamment d'Ulyx, le dernier-né des robots autonomes sous-marins capable de plonger jusqu'à 6 000 mètres de profondeur. Que se passera-t-il s'ils enregistrent la trace de fuites radioactives dans le fond ? « Au moins nous disposerons d'un état des lieux détaillé, et une éventuelle surveillance pourra être planifiée », indique Javier Escartín. Patrick Chardon veut croire, pour sa part, que « cette connaissance permettra à nos sociétés de faire des choix éclairés sur les sources d'énergie du futur, et la façon dont elles les utiliseront. » ||

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

# Quand les attaques informatiques ciblent le matériel

© SDECORET / STOCKADOBÉ.COM

## NUMÉRIQUE

**INFORMATIQUE** Hackers et chercheurs s'intéressent de plus en plus aux attaques matérielles sur les appareils électroniques. Celles-ci permettent de contourner les protocoles de sécurité, de suivre à la trace les internautes, ou tout simplement de détruire des machines.

PAR MARTIN KOPPE

À l'évocation d'une attaque informatique, on pense surtout à un virus se frayant un chemin dans les méandres de lignes de code. L'idée que ces menaces se résument à des programmes assaillant d'autres programmes est cependant réductrice. Les logiciels, ou softwares, fonctionnent grâce à un ensemble de composants électroniques que l'on désigne comme la partie matérielle, ou hardware. Cela couvre aussi bien une puce dans un capteur qui détecte les mouvements pour allumer la lumière devant un garage, que des dizaines de processeurs à la pointe de la technologie au sein d'un super-calculateur.

On retrouve deux grands cas de figure. Les attaques par canal auxiliaire, d'une part, sont une manière de contourner les protocoles logiciels de sécurité cryptographiques, qui reposent sur des problèmes mathématiques considérés comme trop complexes pour être résolus par qui n'en détient pas la clé. Au lieu de forcer ces algorithmes, l'attaquant va analyser le fonctionnement du matériel, par sa consommation de puissance ou encore son temps de calcul, lors de l'exécution de ces algorithmes pour en déduire leurs secrets. D'autre part, les attaques par fautes consistent à pousser le hardware dans ses retranchements, par exemple en le faisant chauffer au-delà

de ses limites, pour bloquer le système informatique. Dans les deux cas, la finalité vise généralement à récupérer des informations plutôt qu'à détruire un appareil.

### Les objets communicants ciblés

« Ces attaques ont d'abord été imaginées pour le vol de données bancaires sur les puces de nos cartes bleues, détaille Lilian Bossuet, professeur à l'université Jean Monnet de Saint-Étienne et membre du laboratoire Hubert Curien<sup>1</sup>. Ces approches sont à présent appliquées aux téléphones portables, dont les circuits sont mal protégés. La situation est cependant encore pire dans l'Internet des objets, où les appareils sont à la fois omniprésents et très peu, voire pas du tout, sécurisés. »

Qu'elles visent le hardware ou le software, les attaques passent par des failles. Mais si l'on peut parfois palier la faiblesse d'un logiciel avec seulement quelques lignes de code, modifier le matériel cause bien plus de difficultés : les composants d'un ordinateur peuvent rester inchangés pendant de

1. Unité CNRS/Université Jean Monnet. 2. Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CNRS/Centrale Lille Institut/Université de Lille).

nombreuses années ; les remplacer à chaque nouvelle menace aurait un coût astronomique.

La présence d'objets communicants et disposant d'antennes représente une fragilité supplémentaire, certaines attaques pouvant ainsi être réalisées à plusieurs dizaines de mètres de distance. « *Les systèmes sont de plus en plus complexes et connectés, et font face à des chemins d'attaque toujours plus tortueux*, explique Lilian Bossuet. *Le point d'entrée dans le système, généralement la partie la moins sécurisée, n'est pas forcément la cible finale d'une attaque.* » Il prend comme exemple Stuxnet, virus probablement conçu par les services américains et israéliens, qui a réussi à se frayer un chemin jusqu'au programme nucléaire iranien en 2010.

### Faire parler et craquer le hardware

Les attaques de hardware par des programmes passent souvent par le navigateur Internet, qui va exécuter un script dans un langage de programmation comme le JavaScript. Une telle attaque peut se produire simplement en cliquant sur une page web malveillante. « *Dans les attaques par canal auxiliaire matériel contre matériel, la consommation de courant et les champs électromagnétiques donnent des indications sur l'activité du hardware*, poursuit Clémentine Maurice, chargée de recherche au CNRS, au

laboratoire CRISTAL<sup>2</sup>. *On peut repérer quand il effectue des activités de cryptographie et l'attaquer au bon moment pour récupérer des clés de chiffrement.* »

Il existe notamment une attaque par faute, appelée Rowhammer.js, qui accède à toute la mémoire physique d'un ordinateur en provoquant des déplacements de charges électriques. « *La consommation électrique et les émanations photoniques nous renseignent sur l'activité des transistors*, ajoute Lilian Bossuet. *On sait qu'ils consomment le plus de puissance lorsqu'ils changent d'état, c'est-à-dire quand ils manipulent des informations. On peut parfois même lire directement la succession des 0 et des 1 sur un oscilloscope.* » Et si cela ne suffit pas, différentes techniques d'intelligence artificielle décryptent plus finement ces informations.

L'équipe Sesam de Lilian Bossuet a exploité une plateforme de quatre lasers, conçue par la société Alphanov dont le CNRS est membre fondateur, pour cibler des composants. Les chercheurs parviennent ainsi à modifier des bits d'information lors de l'exécution d'un programme, et à changer instructions et valeurs. Les systèmes sont alors extrêmement vulnérables.

### Identifier les utilisateurs

Le matériel présente d'autres faiblesses, et est notamment visé pour le *fingerprinting* (prise d'empreintes). Ce concept consiste à chercher comment

► Les puces de nos cartes bancaires peuvent être des cibles pour le vol de données, en particulier lors du paiement sans contact.

identifier les internautes, suivre leur comportement, le plus souvent sans qu'ils ne le sachent. Les empreintes digitales numériques les plus connues sont les cookies et utilisent souvent les adresses IP. Si ces éléments passent par la partie logicielle, hackers et chercheurs se sont rendu compte qu'on pouvait aussi le faire avec du hardware.

L'équipe Spirals, où travaille Clémentine Maurice, a mis au point avec l'université Ben Gourion du Néguev (Israël) DrawnApart, une technique de fingerprinting basée sur le GPU : le processeur graphique d'un ordinateur. « *Nous parvenons à distinguer deux GPU de même marque, de même modèle et tournant avec le même système d'exploitation, détaille la chercheuse. Avec du fingerprinting logiciel, on repartait de zéro chaque fois que l'utilisateur mettait son navigateur à jour. Là, on peut le traquer tant qu'il garde le même GPU, qu'il ne va probablement pas changer avant plusieurs années.* »

Les chercheurs du laboratoire Hubert Curien s'intéressent eux aussi au fingerprinting du matériel. « *Nous étudions les fonctions physiques non clonables, des "empreintes" microélectroniques qui exploitent d'infimes différences entre les transistors dans des circuits normalement identiques*, précise Lilian Bossuet. *En mesurant ces écarts, on peut tracer le matériel, mais également cibler un circuit plutôt qu'un autre lors d'une attaque.* »

Mais comment se protéger face à toutes ces menaces ? « *Pour des questions de performances, de nombreux processeurs partagent des zones de mémoire cache, où ils peuvent laisser des informations qui deviennent alors vulnérables*, explique Lilian Bossuet. *Il faut réfléchir à de nouvelles architectures qui permettent d'isoler physiquement les informations critiques. Mais renforcer la sécurité a forcément un coût. S'il est accepté pour des applications bancaires ou militaires, il sera plus difficile à tolérer pour des usages conventionnels ou domestiques.* » II





# Le CNRS et Universcience : la science en partage

© E. LAURENT-EPPOCSI



© S. EXPIILL/UNIVERSCIENCE

**RECHERCHE** Un nouvel accord-cadre fait du CNRS le partenaire scientifique de référence d'Universcience pour le projet de rénovation du Palais de la Découverte. Retour sur cette collaboration avec Bruno Maquart, président d'Universcience.

PROPOS RECUEILLIS PAR SOPHIE FÉLIX

**Le CNRS et Universcience viennent de renouveler l'accord-cadre qui les lie. Quelles en sont les grandes lignes ?**

**Bruno Maquart.** Cet accord, conclu pour cinq ans, renouvelle le précédent et s'inscrit dans la longue histoire de nos relations communes. Il couvre l'ensemble de nos activités sur nos deux sites physiques (Palais de la Découverte et Cité des sciences et de l'industrie), et sur notre troisième lieu numérique, lancé il y a trois ans (Le Blob, l'extra-média). Forts de l'excel-

lente collaboration entre nos deux maisons sur de nombreuses expositions comme « Robots » ou « Bio-inspirée », et bientôt « Transitions écologiques », nous avons souhaité proposer au CNRS de devenir le partenaire scientifique de référence de la rénovation de la totalité du Palais de la Découverte, qui rouvrira en 2025 après travaux. Le CNRS contribuera ainsi à la création des nouvelles présentations et assurera la validation scientifique de l'ensemble, le comité d'accompagnement scientifique du

projet étant présidé par son président-directeur général Antoine Petit. Avoir le CNRS comme partenaire est pour nous une chance immense. Par son caractère national et multidisciplinaire, il est une porte d'entrée privilégiée vers la recherche contemporaine et la science en train de se faire.

C'est l'originalité du Palais de la Découverte : permettre un contact vivant avec la science, pour appréhender les questions de recherche traitées aujourd'hui et celles qui le seront demain. Pour être pertinent, il doit donc maintenir des relations constantes et soutenues avec la communauté de recherche. D'ailleurs, dans le cadre de notre nouvel accord-cadre, les chercheurs et chercheuses du CNRS pourront profiter d'une formation en médiation dispensée par les médiatrices et médiateurs du Palais de la Découverte ou par l'École de la médiation<sup>1</sup>, un projet pluri-partenarial que nous coordonnons.

1. Centre de formation continue à la médiation culturelle et scientifique communs aux associations Traces, Les Petits Débrouillards et Planète Sciences, aux universités Versailles Saint-Quentin et Paris Diderot, au Conservatoire national des arts et métiers et Universcience. 2. Réseau professionnel français des cultures scientifique, technique et industrielle, qui compte près de 200 membres.

► **Durant les travaux de rénovation, les rencontres avec les scientifiques se poursuivent au sein des Étincelles du Palais de la Découverte, structure éphémère installée dans le XV<sup>e</sup> arrondissement de Paris.**

**Les relations entre les deux institutions remontent même à la création commune du Palais de la Découverte et du CNRS par le Prix Nobel de physique Jean Perrin, à la fin des années 1930. Comment s'articule aujourd'hui cette collaboration ?**

**B. M.** Cette création commune est porteuse de sens : travailler avec des organismes de recherche est pour nous un besoin existentiel, et en premier lieu avec le CNRS, même si notre partenariat n'est pas exclusif. Cela permet de nous assurer que nos contenus sont justes scientifiquement parlant et qu'ils correspondent à la science la plus récente. Le CNRS et Universcience n'ont pas qu'un fondateur commun : ils entretiennent, plus de quatre-vingts ans après leur création, des relations de très haut niveau qui s'appuient sur une grande confiance réciproque. En témoigne par exemple le fait que le PDG du CNRS est membre du conseil scientifique d'Universcience depuis plusieurs années.

Dans les faits, très nombreuses sont nos activités organisées avec l'appui du CNRS, notamment nos expositions (même quand l'organisme n'en est pas partenaire de référence), nos événements ou encore nos productions audiovisuelles, le service audiovisuel CNRS Images étant partenaire du Blob. Le CNRS est par ailleurs le bienvenu dans nos espaces : il a par exemple organisé en 2019, dans le cadre de ses 80 ans, son Forum des nouveaux

mondes à la Cité des sciences et de l'industrie, et choisi le Palais de la Découverte pour l'accueil de son dîner de gala en présence du président de la République. Il est aussi très investi dans notre dispositif de médiation « Un-e chercheur-e, une manip' », présenté depuis 2005 au Palais de la Découverte et en ce moment aux Étincelles du Palais de la Découverte : des scientifiques viennent parler de leurs recherches au public. Ce programme nous tient particulièrement à cœur : pouvoir questionner directement un chercheur ou une chercheuse est précieux pour nos visiteurs et se trouver confrontés aux questions de la société est utile aux scientifiques.

Pour résumer, nos liens sont anciens, étroits, de très grande qualité et d'une intensité rare. Nos maisons s'entendent bien car les femmes et les hommes qui les composent s'apprécient et partagent des valeurs communes. Le fait qu'Antoine Petit soit très attaché à ce que la science soit mise au service du plus grand nombre n'y est pas pour rien.

**Médiation scientifique, vulgarisation, partage des connaissances... Comment définissez-vous les activités d'Universcience ?**

**B. M.** Nous nous donnons pour mission de faciliter la rencontre entre le public d'une part, la science et ses applications d'autre part, grâce à une pluralité d'approches – expériences, manipulations, expositions, etc. – qui permettent d'aborder les connaissances acquises mais aussi la démarche scientifique elle-même et, partant, d'illustrer l'intérêt de la recherche. Au-delà de nos espaces d'exposition et de médiation, nous

avons ainsi une grande bibliothèque en accès libre, une structure consacrée à la culture numérique, un programme d'éducation artistique et culturelle « Fab Lab à l'école » en cours de déploiement sur tout le territoire national.

**En avril 2021, la ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, Frédérique Vidal, a présenté des mesures en faveur de la médiation scientifique issues de la loi de programmation de la recherche (LPR). Que pensez-vous de cette nouvelle impulsion gouvernementale sur le sujet ?**

**B. M.** Nous avons été très heureux que la LPR s'intéresse à la médiation scientifique. L'AMSCT<sup>2</sup>, dans laquelle nous sommes engagés, avait plaidé pour cela et a été entendue. Deux mesures en particulier nous concernent. D'abord, le 1 % pour la culture scientifique dans les appels à projets, qui encourage le monde de la recherche à s'impliquer dans le dialogue avec la société. L'autre mesure est que chaque enfant puisse faire, au cours de sa scolarité, une visite dans un centre de culture scientifique et technique. Une mesure importante pour nous, qui est un signe fort envers la communauté éducative.

Par ailleurs, l'Agence nationale de la recherche a lancé l'an dernier son tout premier appel à projets dédié à la médiation et la communication scientifiques. Cela fait écho à une initiative que nous avons prise dans le cadre de la rénovation du Palais de la Découverte : créer un réseau de recherche en médiation scientifique qui rassemblera des acteurs académiques et des centres de science pour stimuler la recherche dans nos domaines. Le monde d'aujourd'hui questionne notre manière de travailler, le public change et nos outils et pratiques doivent s'adapter constamment. Nous avons besoin de la science pour étudier nos métiers et les faire évoluer. ■

*“Le CNRS contribuera à la création des nouvelles présentations du Palais de la Découverte et assurera la validation scientifique de l'ensemble.”*



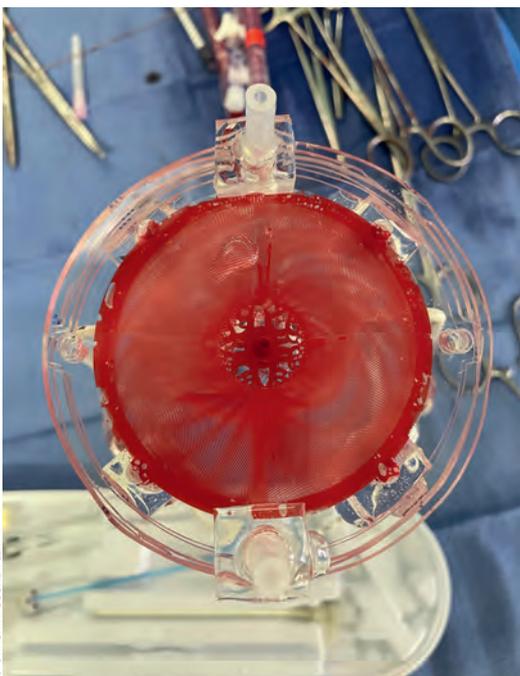
Lire l'intégralité de l'entretien sur CNRS Info

# Un poumon artificiel biomimétique

Lorsqu'un patient souffre de graves atteintes aux poumons ou attend une greffe, son oxygénation peut être maintenue par différents dispositifs. La mise en place d'un circuit d'ECMO (*Extracorporeal membrane oxygenation*), comprenant un oxygénateur sanguin macroscopique, est une solution très prisée, mais qui présente plusieurs défauts, dont la pose de canules au niveau de l'aîne et du cou imposant l'immobilisation du patient. Au bout d'une vingtaine de jours, le sang aura également coagulé.

## Leurrer le sang

« Le sang "comprend" qu'il sort du corps humain, ce qui déclenche des réactions chimiques qui forment des amas pouvant causer de graves thromboses lorsqu'ils repartent dans la circulation, explique Anne-Marie Haghiri-Gosnet, du Centre de nanosciences et de nanotechnologies<sup>1</sup> (C2N). Nous avons donc besoin de solutions biomimétiques. »



VIVANT

**INNOVATION** Pour améliorer la durée de vie limitée des oxygénateurs, le projet BioArtLung développe un système qui reproduit les capillaires pulmonaires et peut oxygéner de plus grands volumes.

PAR MARTIN KOPPE

Le projet BioArtLung, financé par l'ANR<sup>2</sup>, fait pour cela appel aux technologies microfluidiques, où des liquides passent dans des canaux de l'ordre du dixième de millimètre de largeur, afin de concevoir un oxygénateur avec une meilleure durée de vie. « Les oxygénateurs ECMO se présentent sous la forme de bols, où le sang circule autour de fibres creuses dans lesquelles on souffle de l'oxygène, décrit Anne-Marie Haghiri-Gosnet. Nous préférons une approche plus compacte et biomimétique, avec des microvaisseaux sanguins artificiels, tapissés de cellules souches afin que le sang ne se rende pas compte qu'il sort du corps humain pour rejoindre l'oxygénateur. »

Le sang et l'air se déplacent séparément dans de minuscules canaux en polydiméthylsiloxane (PDMS), un matériau biocompatible déjà utilisé pour des lentilles de contact souples, tandis qu'une membrane extrême-

ment fine laisse passer les molécules d'oxygène dans le sang. Le système complet se présente sous la forme d'une tricouche : une pour le sang, la membrane, puis une pour l'air ou l'oxygène pur.

## Améliorer l'oxygénation

Les tricouches, de dix centimètres de diamètre, peuvent être empilées afin de gérer des débits sanguins plus importants. Chaque tricouche peut oxygéner 15 millilitres de sang par minute, et il faudrait en combiner au minimum cent quarante pour permettre une bonne oxygénation sanguine d'un patient adulte. « Notre approche fonctionne mieux que tous les autres systèmes d'oxygénation microfluidique dans le monde, souligne Anne-Marie Haghiri-Gosnet. Fabriquer une seule tricouche au laboratoire nous demande cependant toute une journée de travail, nous démarchons donc des partenaires industriels afin de passer à plus grande échelle. »

Olaf Mercier, chirurgien thoracique de l'hôpital Marie Lannelongue et coordinateur du projet, a de son côté développé et breveté un système de canule double-flux qui ne se pose qu'au niveau du cou, pour plus de mobilité. Cette invention pourra bénéficier à tous les types d'oxygénateurs, y compris les ECMO. L'oxygénateur de BioArtLung a été testé avec succès sur un modèle porcin, mais de nombreux développements sont encore nécessaires avant de passer aux essais cliniques. « BioArtLung est entré dans sa dernière année de financement et nous sommes en train de publier nos ultimes résultats, conclut Anne-Marie Haghiri-Gosnet. Nous espérons trouver une collaboration industrielle pour atteindre les cent quarante tricouches et valoriser nos travaux. » **||**

► Oxygénateur microfluidique (vu de dessus) qui permet de maximiser la surface d'échange de gaz.

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

1. Unité CNRS/Université Paris Saclay. 2. Projet financé par l'ANR, avec comme partenaires le C2N, le LadHyX (CNRS/École polytechnique), les unités Inserm 1197 et 1176, les laboratoires du CEA Liten et Lemm.

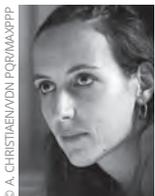
# LES IDÉES



*De la pluralité des médias au souvenir  
des espèces éteintes en passant par  
l'évolution de la pandémie, chercheuses  
et chercheurs nous donnent à penser.*

# Le pluralisme des médias, un enjeu démocratique

SOCIÉTÉS



© A. CHRISTIEN/NDN FORBIA/VEP

**ÉCONOMIE** Le regroupement d'un grand nombre de chaînes de télévision, de radios et de titres de presse entre les mains de peu d'acteurs financiers menace l'indépendance des médias dans notre pays, alors même que des fusions sont en discussion. C'est le point de vue de l'économiste Julia Cagé, qui propose des pistes pour améliorer la santé démocratique de nos médias.

PROPOS RECUEILLIS PAR FABIEN TRÉCOURT

## Pourquoi la concentration des médias en France est-elle si critiquée<sup>1</sup> ?

**Julia Cagé**<sup>2</sup>. Parce que l'on assiste à un fort mouvement de concentration actionnariale, en particulier celle réalisée par Vincent Bolloré (actionnaire à 27 % du groupe Vivendi). Or le pluralisme des médias est un principe constitutionnel. Et le journalisme est un métier à part : il a un rôle d'information et d'animation de la vie publique. Des lois protègent donc son indépendance grâce à des clauses qui permettent notamment à un journaliste de démissionner dans de bonnes conditions si la ligne éditoriale ou le propriétaire de l'entreprise changent. Votées en 1935, elles ont permis pendant des décennies de faire vivre le pluralisme. Si un journaliste était empêché de faire son travail par sa direction, il allait ailleurs. Cela ne fonctionne plus si une poignée de grands patrons et d'actionnaires possèdent 90 % des entreprises d'information !

Quant à la concurrence des médias alternatifs, notamment sur Internet, elle est illusoire. Les chaînes d'info, de radio et les journaux dits « mainstream » restent ultra-dominants. Si un journaliste se brouille avec eux, même pour de bonnes raisons, les options qui lui restent pour vivre de son métier sont vite limitées.

## Certaines lois n'aident pas...

**J. C.** Oui, celles adoptées pour protéger le **secret des affaires** ou les forces de l'ordre lors des manifestations par exemple, sont parfois instrumentalisées. Des formulations ambiguës dans les textes – comme le « droit à la sécurité », à « la propriété »... – sont utilisées par de grandes entreprises pour intimider des journalistes dont le travail leur a déplu via une « procédure-bâillon » : même si l'enquête est de qualité, ni eux ni les rédactions n'ont les moyens de financer des années de procès pour se défendre.

## SECRET DES AFFAIRES

Loi de 2018 visant la protection d'informations de caractère stratégique. Selon les sociétés de journalistes, le texte contient des dispositions qui font échec à la liberté d'expression et de communication.



## Quelle différence avec l'empire de presse de Robert Hersant des années 1980 ?

**J. C.** Celui-ci n'a jamais acquis la force de frappe des grands propriétaires actuels qui se développent aussi dans l'audiovisuel. Or la télévision reste le média le plus prescripteur, en termes d'influence politique comme de comportements d'achat. En 1986, le Parlement a adopté une loi pour contrer les ambitions monopolistiques de Robert Hersant. Elle définit des seuils de concentration maximale, permet au CSA de contrôler le temps de parole des politiques, etc. Mais cette loi, mise en place alors qu'il n'existait qu'une dizaine de chaînes de télévision, n'est plus adaptée au paysage médiatique. Elle ne traite que de la diffusion hertzienne et de la presse papier, et ne concerne que les concentrations « horizontales » (*pour un même propriétaire, le nombre de canaux où diffuser une chaîne est ainsi limité à sept. Mais il n'y a pas de plafond*

1. Une tribune, signée par 250 professionnels du domaine, est notamment parue dans *Le Monde* du 15 décembre 2021. 2. Professeure d'économie au Science Po Department of Economics (unité CNRS/Sciences Po) et chercheuse au Laboratoire interdisciplinaire d'évaluation des politiques publiques (Sciences Po). 3. "Hosting Media Bias: Evidence from the Universe of French Television and



© ALAIN JOCARD/AFAP

sur la part d'audience, NDLR). Or aujourd'hui, un groupe de médias se décline sur plus de supports et dépend davantage de concentrations « verticales » incluant la production, la distribution et la diffusion.

### La stratégie de Vivendi est donc inédite ?

**J. C.** Elle témoigne d'une ambition hégémonique sans précédent. Outre la chaîne Cnews et le groupe Canal+, le groupe a pris le contrôle de Prisma Média (*Capital*, *Geo*, *Gala...*), de Lagardère (*Europe 1*, *Paris Match...*). C'est aussi un poids lourd de l'édition, une OPA en cours visant une fusion d'Editis et Hachette Livre qui rassemblerait Grasset, Fayard, Larousse, etc. Jamais un groupe n'aurait contrôlé seul autant de médias aussi influents auprès d'un large public. Or, ces prises de contrôle s'accompagnent d'atteintes à la qualité de l'information, au pluralisme et à la liberté d'expression. À la télévision notamment, des talk-shows se substituent aux programmes d'investigation, et le temps d'antenne des invités de droite et

► Des salariés d'Europe 1 manifestent contre « l'emprise croissante de Vincent Bolloré dans les médias », à Paris le 30 juin 2021.

d'extrême droite a explosé selon une étude que j'ai codirigée en 2021 <sup>3</sup>. Les journalistes qui critiquent cette ligne éditoriale risquent d'être placardisés ou poussés vers la sortie. Le climat est si anxiogène que certains ont parfois pris les devants : les éditions Plon ont ainsi renoncé à publier une biographie critique d'Éric Zemmour par peur des foudres de Vincent Bolloré.

### Le projet de fusion des groupes TF1 et M6 aggraverait-il la situation ?

**J. C.** En regroupant TF1, LCI, TMC, M6, W9, etc., un même groupe audiovisuel contrôlerait près d'un tiers de l'audience globale et trois quarts des parts de marché correspondant à des programmes d'information ! Ce serait une atteinte sans précédent au pluralisme. Et ce sans permettre de constituer des champions nationaux pour concurrencer les géants internationaux. Par exemple : la capitalisation boursière de TF1 et M6 représenterait environ 2 milliards d'euros, contre 220 milliards de dollars pour Netflix, 310 milliards pour Disney ou encore... 1 661 milliards pour Amazon !



À lire :  
**Pour une télé libre. Contre Bolloré**, Julia Cagé, Seuil, 2022, 96 p., 4,50 €.  
**L'information est un bien public. Refonder la propriété des médias**, Julia Cagé et Benoît Huet, Seuil, 2021, 264 p., 15 €.

### L'essor d'Internet et des plateformes impose-t-il de nouvelles régulations ?

**J. C.** Il faut surtout cesser d'appréhender les médias selon leur format plutôt que selon leur mission d'information. Le site de *Médiapart* n'est pas si différent du journal *Le Monde* ou du *Figaro Magazine*. Quand BFMTV décline ses émissions sur YouTube, elle ne cesse pas de faire de la télé. Il me semble donc que, dès qu'un média d'information a une audience importante, il devrait être régulé, quels que soient son format et sa méthode de diffusion. Il existe certes des problèmes spécifiques : les révélations en novembre 2021 de la lanceuse d'alerte Frances Haugen à l'encontre de Facebook ont encore confirmé la nécessité de transparence des algorithmes de recommandation. Mais il est essentiel de penser la régulation des médias dans leur ensemble.

### Comment aller plus loin ?

**J. C.** Par exemple en créant un statut de « société de médias à but non lucratif ». L'idée est de garantir un financement viable – via don, mécénat, etc. – et de délester les rédactions d'un impératif de rentabilité, peu compatible avec la production d'une information de qualité. L'enjeu est aussi de démocratiser la propriété des médias, de mieux prendre en compte le caractère public de leur mission d'information, par exemple en renforçant le droit de vote des petits actionnaires. On pourrait pour cela créer des « Bons » qui permettraient à tout citoyen d'allouer de l'aide publique aux médias de son choix. Il y aurait aussi différentes manières d'impliquer les journalistes dans la gouvernance de leur entreprise ou de pousser celle-ci à plus de transparence sur l'actionnariat. Ces initiatives permettraient en outre de restaurer une confiance – souvent brisée, hélas pour de bonnes raisons parfois – entre le grand public et les médias. **II**



Lire l'intégralité de l'entretien sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)

# Covid-19

## « L'évolution virale reste largement imprévisible »

VIVANT



© COLL. PERS.

**ENTRETIEN** Depuis son apparition fin 2019, le virus SARS-CoV-2 ne cesse de muter. Alors que la vague Omicron semble être passée en France, elle fait des ravages en Asie et de nouveaux sous-variants viennent d'être détectés en Afrique du Sud. Alors comment l'épidémie va-t-elle évoluer ? Le point avec Samuel Alizon, spécialiste de la modélisation et de l'évolution des maladies infectieuses.

PROPOS RECUEILLIS PAR MARTIN KOPPE

### La vague Omicron s'éloigne en France. Mais où en sont les variants et l'épidémie de Covid-19 ?

**Samuel Alizon**<sup>1</sup>. Notre perception de l'épidémie est trop facilement influencée par ses tendances en France : le tableau devient très noir quand l'épidémie croît, puis tout paraît rose quand elle décroît. Or, à l'international, nous voyons bien que la situation n'est pas synchronisée, avec notamment une vague Omicron qui cause beaucoup de décès en Asie du Sud-Est. Nous devons donc garder à l'esprit que les pandémies fonctionnent sur un temps long et que les hétérogénéités locales sont fortes. Le variant BA.2 est actuellement ultra majoritaire en France. Il s'agit d'une lignée sœur de BA.1, la lignée d'Omicron à l'origine de la vague de janvier. Toutes deux auraient divergé il y a

environ un an en Afrique australe. BA.2 est aussi différent de BA.1 que le variant Delta l'est de l'Alpha, mais partage certaines de ses caractéristiques : environ deux fois plus contagieux et trois fois moins virulent que Delta dans une population vaccinée. On ne sait cependant pas quelle sera l'ampleur de son pic épidémique, car, outre la biologie, la politique et les comportements individuels jouent un rôle important.

### Anticiper l'évolution semble donc difficile...

**S. A.** En effet, même si des tendances de fond se dégagent, l'évolution des variants reste largement imprévisible. Toutefois, Omicron marque une rupture, au point qu'on se demande si nous ne vivons pas un branchement évolutif, c'est-à-dire un passage d'une

espèce à deux espèces différentes. En effet, les virus des lignées Omicron semblent exploiter une niche écologique différente des autres variants du SARS-CoV-2, qui infectent les voies respiratoires basses. Omicron s'en prend plutôt aux voies respiratoires hautes, où la réponse immunitaire est moins importante. Nous ne savons pas dans quelle mesure ces deux types de variants coexisteront, chacun avec sa cible de prédilection dans notre organisme, ou si BA.2 deviendra hégémonique.

### Quelles sont les possibilités décrites par la recherche ?

**S. A.** Le Royaume-Uni est très en avance sur ces questions et a publié, en février 2022, un rapport comprenant quatre scénarios d'évolution de l'épidémie sur le long terme<sup>2</sup>. L'un est



© ALEX PLAVESKI/EPH/MAXPPP

1. Directeur de recherche au CNRS, au Centre interdisciplinaire de recherche en biologie (CNRS/Collège de France/Inserm). 2. « Covid-19 Medium-Term Scenarios – February 2022 », version PDF sur [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1054323/S1513\\_Viral\\_Evolution\\_Scenarios.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1054323/S1513_Viral_Evolution_Scenarios.pdf)



optimiste, deux sont considérés comme médians et le quatrième est pessimiste. La projection optimiste correspond au prolongement de l'état actuel en Europe, où le virus présente un échappement immunitaire faible et une sévérité d'infection limitée grâce à la vaccination et aux traitements. Si les vagues hivernales demeurent possibles, leur ampleur serait limitée et les rappels vaccinaux ne concerneraient que les personnes à risque.

Dans les scénarios médians, l'échappement immunitaire serait plus prononcé, ce qui provoquerait de nouvelles vagues d'ampleur, potentiellement dès l'automne. On connaît encore assez mal les propriétés de l'immunité sur le long terme, mais les données britanniques indiquent que la protection est

moins durable contre Omicron que contre Delta. Par conséquent, ces scénarios pourraient nécessiter, certaines années, de nouvelles campagnes de vaccination générales. Enfin, dans le pire des scénarios, non seulement l'immunité serait faible, mais la sévérité de l'infection serait accrue, par exemple du fait de l'émergence d'un nouveau variant ou de la généralisation de résistances virales aux traitements. Il faudrait alors mettre la composition des vaccins à jour ou recourir aux interventions non pharmaceutiques. Au vu des modélisations de notre équipe, à moyen terme, les deux scénarios extrêmes semblent peu probables, mais, encore une fois, les variants démontrent que des événements rares peuvent avoir des conséquences planétaires.

► **Test de masse à Shanghai, le 15 mars 2022. La Chine, qui tente d'appliquer une politique zéro Covid, fait face à une recrudescence de cas depuis début mars.**

### Comment est organisé le suivi des variants ?

**S. A.** Là encore, les Britanniques ont incontestablement un temps d'avance en termes de qualité de suivi et d'analyse. Mais surveiller l'apparition de nouveaux variants nécessite une excellente connaissance du terrain. Au niveau international, cela signifie donc de faire confiance aux épidémiologistes de chaque pays. Avec Omicron, en Afrique du Sud, les chercheurs ont partagé leur inquiétude avec le reste du monde. Classiquement, la détection et le suivi des variants préoccupants reposent sur trois critères : épidémiologiques, pathologiques, et génétiques. Généralement, on constate d'abord des clusters ou des croissances localisées de l'épidémie, à contre-courant avec la tendance de fond. Les études de

3. Consortium pour la surveillance et la recherche sur les infections à pathogènes émergents via la génomique microbienne. 4. Agence nationale de recherches sur le sida et les hépatites virales et les maladies infectieuses émergentes.

terrain couplées au séquençage des génomes viraux montrent ensuite que ces rebonds sont provoqués par une lignée spécifique qui cause des symptômes différents, en termes d'échappement immunitaire, de contagiosité ou de virulence.

### Quid de la France ?

**S. A.** La France a rapidement mis en place un réseau épidémiologique pour la surveillance de ces critères. Nous avons été parmi les premiers pays à séquencer le génome du SARS-CoV-2, mais il y a ensuite eu un décrochage. Le projet Emergen<sup>3</sup>, coordonné par Santé publique France et l'ANRS-MIE<sup>4</sup>, a redressé la barre en termes de quantité de génomes produits, mais on reste loin des Britanniques en termes de qualité et d'exploitation des données (la loi britannique est bien moins stricte que la nôtre sur l'utilisation des données médicales, ce qui n'est pas sans soulever des questions éthiques délicates).

La France a également adopté une approche qui repose sur du criblage génétique : plutôt que de séquencer tout le génome du virus, le criblage ne détecte que quelques mutations spécifiques de variants. Cela permet de tester tous les échantillons positifs. Notre équipe a ainsi

pu rapidement alerter sur les vagues des variants Alpha, Delta ou Omicron. Mais cette exhaustivité et réactivité se paient en termes de spécificité : par exemple, il est actuellement impossible de distinguer BA.1 de BA.2 en France avec le criblage.

### Avant l'arrivée d'Omicron, certains émettaient l'espoir que le virus ait épuisé une grande partie de son potentiel évolutif. Qu'en est-il ?

**S. A.** On a en effet retrouvé plusieurs mutations en commun dans différents variants. De tels cas d'évolution parallèle sont généralement le signe d'une forte pression de sélection. Mais le passage imposé par des mutations conférant un avantage sélectif ne présage pas forcément d'un resserrement des possibilités. Au contraire, une mutation peut ouvrir un nouveau paysage évolutif. À la décharge de l'hypothèse du rétrécissement évolutif, l'organisation des génomes viraux impose d'énormes contraintes en termes mutationnels. Quand notre ADN compte plusieurs milliards de paires de bases, le SARS-CoV-2 doit effectuer son cycle de vie avec 29 000 paires : s'introduire dans des organismes, puis dans leurs cellules, dupliquer son matériel génétique, produire des nouveaux virions (*particules virales, Ndlr*), le tout en

▶ Sur le marché de Biarritz (Pyrénées-Atlantiques), le masque est tombé lundi 14 mars, jour où le passe vaccinal a été suspendu en France comme la plupart des restrictions liées au Covid-19.

échappant à la réponse immunitaire. C'est pourquoi la majorité des mutations possibles a un effet délétère sur le virus, certaines sont neutres, et seule une minorité peut être avantageuse.

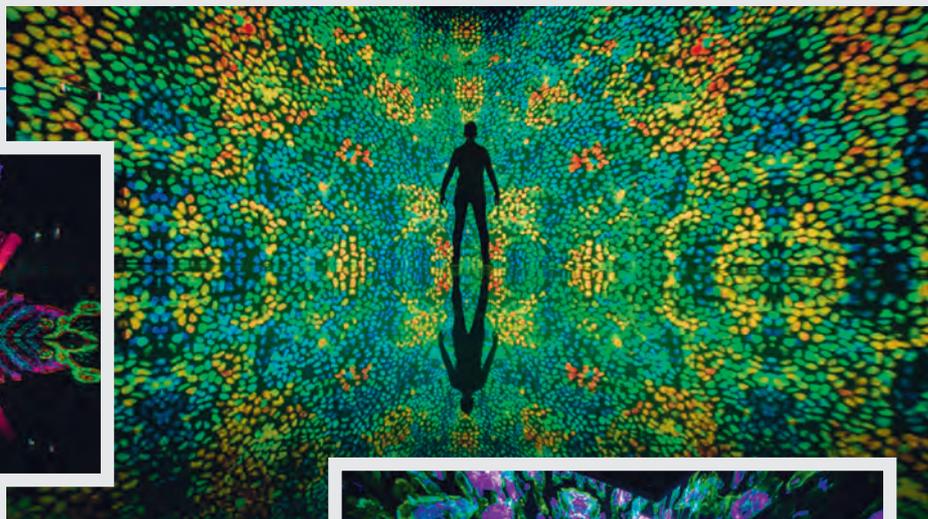
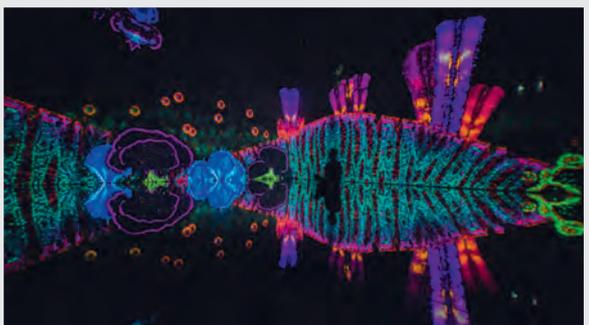
### Peut-on limiter ce potentiel de mutations, et donc l'émergence de variants inédits ?

**S. A.** Chaque fois que quelqu'un est contaminé, des milliards de nouvelles particules virales sont produites et croissent, suite à des erreurs de copie, les risques d'émergence de mutants au hasard. Cet effet est renforcé lorsqu'une personne est infectée par plusieurs lignes différentes du fait de la recombinaison : si deux virus sont présents dans une même cellule, des échanges de portions entières de génomes peuvent avoir lieu. Et avec des tailles de population gigantesques, l'improbable peut devenir fréquent. Plus la circulation du virus augmente, plus son évolution accélère.

Enfin, pour comprendre l'évolution virale, il faut se pencher sur la dynamique intrahôte. Chez la majorité des personnes, l'infection dure moins de deux semaines et on estime qu'une nouvelle infection n'est établie que par un ou trois virions. Ce goulet d'étranglement limite fortement la diversification du virus. Toutefois, chez les personnes immunodéprimées, l'infection peut durer plusieurs mois, causant des pathologies lourdes. Plusieurs études ont montré que certaines des lignées qui évoluent au sein d'infections de personnes immunodéprimées portent des mutations clés de certains variants. L'impératif de prévention et de suivi de ces personnes est donc à la fois sanitaire, mais aussi évolutionnaire. Dans tous les cas, mettre en place des politiques de prévention afin de baisser au maximum le nombre de contaminations est le meilleur moyen de réduire les risques d'apparition de nouveaux variants de SARS-CoV-2. ||



# À voir



## Plongée dans la cellule

C'est à un magnifique voyage au cœur des cellules humaines, quelque part entre art et sciences, que vous convie cette exposition dont le CNRS est partenaire. Des images fascinantes du corps humain, allant du neurone à la cellule sanguine, sont mises en lumière et en musique dans cette création contemporaine d'envergure. Une immersion spectaculaire à laquelle ont participé 24 équipes de recherche du monde entier et qui s'inscrit dans un projet plus large intitulé Cell Worlds, comprenant notamment un documentaire. **Cell Immersion, Bassins des lumières**, Bordeaux, jusqu'au 2 janvier 2023. [www.cell-worlds.com](http://www.cell-worlds.com)



## L'océan s'affiche à Montparnasse

Menacé par le changement climatique, l'océan reste le véritable poumon de notre planète. Comment les scientifiques explorent-ils cet écosystème et tentent-ils d'en percer les mystères ? Quels sont les leviers pour préserver la richesse de la vie marine ? Voici certaines des questions abordées dans cette fresque de 4,8 m de haut et de 134 m de long conçue par le CNRS et l'Ifremer, en partenariat avec la RATP, et vue par plus de 100 000 voyageurs chaque jour.

« **L'Océan, colosse aux pieds d'argile** », à voir jusqu'au 11 juillet, dans les couloirs de la station Montparnasse-Bienvenue (Paris - couloir de la correspondance lignes 4, 6, 12 et 13).

# À lire



## Biens communs

Bien au-delà des écogestes ou de l'éducation au développement durable, la transition écologique doit s'articuler autour d'un projet global, conciliant le respect de deux biens communs : le commun social, partagé par les humains, et le commun biotique que nous partageons avec tout le vivant. Un plaidoyer éclairant, signé Michel Magny, médaille d'argent du CNRS.

**Retour aux communs. Pour une transition copernicienne**, Michel Magny, la Pommier, mars 2022, 252 p., 20 €

## Une histoire de l'Afrique



Dans cette nouvelle livraison de la collection « Les grandes voies de la recherche », François-Xavier Fauvelle, professeur au Collège de France, fait le récit de son parcours de recherche, entre histoire et archéologie, qui l'a mené sur tout le continent africain. Il y dessine aussi le tableau d'une histoire incroyablement riche, méconnue (et parfois niée) de l'Afrique antique et médiévale.

**Penser l'histoire de l'Afrique**, François-Xavier Fauvelle, CNRS Éditions, De vive voix, avril 2022, 96 p., 8 €,

## Une voix dans la tête



S'il vous arrive de vous parler à vous-même dans votre tête, ou de chantonner intérieurement un petit air sans émettre le moindre son, sachez que vous n'êtes pas le seul : en moyenne, notre « parole intérieure » nous accompagne un quart de notre vie éveillée. Si le phénomène est commun, il soulève nombre de questions passionnantes explorées dans ce livre par la linguiste Anne Loevenbruck.

**Le mystère des voix intérieures**, Hélène Loevenbruck, Denoël, avril 2022, 352 p., 19 €.

# L'oubli, la seconde mort des espèces éteintes

VIVANT

TERRE



© COLL. IFFRS.

**ENTRETIEN** Alors que de nombreuses espèces ont déjà disparu ou sont en passe de l'être, les effacer de notre mémoire collective pourrait remettre en cause les efforts de conservation de la biodiversité.

Explications avec l'écologue Franck Courchamp.

PROPOS RECUEILLIS PAR BRIGITTE PERUCCA

**La pollution, le réchauffement climatique, la déforestation sont quelques-uns des facteurs qui entraînent la disparition de certaines espèces. À ces phénomènes physiques, vous ajoutez, dans une étude parue en février<sup>1</sup>, un phénomène d'ordre culturel : « l'extinction sociale ». De quoi s'agit-il ?**

**Franck Courchamp<sup>2</sup>.** L'extinction sociétale est un phénomène qui agit en parallèle de la disparition physique des espèces. Des espèces disparaissent ET elles peuvent être oubliées : les conséquences de ces deux extinctions sont différentes. L'extinction sociétale joue un rôle déterminant dans la conservation. Pour établir un parallèle simple : si l'on oublie des faits historiques, nous serons collectivement incapables de construire correctement notre futur en nous appuyant sur nos erreurs passées ; de la même manière, si nous oublions les espèces éteintes, nous n'aurons pas une bonne représentation des menaces qui pèsent sur notre patrimoine naturel et nous serons d'autant moins enclins à protéger les espèces qui restent. Ce concept, fondamental en biologie de la conservation, apparaissait de manière diffuse dans la littérature scientifique. On doit à Ivan Jaric, chercheur au centre de biologie de l'Académie tchèque des sciences, de l'avoir délimité et clairement défini.

**Sur quelles espèces ce phénomène a-t-il été observé ?**

**F. C.** L'exemple du loup japonais, l'okami, est intéressant. Voilà un animal

qui est en passe de disparaître des esprits après avoir disparu de la nature il y a un peu plus d'un siècle. Les Japonais le connaissent au travers d'un personnage de jeu vidéo, mais pensent désormais qu'il appartient à la mythologie, malgré quelques spécimens encore dans les musées. On peut également citer l'exemple de l'ara de Spix, un grand perroquet bleu qui (ré)apparaît en majesté dans le dessin animé *Rio*. Les communautés locales où ce perroquet avait son habitat naturel pensaient qu'il s'agissait d'un oiseau que l'on trouvait dans la ville de Rio et ignoraient complètement qu'il avait vécu parmi eux avant de s'éteindre ! Outre les espèces qui ont disparu et ont été oubliées, il peut aussi y avoir des espèces qui ne sont pas encore éteintes et qui sont déjà oubliées, tout simplement parce qu'elles n'ont jamais eu d'existence sociétale.

**Appartenir à une espèce charismatique protège-t-il de l'oubli ?**

**F. C.** Appartenir à une espèce charismatique, être important pour la société ou proche des humains figurent parmi les facteurs qui ralentissent cet effacement de la mémoire collective. Mais malheureusement cela ne suffit pas. Le fait d'être un loup, espèce cha-

rismatique s'il en est, n'a pas protégé l'okami de l'oubli. De même qu'une grande majorité de personnes ignore que la girafe, autre animal charismatique, est grandement menacée. Gardons également en tête le paradoxe de la disparition des espèces rares alors qu'elles valent beaucoup<sup>3</sup> : leur valeur même les menace alors qu'on imagine qu'elle devrait les protéger.

**Pourquoi est-il important d'entretenir cette mémoire des espèces ?**

**F. C.** Sans mémoire des extinctions passées, nous courrons le risque de ne pas assurer la conservation de la biodiversité. Car comme je l'évoquais précédemment, l'absence de mémoire fausse la perception des dangers. Le risque, c'est qu'une fois disparues totalement de nos mémoires, on en vienne inconsciemment à sous-estimer les menaces qui pèsent sur la biodiversité, voire en douter, donnant ainsi du poids et de la crédibilité aux sceptiques. Nous devons absolument prendre conscience de la fragilité de la biodiversité, mesurer les menaces qui la mettent en péril et l'urgence à la protéger. Et pour cela, la mémoire des espèces éteintes doit rester vivante dans les esprits et dans les cultures. Si la population australienne avait

1. "Social extinction of species", Jaric, E., Roll, U., Bonaiuto, M. et al, *Trends in Ecology&Evolution*, 15 fév. 2022. 2. Directeur de recherche au CNRS, au laboratoire Écologie, systématique et évolution (unité CNRS/Univ. Paris Saclay/AgroParisTech). 3. "Value of rarity and species extinction: the anthropogenic Allee effect", Courchamp, F., Angulo, E., Rivalan, P. et al., *PLoS Biology*, 2006, 4(12): e415.



© PATRICK PLEUDOPAZUMA / PRESS/REA

► **Aras de Spix (*Cyanopsitta spixii*) dans une volière de l'Association pour la conservation des perroquets menacés, à Berlin (Allemagne). Popularisés par le dessin animé *Rio*, les aras de Spix, originaires du Brésil, y sont considérés comme éteints.**

conscience que le diable de Tasmanie était présent en Australie avant d'en disparaître, elle défendrait sans doute davantage les programmes de conservation de cet animal en Tasmanie même, où sa survie est désormais menacée. À ces raisons pratiques, j'en ajouterai une autre, d'ordre plus philosophique, et qui est sans doute la plus fondamentale : on peut trouver dommage de perdre ce qui fait partie de notre patrimoine mondial, et la perte de la culture, de la présence de ces espèces dans notre histoire, en fait partie.

**Cette mémoire repose souvent sur une expérience concrète de la nature alors même que nous vivons dans un monde de plus en plus urbanisé. Quels leviers suggérez-vous pour lutter contre l'oubli ?**

**F. C.** La nature est une source d'émerveillement et de fascination qui constitue à elle seule une motivation suffisante à mes yeux pour connaître et protéger le patrimoine naturel. Mais pour en prendre conscience, nos sociétés doivent se reconnecter avec la nature. L'épreuve de l'épidémie de Covid-19 et des confinements nous montre à quel point nous en avons besoin. Combien d'espèces peuplent notre planète : huit millions ? Quinze millions ? Plus ? Le chiffre nous est encore inconnu. Le premier levier de ce combat contre l'oubli passe bien

évidemment par la découverte de ce que nous ignorons. Nous avons identifié environ deux millions d'espèces, soit une petite fraction de toutes celles qui existent et nombre d'entre elles s'éteignent sans même que nous ayons eu le temps de les décrire, de les classer, et de comprendre comment elles sont liées entre elles. Mais il ne faut pas négliger pour autant la « valeur utilitaire » de la nature (*par opposition à sa valeur intrinsèque, Ndlr*). La disparition de certaines espèces, végétales notamment, entraîne de facto celle de certains savoirs, médicaux, notamment. Nous utilisons pour la nourriture moins de 3 % des plantes disponibles pour l'agriculture, nous privant ainsi d'une très grande richesse. Le coût économique des menaces sur la biodiversité est alarmant... Aussi ne devons-nous pas négliger les sources de médiation telles que les musées, les documentaires, Internet, etc., pour conserver les espèces vivantes aussi bien dans leurs habitats naturels que dans notre mémoire collective. ||

## À lire

### Démocratie



Le vote électronique est-il sûr ? Et dans quelles conditions est-il un choix pertinent par rapport au vote classique ? Dans cet ouvrage, deux chercheurs en sécurité informatique, parmi les meilleurs spécialistes du sujet, s'efforcent de répondre, dans un langage clair et précis, à cette question qui agite régulièrement le débat public et dont la réponse ne peut être laissée aux seuls experts.

**Le Vote électronique. Les défis du secret et de la transparence, Véronique Cortier et Patrick Gaudry (préface de Gérard Berry), Odile Jacob, mai 2022, 256 p., 23,90 €.**

### Numérique

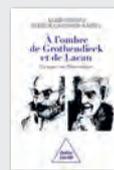


« Sans doute les hommes sont-ils moins contraints qu'auparavant mais on les trompe de plus en plus, et cette tromperie a des effets considérables dans la société de l'information où elle s'apparente à de la fausse monnaie », constate

Jean-Gabriel Ganascia dans cet essai qui passe au crible la vulgate éthique qui accompagne habituellement les nouvelles technologies de l'information. Ce spécialiste de l'intelligence artificielle, qui a présidé le Comité d'éthique du CNRS, dénonce ainsi la fixation sur des craintes caduques qui masquent trop souvent les risques réels de manipulation rendus possibles par les nouveaux services numériques.

**Servitudes virtuelles, Jean-Gabriel Ganascia, Seuil, coll. « Science Ouverte », mars 2022, 228 p., 21 €.**

### Psychiatrie



On doit au génie mathématique Alexandre Grothendieck le concept de topos et au psychanalyste Jacques Lacan celui de l'inconscient structuré comme un langage. Partant du lien qu'ils estiment profond entre la logique intuitionniste et la théorie des topos, le mathématicien Alain Connes et le psychiatre Patrick Gauthier-Lafaye s'entretiennent ici sur les nuances que les topos introduisent dans les notions de vérité et d'inconscient.

**À l'ombre de Grothendieck et de Lacan. Un topos sur l'inconscient, Alain Connes et Patrick Gauthier-Lafaye, Odile Jacob, mai 2022, 174 p., 17,90 €.**



de Denis Guthleben,  
historien au CNRS

# Une journée dans la vie de Pasteur

En cette année 2022 du bicentenaire de la naissance de Louis Pasteur (1822-1895), événements et publications se succèdent pour rendre hommage à la mémoire du grand savant. Et c'est peu dire que la matière abonde : formé à la chimie, Pasteur s'illustre d'abord en cristallographie, avant de s'engager sur les chemins de la biologie et de la médecine qu'il révolutionne, et de fonder un institut resté depuis 1888 à la pointe de la recherche mondiale...

Puisqu'il ne peut être question ici de retracer l'ensemble de son parcours, limitons-nous à une journée seulement : le lundi 16 mars 1868. Pasteur jouit déjà d'une solide réputation, tant pour les recherches qu'il a menées à Dijon, Strasbourg, Lille et Paris, que pour leurs applications – mais n'allez pas lui parler de « sciences appliquées », il vous répondrait que « Non, mille fois non, il n'existe pas une catégorie de sciences auxquelles on puisse donner ce nom. Il y a la science et les applications de la science, liées entre elles comme le fruit à l'arbre qui l'a porté » !

## Palais des Tuileries, 16 mars 1868

Toujours est-il que ce jour-là, il prend le chemin du Palais des Tuileries, à l'invitation du maître des lieux. Napoléon III souhaite en effet s'entretenir de l'avenir de la science française avec une poignée de savants triés sur le volet, et Louis Pasteur est de la partie. Il a passé ce qu'on n'appelait pas encore en bon français « le week-end » à relire des notes qu'il entend soumettre à l'empereur, en dépit d'un titre qui ne paie pas de mine : « Suppression du cumul dans l'enseignement des sciences physiques et naturelles ». Cette suppression est l'une de ses recommandations, « mais ce n'est pas la seule, et toutes les autres, à [son] avis, ont également un caractère d'urgence ».

Quelles sont les recommandations qu'un scientifique peut adresser au chef de l'État en 1868 ? « Je placerais au premier rang des améliorations tout ce qui concerne les moyens matériels dont les savants peuvent disposer », indique-t-il. La priorité des priorités est donc de doter les laboratoires de moyens suffisants, à la fois pour satisfaire les scientifiques en place, et pour ne pas décourager les recrues, que Pasteur appelle « les jeunes savants d'avenir » : « ils ne manqueront pas, quand les institutions sauront les faire surgir ».

## De l'argent mais aussi... du temps

« Une autre plaie de nos grandes institutions scientifiques », déplore-t-il, est d'imposer au scientifique une foule de tâches qui l'éloignent de ses études. En réduisant ce cumul, il retrouverait « des loisirs », c'est-à-dire du temps à passer « dans son laboratoire ou dans ses collections, au plus grand profit et au plus grand honneur de tous ».

Mais Pasteur envisage tout de même deux dérogations : la direction d'un laboratoire, si elle est rétribuée généreusement – « quoi de plus légitime que de rémunérer ce travail ? » – et l'enseignement – « mais si un enseignement est utile à celui qui le fait, [...] deux ou trois paralysent complètement les forces ». Songeant aux fonctions qu'il a occupées avant de s'installer à Paris en 1857, Pasteur plaide encore pour un développement harmonieux du territoire : « Ce serait se faire une idée erronée des conditions des recherches expérimentales, que de considérer les observateurs comme ayant besoin de l'excitation de Paris [...] Dans le séjour possible de la province, on suit avec plus de calme et souvent avec plus de fruit des idées nouvelles... »

Ces recommandations ne sont hélas pas assez entendues en haut lieu, et lorsque Pasteur retrouve ses notes à l'été 1871, le contexte a changé : l'empire s'est écroulé à Sedan, et la France est meurtrie d'une défaite qui, aux yeux du savant, s'est plus jouée dans les laboratoires que sur les champs de bataille – « il faut l'attribuer, j'en ai la conviction, à ce que la France s'est désintéressée des grands travaux de la pensée, particulièrement dans les sciences exactes ». Il ne lui reste plus alors qu'à se lamenter : « j'aurais appelé l'attention de l'Empereur et de ses Ministres avec un surcroît d'énergie, si j'avais pu prévoir qu'à deux années de distance les malheurs de la patrie seraient liés d'une manière si douloureuse à la faiblesse de notre organisation scientifique ». Et à espérer que la République tendra davantage l'oreille aux appels de ses savants... II

“ Le 16 mars 1868, Napoléon III souhaite s'entretenir de l'avenir de la science française avec une poignée de savants triés sur le volet. Louis Pasteur est de la partie. ”

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.**

**fondation-cnrs.org** 

A young girl with dark hair in a ponytail, wearing a red dress, is sitting on the floor and playing with wooden toys. She is holding a wooden horse toy. In the background, there are colorful alphabet cards on the wall and a stack of colorful blocks. The scene is brightly lit and appears to be a nursery or playroom.

# Avec son bac+8, elle sera ingénieure de recherche en archéologie

De BEP à BAC+8, 309 postes ingénieurs et techniciens (F/H),  
dans 200 métiers partout en France

Rendez-vous sur : [www.cnrs.fr/concours-it](http://www.cnrs.fr/concours-it)