

Trimestriel n° 300
JUIN 2020

CNRS

LE JOURNAL

SPÉCIAL COVID-19



**Comment
le CNRS a
fait front
à l'épidémie**

**De la biologie
aux mathématiques,
les scientifiques
mobilisés**

**Économie,
climat... quel
sera l'impact
de la crise ?**

**Découvrez
les lauréats 2020
de la médaille
de l'innovation**

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS #8



#8 actuellement
en vente
en librairie et Relay

200 pages / 12,50 €



CNRS EDITIONS

www.carnetsdescience-larevue.fr

CNRS LE JOURNAL

Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

Téléphone : 01 44 96 40 00

E-mail : lejournale@cnrs.fr

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

Anciens numéros :

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

Directeur de la publication :

Antoine Petit

Directrice de la rédaction :

Brigitte Perucca

Directeur adjoint de la rédaction :

Fabrice Impériali

Rédacteur en chef :

Mathieu Ravaut

Rédactrice en chef adjointe :

Charline Zeitoun

Chefs de rubrique :

Laure Cailloce, Yaroslav Pigenet

Rédacteurs :

Sophie Félix, Saman Musacchio, Laurence Stenvot

Assistante de la rédaction et fabrication :

Laurence Winter

Ont participé à ce numéro :

Julien Bourdet, Grégory Fléchet,
Mathieu Grousseau, Denis Guthleben,
Martin Koppe, Francis Lecompte, Louise Mussat,
Jonathan Rangapanaiken, Vahé Ter Minassian,
Fabien Trécourt

Secrétaire de rédaction :

Émilie Silvoz

Direction artistique :

David Faure

Iconographes :

Anne-Emmanuelle Héry, Marie Mabrouk

Gestionnaire :

Mathieu Chatellier

Illustrations :

Wood, Agence Virginie pour le CNRS

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 ;
<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 :

ILLUSTRATION DE WOOD, AGENCE VIRGINIE POUR LE CNRS

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

Abonnez-vous gratuitement sur :
» lejournale.cnrs.fr/abojournal

Après cette étrange période de confinement généralisé, nous ne pouvons échapper à un certain questionnement. Devons-nous repenser nos priorités à la lumière de cet événement qui a ébranlé nos sociétés ? Une chose est sûre : la crise sanitaire a démontré une fois encore la prééminence d'une approche interdisciplinaire. Les biologistes et les chimistes ont certes été mis à contribution, mais les mathématiciens et les informaticiens qui ont élaboré des modèles et traité des données aussi, de même que les anthropologues, économistes, géographes, historiens, philosophes, politologues, sociologues..., dont les apports se sont révélés déterminants.

“Le rôle de la science ne se limite pas à anticiper les crises. L'avancée des connaissances doit rester notre moteur.”

Le rôle de la science ne se limite pas à anticiper les crises. Demain, ce sont toutes les sciences qu'il faudra continuer à développer. Les moyens apportés par la loi de programmation pluriannuelle pour la recherche doivent nous y aider. L'avancée des connaissances doit rester notre moteur. C'est là que réside notre capacité à traiter les crises, quelle que soit leur nature, sanitaire, environnementale, sociale ou économique.

C'est pourquoi les six défis transverses de notre Contrat

d'objectifs et de performance¹, définis il y a quelques mois – « Changement climatique », « inégalités éducatives », « intelligence artificielle », « santé et environnement », « territoires du futur » et « transition énergétique » –, restent plus pertinents que jamais. La crise doit nous conduire à aborder certains d'entre eux avec des regards nouveaux : par exemple, les opportunités révélées par le télétravail vont selon toute vraisemblance avoir un impact sur l'organisation des territoires du futur, et la généralisation des enseignements à distance pendant la crise représente une expérience grande nature pour les sciences de l'éducation. J'en suis convaincu : avec une telle feuille de route, le CNRS est armé scientifiquement pour faire face aux questions brûlantes qui se posent à nos sociétés.

Antoine Petit,
président-directeur général du CNRS



© FRÉDÉRIQUE PLAS/CNRS PHOTO THEQUE

1. À retrouver sur http://www.cnrs.fr/sites/default/files/news/2020-02/COP_V9_3101_web.pdf

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS

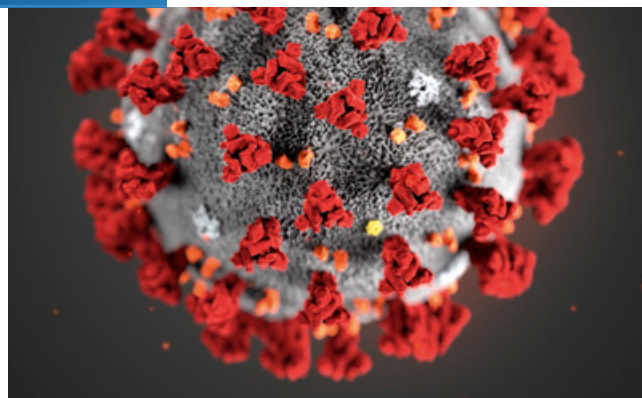




© JULIE FONCY

SPÉCIAL COVID-19

- 06 Comment le CNRS a fait front
- 18 La virologie, entre sprint et course de fond
- 24 Un test ultra-rapide pour le dépistage
- 26 Comment sont conçus les modèles des épidémies
- 31 1,5 milliard de molécules passées au criblage virtuel
- 32 L'éthique de la recherche en situation de crise
- 34 Le coronavirus en un coup d'œil
- 36 « Face aux pandémies, les sciences de l'écologie
sont plus que jamais nécessaires »
- 40 « Nous devons mieux anticiper les risques sévères »
- 43 Quel sera l'impact économique de la crise ?
- 44 « L'humanité a toujours vécu avec les virus »
- 46 Edgar Morin : « Nous devons vivre avec l'incertitude »



© SCIENCE PHOTO LIBRARY / CDC



Retrouvez dans ce numéro des extraits
des podcasts de notre blog
« Covid-19 : la parole à la science », à
écouter sur notre site, lejournald.cnrs.fr

© ENHANCED IMAGE BY GERALD BOCHSTADT AND SEAN DOAN
(CC BY-NC-SA) BASED ON IMAGES PROVIDED COURTESY OF NASA/JPL-CALTECH/SWRI/MSSS

ÉGALEMENT DANS L'ACTUALITÉ

- Champions de l'innovation 50
- Françoise Lamnabhi-Lagarrigue, reine de l'automatique 52
- Roland Marchal : « J'ai été un otage académique » 54
- Les ondes terahertz enfin domptées 56
- LHC : 10 ans après, l'aventure continue 58
- Jupiter se dévoile 60
- Des empreintes de dinosaures dans une grotte de Lozère 62
- « La justice déçoit d'autant plus qu'elle a été idéalisée » 64

- LA CHRONIQUE Let IT be 66

SPÉCIAL COVID-19



*Dans les laboratoires ou en télétravail,
de la biologie à la philosophie,
toute la recherche s'est mobilisée pour
éclairer et surmonter la crise.*

ILLUSTRATION : WOOD POUR CNRS LE JOURNAL



L'Institut des sciences chimiques de Rennes a participé à l'effort collectif, notamment en préparant du gel hydroalcoolique.

Comment le CNRS a fait front

Enquête. Le 13 mars, le passage au stade 3 de l'épidémie était déclaré en France, annonçant une longue période de confinement et la fermeture de la majorité des laboratoires du CNRS. Récit de ces trois mois pendant lesquels les agents de l'organisme, en France et à l'étranger, se sont mobilisés pour faire face à une crise sanitaire sans précédent.

DOSSIER RÉALISÉ PAR SOPHIE FÉLIX, SAMAN MUSACCHIO ET LAURENCE STENVOT



Nous sommes dix-huit personnes de retour, en roulement, sur le site, ce qui correspond à 20 % de l'effectif», rapporte le 2 juin Hélène Pernot, directrice du Laboratoire de réactivité de surface (LRS)¹ à Paris.

Après plus de deux mois de confinement, pendant lesquels la majorité des laboratoires du CNRS ont fermé leurs portes, le LRS a privilégié le retour des doctorantes et doctorants pour finir les dernières manipulations avant la soutenance de thèse, encadrés par des règles sanitaires strictes. Mais toutes et tous, chercheurs, ingénieurs et techniciens, ont hâte de reprendre leurs activités habituelles après cette parenthèse imposée.

« Cela fait des dizaines d'années que je fais de la recherche et c'est la première fois qu'elle est totalement interrompue sur site ! », s'exclame de son côté Valérie Mezger, directrice du laboratoire Épigénétique et destin cellulaire² à Paris. À l'instar de ses quelque mille consœurs et confrères directeurs d'unité du CNRS, elle a vu son laboratoire se mettre « à l'arrêt » presque aussitôt après l'intervention du président de la République Emmanuel Macron, annonçant le passage au stade 3 de l'épidémie³ de coronavirus en France, le vendredi

13 mars. Créée un mois plus tôt – initialement pour gérer la situation des agents du CNRS en Chine – la cellule de crise Covid-19 de l'organisme s'est efforcée d'accompagner délégations et unités prises dans cette tourmente exceptionnelle. « Nous avons tous ensemble traversé cette crise avec sang-froid, pragmatisme et un grand sens du collectif », assure Antoine Petit, président-directeur général du CNRS, saluant les « contributions classiques en recherche, transfert et appui à la recherche » (lire p. 9), autant que « les actions de solidarité spécifiques à la crise » menées par les agents (lire p. 15).

Concilier fermeture et maintien de l'activité

À l'exception des laboratoires travaillant directement sur le coronavirus qui ont tourné à plein régime, la plupart des unités ont placé les personnels scientifiques et administratifs en télétravail ou autorisation spéciale d'absence (lire p. 12). Les laboratoires se sont vidés mais une grande majorité de chercheuses et de chercheurs ont « profité » de cette période pour « avancer sur les données qu'ils avaient déjà, écrire des articles ou préparer leur habilitation à diriger les recherches (HDR), pour laquelle ils manquent habituellement de temps », ...

1. Unité CNRS/Sorbonne Université. 2. Unité CNRS/Université de Paris. 3. Le stade 3 est celui de l'épidémie déclarée, lors duquel on constate que le virus circule et qu'il est transmissible sur l'ensemble du territoire. 4. Unité CNRS/MNHN/Sorbonne Université.

... comme en témoigne Sylvie Crasquin, directrice du Centre de recherche en paléontologie⁴, à Paris. Même son de cloche au laboratoire Épigénétique et destin cellulaire dont l'activité principale est la culture de cellules : les équipes ont dû gérer l'arrêt des expériences en congelant ces cultures et poursuivre les analyses à domicile.

Certains sites ont maintenu un minimum de personnels pour des astreintes administratives ou techniques. À l'image de l'infrastructure de recherche Résonance magnétique nucléaire à très hauts champs (RMN THC) dont les appareils nécessitent des remplissages d'azote et d'hélium liquides réguliers. « *Ils fonctionnent sur la base d'aimants supraconducteurs refroidis dont l'arrêt est complexe avec des risques d'endommagement* », explique Jean-Pierre Simorre, directeur

de l'infrastructure à l'Institut de biologie structurale⁵. D'autres, déjà rompus à l'exercice du travail à distance, ont réussi à maintenir une activité quasi normale. « *Le data challenge de l'expérience Belle II⁶ s'est tenu normalement entre France et Japon, en parallèle des activités classiques et de la mise en route du plan de continuité* », note Pierre-Étienne Macchi, directeur du Centre de calcul de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules du CNRS, une infrastructure de recherche dédiée au traitement et au stockage de grandes masses de données. Bien que privés de leur bibliothèque, les scientifiques du Laboratoire de mathématiques et applications (LMA)⁷ n'ont pas interrompu le cours de leurs recherches, en s'appuyant sur les archives ouvertes telles que HAL ou arXiv.

« *Le problème a surtout affecté les doctorants qui ne pouvaient plus effectuer leurs manipulations... Ils en ont profité pour rédiger* », explique Hélène Pernot. Avec des situations forcément variables selon les domaines scientifiques. Ainsi, les thésards en mathématiques ont éprouvé moins de difficulté que les scientifiques expérimentateurs privés de leurs instruments. Avec la fermeture des unités, les enseignants-chercheurs ont également été mobilisés par l'enseignement à distance. « *Nous avons mis le matériel en ligne, nous nous connectons à des heures précises pour discuter avec les étudiants, certains ont même réalisé des enregistrements audio de leurs cours !* », détaille Alessandra Sarti, directrice du LMA, et professeure de géométrie algébrique à l'université de Poitiers.

Les missions à l'étranger suspendues

À l'étranger, la situation s'avère plus complexe. Le CNRS, en coordination étroite avec ses huit bureaux à l'étranger et le centre de crise du ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, a recensé et accompagné le retour des agents en mission, rendu difficile par la fermeture soudaine des frontières. « *Toutes les missions nouvelles ont été suspendues et nous avons vivement incité les personnels à l'étranger en fin de mission à rentrer* », explique Philippe Gasnot, à la tête de la Direction de la sûreté du CNRS, précisant que chaque année, environ 55 000 missions ont lieu dans quasiment tous les pays du monde, y compris aux pôles. En Antarctique, les stations Concordia et Dumont d'Urville ont poursuivi leurs recherches, quand d'autres hivernants ont été rapatriés, par exemple des îles australes Crozet et Kerguelen. « *Nous avons également pris des précautions particulières, notamment de quarantaine, pour les personnels en route vers ces îles, afin de protéger la mission mais aussi ces lieux isolés* », ajoute Philippe Gasnot.

Le bilan, encore provisoire, de cette période inédite n'est pas si sombre. « *Dans la difficulté, nous avons pu saisir aussi cette sorte de parenthèse pour la tourner à notre avantage, du moins en partie. Ce temps nous a permis d'explorer ensemble, en réunion d'équipe, la bibliographie de façon plus libre et approfondie que nous ne l'aurions fait habituellement, commente Valérie Mezger. Mais on ne peut faire l'économie du présentiel.* » **II**

La station franco-italienne Concordia, en Antarctique, a maintenu ses activités pendant la crise.



© CLAUDE DELHAYE/PEV/CNRS PHOTOTHÈQUE

5. Unité CNRS/CEA/Université Grenoble-Alpes. 6. Cette expérience de physique des particules enregistre depuis 2018 les collisions électron-positron délivrées par le collisionneur SuperKEKB, situé à KEK (National Laboratory for High Energy Physics), au Japon. 7. Unité CNRS/Université de Poitiers.



© SYLVAIN LEFEVRE / GETTY IMAGES EUROPE / GETTY IMAGES VIA AFP

Une technicienne et une virologue du CNRS travaillent dans le laboratoire P3 de haute sécurité à l'Institut Pasteur de Lille, le 20 février 2020.

La recherche en ordre de marche

Le CNRS a mobilisé l'ensemble de ses disciplines, de ses ressources et de ses instruments afin d'apporter des pistes de réponse aux nombreuses interrogations sur le virus. Pour cela, il n'a pas hésité à accompagner et financer des études inédites.

Une première ligne de défense scientifique. Voilà ce que le CNRS s'est efforcé de constituer et de soutenir, face à la maladie Covid-19 provoquée par le virus SARS-CoV-2. « Il était très important pour nous d'être réactifs dans cette situation de crise et de permettre sans délai des avancées sur les pistes de recherche prometteuses », témoigne le directeur général délégué à la science du CNRS, Alain Schuhl. Tous les dispositifs du CNRS ont ainsi été mobilisés pour accompagner la recherche, de la mise en place de plateformes à la mise à disposition d'outils comme le supercalculateur Jean Zay (lire p. 10) en passant par les expertises, et, bien sûr, par le financement.

... Dès le 16 mars, l'organisme a débloqué des fonds, d'un montant global de près de 350 000 euros, pour soutenir cinq projets identifiés par l'Institut des sciences biologiques (INSB) du CNRS. À Lille, Lyon, Marseille, Montpellier et Paris, ces équipes¹ mènent des travaux complémentaires, cherchant à comprendre le fonctionnement du virus ou à développer des stratégies de lutte contre la maladie. Parmi elles, l'équipe de Bruno Canard, directeur de recherche au CNRS et spécialiste de la répllication des virus au laboratoire Architecture et fonction des macromolécules biologiques (AFMB) à Marseille. Pour ces scientifiques, l'enjeu est de comprendre comment certaines enzymes, cibles potentielles pour la mise au point de médicaments antiviraux, travaillent à fabriquer de nouveaux génomes tout en déjouant les défenses immunitaires de la cellule hôte.

Des plateformes pour coordonner les recherches

L'équipe participe également à un projet de recherche, coordonné par Jean-Hugues Renault de l'Institut de chimie moléculaire de Reims² (lire p. 31) et impliquant d'autres unités³, qui utilise le criblage virtuel à grande échelle grâce aux infrastructures nationales de calcul intensif pour identifier des molécules efficaces contre le virus. À présent financé par la région Grand Est, avec une aide de l'Institut de chimie

du CNRS, ce projet avait été retenu sur liste complémentaire de l'appel à projet Flash Covid-19 de l'Agence nationale de la recherche (ANR). Lancé le 6 mars, cet appel a vu 86 projets de recherche sélectionnés, dont 40 issus des laboratoires du CNRS et de ses partenaires, pour un budget global de 14,5 millions d'euros. De nombreuses thématiques biomédicales sont abordées, mais une large place est faite aux sciences humaines et sociales (SHS), avec 17 projets retenus pour comprendre l'épidémie, sa diffusion et l'élaboration des réponses publiques, citoyennes et sociales à la crise. Onze de ces projets sont coportés par le CNRS qui, dès le début de la crise, avec l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm) et deux alliances thématiques, Aviesan⁴ et Athena⁵, a mis en place une plateforme pour mieux coordonner les activités en SHS et en santé publique, et accompagner l'émergence de nouvelles recherches. « *Les sciences sociales ont beaucoup à dire, notamment sur la façon dont le virus révèle à la société des problématiques qui vont constituer les choix stratégiques de demain* », assure Anne-Laure Amilhat Szary, directrice du laboratoire Pacte⁶.

Le foisonnement d'initiatives en modélisation autour du Covid-19 a également poussé l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (Insmi) du CNRS à mettre en place la plateforme de coordination Modcov19⁷ (lire p. 28). Capable d'estimer le nombre de personnes asymp-

Le super-calculateur Jean Zay en action

Seize pétaflops, soit l'équivalent de 40 000 ordinateurs de bureau, c'est l'énorme puissance de calcul que le supercalculateur Jean Zay a mis à disposition de différents projets de recherche sur le Covid-19. Inauguré en septembre 2019 à l'Idris¹, ce centre de calcul intensif du CNRS, un des plus puissants d'Europe, partage ses capacités entre une partie consacrée au calcul scientifique haute performance et une

autre consacrée à l'intelligence artificielle (IA). La première est capable d'effectuer des simulations extrêmement complexes, décryptant les interactions moléculaires entre virus et cellules humaines afin de développer un traitement, voire un vaccin. Pour la seconde, l'IA aide les chercheurs à mieux diagnostiquer des

radios ou scanners de poumons, par exemple. « *La puissance de calcul offerte par Jean Zay est fondamentale pour obtenir des résultats le plus tôt possible* », commente Antonio Monari, du Laboratoire de physique et chimie théoriques².

1. Institut du développement et des ressources en informatique scientifique (CNRS). 2. Unité CNRS/Université de Lorraine.



1. Le Centre international de recherche en infectiologie (CNRS/Inserm/ENS Lyon/Univ. Claude Bernard Lyon 1), le Centre d'infection et d'immunité de Lille (CNRS/Inserm/Univ. de Lille/Institut Pasteur de Lille/CHU de Lille), le laboratoire AFMB (CNRS/Aix-Marseille Université/Inrae), l'Institut de recherche en infectiologie de Montpellier (CNRS/Univ. de Montpellier) et l'Institut de biologie de l'École normale supérieure (CNRS/ENS/Inserm). 2. Unité CNRS/Université de Reims Champagne-Ardenne. 3. Chimie et interdisciplinarité : synthèse, analyse, modélisation (CNRS/Univ. de Nantes), Laboratoire d'innovation technologique (CNRS/Univ. de Strasbourg), Matrice extracellulaire et dynamique cellulaire (CNRS/Univ. de Reims Champagne-Ardenne). 4. Alliance pour les sciences de la vie et de la santé. 5. Alliance thématique nationale des sciences humaines et sociales. 6. Unité CNRS/Université Grenoble-Alpes. 7. <http://modcov19.math.cnrs.fr>

tomatiques, de visualiser l'impact des déplacements de personnes ou encore de corriger des données prises sur un échantillon non représentatif, la modélisation apporte en effet un éclairage important à la crise actuelle. Modcov19 fait remonter tout résultat, proposition ou information d'intérêt opérationnel vers le consortium multidisciplinaire REACTing⁸ de l'Inserm sur les maladies infectieuses émergentes, activé dès janvier, et vers Care, le Comité analyse, recherche et expertise chargé par le gouvernement de donner un avis éclairé sur les propositions faites par les scientifiques.

Lancée le 18 mars, la plateforme Crowdfight Covid-19 s'efforce, quant à elle, de faire correspondre les demandes de scientifiques travaillant sur le coronavirus et les compétences de volontaires. Aujourd'hui dans le monde entier, 47 000 personnes mettent à disposition leur temps et leurs compétences pour traduire du jargon technique, annoter des images, effectuer une revue des publications pour trouver le bon protocole, etc., afin d'optimiser le temps des scientifiques. Autre collaboration : un consortium interdisciplinaire a été mis en place sur le recyclage des masques chirurgicaux et FFP2 qui doivent aujourd'hui être jetés après quelques heures d'utilisation. Il comprend le CNRS, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), l'Inserm, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) et

plusieurs universités et CHU. « *Le recyclage mérite absolument d'être mis en œuvre, car les résultats obtenus montrent qu'il existe des méthodes de recyclage microbiologiquement sûres et conservant la compatibilité des masques chirurgicaux et FFP2 avec les normes en vigueur* », explique Philippe Cinquin⁹, professeur en santé publique et praticien hospitalier, directeur du laboratoire TIMC-IMAG¹⁰ et codirecteur du Centre d'investigation clinique – Innovation technologique de Grenoble¹¹.

Le CNRS a aussi mis à disposition des scientifiques son expertise, en particulier au niveau de la protection des données, notamment personnelles, utilisées dans les diverses recherches sur le Covid-19. « *Le respect des règles en vigueur, les comportements éthiques et l'intégrité scientifique sont primordiaux pour la crédibilité de l'activité de recherche du CNRS* », rappelle, en écho aux recommandations du Comité d'éthique et de la Mission à l'intégrité scientifique du CNRS, la déléguée à la protection des données du CNRS Gaëlle Bujan, dont le service a pu accompagner toutes les demandes de projets en urgence.

En France et à l'étranger

Cette mobilisation ne s'est pas arrêtée aux frontières. L'organisme a ainsi pris part à différentes enquêtes internationales et mobilisé ses laboratoires à l'étranger. Aux États-Unis, les International Research Laboratories (IRL) du CNRS s'impliquent fortement dans la recherche sur le Covid-19 au plan médical et technologique, avec des études du microbiome nasal ou des surfaces en contact avec les virus et bactéries, le développement de microcapteurs pour détecter la maladie, ou encore des recherches sur l'interopérabilité des données médicales. Un IRL spécialisé en micromécatronique à Tokyo, au Japon, a répondu à l'appel Flash Covid de l'ANR pour des technologies de micro-fluidique capables de détecter rapidement l'ARN du virus. L'Institut français de recherche sur le Japon, installé dans la Maison franco-japonaise, a mis en ligne un site d'information suivant l'évolution de la crise et des recherches. Au Mexique, l'IRL Lafmia¹² a aussi proposé un robot mobile conçu pour des transports à l'intérieur d'un hôpital. Enfin, l'IRL LaSoL¹³ participe à une équipe de recherche sur la modélisation mathématique de la pandémie mise en place avec le Centro de Investigación en Matemáticas A.C.

De nombreux champs scientifiques ont donc été mobilisés, même parmi ceux, comme les mathématiciens, informaticiens ou physiciens, qui ne sont pas directement concernés par une crise sanitaire. Marion Maisonnobe, au laboratoire Géographie-cités¹⁴ a ainsi mis à disposition son outil en ligne Netscity pour suivre l'évolution des implications des différents scientifiques dans le monde. Une véritable nouvelle communauté scientifique s'est construite autour du Covid-19. II



© CYRIL FRESILLON / IDRIS / CNRS PHOTOTHÈQUE

Toute la puissance du supercalculateur Jean Zay a été mise à disposition de la recherche contre le Covid-19.

8. Pour REsearch and ACTION targeting emerging infectious diseases. 9. À lire sur lejournal.cnrs.fr : « Masques de protection : la piste prometteuse du recyclage », entretien avec Philippe Cinquin, 31 mars 2020. 10. Techniques de l'ingénierie médicale et de la complexité – informatique, mathématiques et applications de Grenoble (CNRS/Univ. Grenoble-Alpes/Grenoble INP/VetagroSup). 11. CIC-IT1406 Inserm/DGOS/CHU de Grenoble/Univ. Grenoble-Alpes. 12. Laboratoire franco-mexicain d'informatique et d'automatique (CNRS/Centre de recherche et d'études avancées de l'Institut polytechnique national/Conseil national de la science et la technologie). 13. Laboratoire Solomon Lefschetz (CNRS/UNAM/Conseil national de la science et la technologie). 14. Unité CNRS/Univ. Panthéon-Sorbonne/EHESS/Univ. de Paris.

Travail à distance : les premières leçons de la crise

Malgré la fermeture de la quasi-totalité des laboratoires de recherche et des bureaux administratifs, la plupart des 32 000 agents du CNRS ont pu poursuivre leur activité à distance.

Après sera-t-il comme avant ? De nombreuses interrogations ont émergé sur le changement de pratiques dans les laboratoires et dans les bureaux du plus grand organisme de recherche français. Le plan de retour à l'activité (PRA) du CNRS, mis en place par la cellule de crise et communiqué à ses 32 000 agents avant la première phase de déconfinement du 11 mai dernier, reprend toutes les mesures exigées par le gouvernement : distanciation physique, circulation en sens unique, distributeurs de gel hydroalcoolique, port de masques, etc. Alors que s'ouvre ce nouveau chantier avec les problématiques qui l'accompagnent, le mot « télétravail » est sur toutes les lèvres.

Un bilan positif mais des situations différentes

« Nous sommes à l'heure du bilan. Il s'agit de prendre le temps de regarder ce qui a bien fonctionné et les problèmes que nous avons rencontrés », explique Hugues de La Giraudière, directeur des ressources humaines du CNRS, qui préfère parler de « travail à distance » plutôt que de « télétravail » pour illustrer cette période. En effet, pendant près de deux mois, si environ 12 % des agents ont maintenu une activité essentielle sur site (recherche, maintenance d'équipements, tâches administratives) et moins de 2 % étaient en autorisation spéciale d'absence (ASA), près de 75 % des agents du CNRS – soit plus de 24 000 personnes – ont pu poursuivre leur activité à distance « à plein temps ». Mais

75 %
des agents
ont poursuivi leur
activité à distance
« à plein temps »

« nous avons vécu un télétravail dégradé, car habituellement, c'est avant tout un choix qui s'opère dans des conditions très différentes : comment travailler normalement alors qu'il faut garder ses enfants, que son conjoint ou sa conjointe exerce aussi son activité professionnelle à la maison, dans un espace de vie qui peut être restreint ? », observe-t-il.

Pour aider les personnels comme les encadrants à mieux gérer cette situation totalement inédite, la direction des ressources humaines du CNRS a rapidement élaboré un guide sur la gestion du travail à distance. « Manque de vie sociale au travail pour certains, isolement, manque de matériel adéquat : il a fallu répondre à tous ces besoins dans l'urgence », rappelle Hugues de La Giraudière. Car la pression allait arriver en parallèle sur deux fronts : porter une attention particulière aux agents en difficulté et s'assurer que tous les outils nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme étaient accessibles en ligne.

Avant le confinement, la médecine de prévention du CNRS avait déjà mis en place des consultations en ligne pour accompagner et suivre les personnes les plus à risque. « Certaines personnes ont aussi vécu très difficilement l'arrêt brutal de leurs recherches en laboratoire et la perte de mois de travail », pointe Arnaud Vasseur, médecin coordinateur national du CNRS. Dès le début du confinement et jusqu'à aujourd'hui, un psychologue du travail a été exclusivement dédié aux agents du CNRS grâce à une convention avec la Mutuelle générale de l'Éducation nationale (MGEN). Autre point de vigilance, la charge mentale souvent décuplée pour les femmes. « Renforcée en temps de confinement, l'inégale répartition des tâches domestiques et du temps consacré aux enfants, surtout quand ils n'ont pas classe, a pu rendre une partie des collègues femmes moins

“Manque de vie sociale au travail, isolement, manque de matériel adéquat : il a fallu répondre à tous ces besoins dans l'urgence.”



Deux colocataires partagent le même espace pour le télétravail pendant le confinement, à Montreuil (Seine-Saint-Denis).

© REMI DECOSTER / HANS LUCAS / HANS LUCAS VIA AFP

disponibles pour poursuivre la rédaction d'articles, leur habilitation à diriger des recherches, participer à des audio- ou visioconférences ou répondre à des appels d'offres », explique Elisabeth Kohler, directrice de la Mission pour la place des femmes au CNRS, rappelant que cela a été valable tant pour les chercheuses que pour les ingénieures et techniciennes (IT).

Déployer des outils en temps de crise

Côté administratif, la mise en place du télétravail progressif en 2019 – bénéficiant à près de 9 % des agents à raison d'une journée par semaine en moyenne – a beaucoup facilité les choses. « Imaginez les difficultés que nous aurions rencontrées si aucun processus n'avait été numérisé ! Je pense par exemple à l'application Agate pour les congés ou le dépôt des jours télétravaillés, à Ariane pour l'envoi des arrêts de travail, à Sirhus pour les dossiers annuels », ajoute Hugues de La Giraudière qui compte bien accélérer cette dynamique. Dans les délégations régionales, un système a rapidement été mis en place pour assurer la mise en paie de tous les contrats par une équipe dédiée. Si de nombreux processus juridiques et financiers ont été dématérialisés, d'autres manquent encore à l'appel tels que la signature électronique ou le traitement des missions. « C'est en cours, mais pas encore effectif. La situation exceptionnelle que nous avons vécue va nous obliger à repenser et à renforcer l'organisation du travail à distance », explique Ghislaine Gibello, déléguée régionale Provence et Corse. Mais c'est surtout du côté des réseaux que la difficulté allait arriver.

9 %
des agents
pratiquent un jour
de télétravail par
semaine, en moyenne

Jean-Marc Voltini, qui pilote la Direction des systèmes d'information (DSI) du CNRS, n'en est pas à sa première crise. « Nous avons déjà dû gérer des pics de connexions pendant les grèves de cet hiver », rappelle-t-il, faisant surtout référence à la saturation des outils de visioconférences comme MyCom ou RV/Renaviso de Renater. Pour répondre au besoin soudain et amplifié de cette période de confinement, la DSI a déployé en un temps record l'application de vidéoconférence Tixeo, qui permet à la fois la sécurité des données (impossible sur Zoom et consorts) et la compatibilité avec tous les systèmes (Windows, Mac, Linux). « Après une période de mise au point, notamment pour les Mac, nous avons pu constater que 90 % des problèmes de visio étaient liés non pas aux outils, mais aux débits internet disponibles. » Pour répondre à une autre saturation, celle des boîtes mail – deux à trois fois plus engorgées qu'en temps normal –, l'outil de chat Citadel a été largement déployé et « utilisé dans certaines directions plus que d'autres », constate Jean-Marc Voltini, conscient que l'apprentissage de son utilisation au quotidien reste à faire. Autre évidence qui ressort de cette crise : l'importance des ordinateurs portables. « On ne commandera plus de postes fixes, y compris pour les services administratifs », ajoute-t-il.

Accélérer la réflexion sur l'organisation du travail

La période de confinement a vu plus de participation aux réunions qu'en temps normal. Thomas Lautier, chercheur au Toulouse Biotechnology Institute, en détachement à Singapour, en est convaincu. « La moitié des humains rassemblée au même endroit, certes virtuel, au même moment, a été fédérateur. Cette période d'isolement a été propice à une maturation d'idées scientifiques partagées », indique-t-il.

“Le télétravail présente aussi des limites, notamment en termes de collaboration et de créativité.”

... Sur le plan national comme international, la virtualisation des conférences risque de s'accélérer, en phase avec la volonté de plus de durabilité dans le monde de la recherche et plus d'accessibilité. Au Centre international de rencontres mathématiques de Marseille, qui héberge chaque année plus de 4 500 chercheuses et chercheurs du monde entier et qui a dû annuler un mois de conférences, la réflexion sur le développement d'un système de streaming s'est accélérée et sera au centre de l'activité des mois à venir. Cette démarche touche aussi, naturellement, la formation. « *Le recours accru à la "formation à distance", qui est d'ores et déjà un des axes principaux du plan d'orientation de la formation 2020-2023, prend un nouvel essor aujourd'hui. Nous travaillons actuellement avec nos prestataires pour adapter leur offre* », explique Hugues de La Giraudière.

Si l'heure est toujours au bilan, certaines choses semblent déjà s'accélérer. Comme dans de nombreux autres secteurs, des agents qui n'avaient jamais opté pour le télétravail pourraient désormais l'installer dans leurs pratiques pour profiter des avantages rapportés suite à un questionnaire des agents du CNRS en 2019¹ : plus de concentration, moins de transports et un meilleur équilibre vie-travail, « *même si le télétravail présente aussi des limites, notamment en termes de collaboration et de créativité* », rappelle Hugues de La Giraudière.

En outre, un décret, publié le 5 mai 2020 assouplit le télétravail tel qu'il avait été défini dans le décret initial du 11 février 2016 : extension des lieux, possibilité de jours flottants annualisés, etc. « *Nous sommes en train d'engager les discussions avec les représentants du personnel pour le mettre en œuvre. Plus largement, il s'insère dans le volet RH du plan de reprise d'activités du CNRS dont les actions visent à accompagner les agents dans leur retour en présentiel, à mener une réflexion sur les nouvelles organisations du travail et à soutenir les encadrantes et encadrants dans la sortie de crise* », conclut le directeur des ressources humaines. II



© JULIE FONCY

1. https://intranet.cnrs.fr/Cnrs_pratique/recruter/Documents/20200128_TELETRAVAIL_BILAN_PLAQUETTE_VF.pdf



Impression 3 D d'armatures pour des visières de protection au Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS.

Tous solidaires face au virus

Directions, instituts et délégations du CNRS se sont engagés dans un élan spontané pour participer à l'effort de solidarité nationale. Entre dons, mises à disposition d'appareillage, production de gel hydroalcoolique et volontariat, l'organisme a pleinement joué sa part.



« On ne peut qu'être fier de voir ce qui s'est passé dans nos laboratoires », affirme Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS. En effet, depuis le début de la crise,

l'organisme a pu mesurer l'ampleur des élans de solidarité des agents, qui se sont multipliés à travers le territoire. En tout, depuis le début de la crise, les laboratoires du CNRS ont fait don de près de 1,5 million de gants, plus de 100 000 masques chirurgicaux, plus de 6 000 blouses ou encore 50 000 charlottes à des centres hospitaliers sur l'ensemble du territoire. Les laboratoires se sont également mobilisés pour adapter et produire du matériel pour les personnes en première ligne dans cette crise. « Il fallait rapidement répertorier le matériel, faire la synthèse, mettre en exergue des initiatives qui n'auraient pas été identifiées et indiquer aux laboratoires ce qui pourrait s'avérer utile. » Et le 27 mars, le CNRS créait la cellule nationale Cracov pour recenser et accom ...

20 000
visières 3D
ont été imprimées
par les laboratoires
du CNRS*

*chiffres provisoires au 18 juin 2020.

Distribution de gel hydroalcoolique fabriqué par la faculté de pharmacie de l'université de Lorraine et la délégation Centre Est du CNRS aux professionnels de santé en Lorraine et Champagne-Ardenne par l'Association Codage.



58 000
masques FFP2
...

... pagner les élans de solidarité de ses laboratoires face à l'épidémie de Covid-19. De nombreuses initiatives ont ainsi pu être analysées par Cracov, notamment *via* les réseaux métiers de l'organisme. Regroupant 13 000 personnes, ces derniers rassemblent en 22 réseaux transverses une communauté de professionnels autour d'un métier ou d'une technologie. Le réseau des électroniciens et celui des mécaniciens ont par exemple répertorié l'ensemble des plateformes d'impression 3D du CNRS et de ses partenaires, en capacité de fabriquer du matériel pour les personnels soignants. Les deux réseaux ont pu ainsi produire des visières assurant une protection mécanique utile pour les personnes exposées au virus en deuxième ligne, comme le personnel des magasins d'alimentation.

115 000
masques
chirurgicaux
...

Autre production rendue possible : des « valves », nécessaires pour adapter un masque de plongée de la marque Décathlon afin de protéger les soignants. Belle histoire de solidarité, l'adaptation de ce masque a été réalisée en dix-sept jours par un consortium éphémère. Suite à l'idée du bio-

ingénieur de l'université de Stanford, Manu Prakash, de créer un adaptateur standard (pour brancher et fixer des filtres antibactériens et antiviraux à partir de la sortie du tuba du masque), Colombar de Vargas, directeur de recherche au laboratoire Adaptation et diversité en milieu marin¹, a réussi à mettre dans la boucle l'entreprise Décathlon pour leur livrer les plans du masque EasyBreath, ainsi que l'entreprise Bic en vue de sa production industrielle. À ce jour, des milliers d'adaptateurs sont produits et livrés aux hôpitaux déjà équipés des masques offerts par Décathlon.

« Notre rôle dans la cellule Cracov a été double : confronter les besoins de l'hôpital avec ce que l'on peut faire, mais aussi mettre nos contacts industriels à la disposition des laboratoires », rapporte Alain Schuhl. En encourageant les échanges entre chercheurs et entreprises, le CNRS a vu plus grand, et surtout plus loin dans ses actions de solidarité.

Favoriser les échanges avec l'industrie

La Direction des relations avec les entreprises (DRE) du CNRS a participé à l'effort, grâce à son réseau de contacts privilégiés auprès de l'ensemble des filières industrielles. Elle a par exemple rapproché l'Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux² – qui a développé en urgence une valve trachéale pour système clos, composant essentiel d'un système de respiration artificielle installé sur les patients Covid-19 – de l'entreprise Erpro Group³. Les deux partenaires ont réussi, en deux semaines, à reconcevoir un produit équivalent à l'existant indisponible sur le marché, et à en lancer la production.

C'est également grâce à la DRE que le CNRS a pu, en collaborant avec l'entreprise Erode⁴, commander 10 000 masques

– pour lesquels il participe aux coûts de production – et les livrer à la Fédération nationale des dispositifs de ressources et d'appui à la coordination des parcours en santé (FACS). Un soutien matériel à la FACS qui faisait suite à des livraisons de gel hydroalcoolique de l'organisme. « Début avril, le CNRS a passé un accord avec la FACS afin de distribuer gants et masques de protection, et fabriquer du gel hydroalcoolique pour les soignants des villes et les aides à domicile », rapporte Jacques Maddaluno, directeur de l'Institut de chimie du CNRS.

...et
1,4 M
de gants
jetables

ont été donnés aux
personnels soignants*

*chiffres provisoires au 18 juin 2020

1. Unité CNRS/Sorbonne Université 2. Unité CNRS/Université de Bordeaux/Arts et Métiers/Bordeaux INP. 3. Entreprise spécialisée dans la fabrication de prototype et impression 3D de petite, moyenne et grande série. 4. Cette entreprise spécialisée dans la mécanique, notamment en création et fabrication d'accessoires métalliques ornementaux pour la mode, a pris la décision de réorienter sa production vers la création de visières de protection. 5. CNRS/Aix-Marseille Université. 6. CNRS/ENSL/Inserm/Université Lyon 1.

32 000
litres de gel
hydroalcoolique
ont été fabriqués
par les laboratoires *

* chiffres provisoires au 18 juin 2020

Pour ce faire, l'Institut a recensé les laboratoires qui disposaient encore d'éthanol, de glycérol et d'eau oxygénée, les trois composants principaux des gels hydroalcooliques, puis identifié les laboratoires équipés pour la production. Cela a permis

de préparer et conditionner plusieurs milliers de litres de gel que la FACS s'est chargée de distribuer en fonction des besoins, le tout aidé par Ulisse, unité de transport du CNRS. Cette dernière a en effet largement participé à l'effort de solidarité nationale. Depuis le début du confinement, l'équipe a mis en place des tournées afin d'acheminer tous les produits nécessaires, parfois dispersés sur plusieurs sites, aux laboratoires capables d'effectuer la fabrication de gel. Et si laboratoires et instituts ont rivalisé d'ingéniosité pour pallier le manque de matériel, le Laboratoire de chimie bactérienne⁵ et son directeur adjoint Axel Magalon ont mis en place la plateforme nationale #Protégeons-nos-soignants pour faciliter les contacts entre donateurs et structures de soin.

Dons et volontariat dans les délégations

Si une coordination au niveau national a accompagné la gestion de la crise, c'est bien au niveau local que de nombreuses initiatives sont nées, toujours accompagnées par les délégations du CNRS. Une large politique de recensement de matériel et de collecte de dons s'est faite au sein des dix-huit délégations de l'organisme. Alors que le Grand Est était particulièrement touché par la pandémie, les unités ont collaboré avec l'université de Lorraine pour faire face à la pénurie de matériel des personnels soignants. « Nos laboratoires et agents très investis se sont impliqués très rapidement. Au total, les universités ont collecté plus de 20 000 masques FFP1, FFP2 et FFP3, plus de 12 000 masques chirurgicaux, mais aussi 90 000 paires de gants et plus de 25 000 vêtements de protection, tels que des blouses, des charlottes et des surchaussures », rapporte Edwige Helmer-Laurent, déléguée régionale de la délégation Centre-Est.

Par-delà le matériel, les agents CNRS ont largement répondu aux présents aux appels à volontariat, qu'ils concernent la production de gel ou la réalisation de tests virologiques par PCR. À Lyon, le Centre international de recherche en infectiologie⁶ s'est imposé comme l'un des pôles de tests importants en France durant le confinement. « En collaboration avec l'ensemble des instituts du CNRS, nous avons créé une base de données d'agents volontaires et qualifiés pour réaliser ces tests », rapporte Frédéric Faure, délégué régional Rhône Auvergne.

À l'heure du déconfinement, et suite au décret ministériel du 5 avril, le CNRS et l'Inserm ont mis à disposition quarante de leurs laboratoires – dont vingt CNRS – en capacité de mener des tests de dépistage en cas de demande forte. Si dès les premières heures du confinement, plusieurs laboratoires s'étaient lancés dans la création de nouvelles procédures de tests pour soutenir un dépistage massif, cet arrêté officialise un engagement spontané des unités du CNRS. Grâce à cette initiative, 50 000 tests pourront être pratiqués par semaine sur l'ensemble du territoire. ■

Si l'épidémie et le confinement ont fait émerger de nouvelles formes de solidarité, dans la communauté scientifique et au-delà, ils ont aussi profondément bouleversé notre quotidien et nos relations sociales.

La crise et nous

Quel a été l'impact psychologique de ce « retrait » social ? Quelles répercussions sur le stress, l'activité physique, les habitudes alimentaires ou même la « consommation » d'informations ? Ces questions font l'objet de dizaines d'études lancées dans notre pays. La géographe Lise Bourdeau-Lepage, du laboratoire Environnement, ville, société¹, s'est ainsi intéressée au quotidien des Français. « Il y a un clivage avec d'un côté un confinement qui "fait du bien" et de l'autre, des précarités et des inquiétudes professionnelles et financières fortes, et des situations de profonde détresse psychologique », observe-t-elle. Selon ses premiers résultats, on apprend que 90 % des enquêtés étaient plus inquiets que d'habitude pour leurs proches et que près d'un tiers des parents ont exprimé un stress important lié aux

nécessités de faire l'école à la maison. En ce qui concerne l'alimentation, l'enquête de Catherine Darrot, du laboratoire Espace et société², Manger au temps du coronavirus³, a permis d'identifier deux comportements majeurs : d'une part une ruée de courte durée dans les grandes surfaces pour faire des stocks au début de la crise, d'autre part un repli vers les produits frais et locaux. Plusieurs études analysent aussi les conséquences des inégalités de lieu de vie sur le vécu du confinement, tandis que d'autres proposent déjà de partager nos opinions et réflexions sur un potentiel « monde d'après ».

Pour retrouver toutes les enquêtes en cours et y participer, lire l'article « Stress, travail, médias... Comment avons-nous vécu le confinement ? », sur lejournal.cnrs.fr

1. Unité CNRS/ENTPE/ENS Lyon/ENSA Lyon/INSA Lyon/Mines Saint-Étienne/Univ. Jean Moulin/Univ. Lumière /Univ. Jean Monnet. 2. Unité CNRS/Univ. d'Angers/Univ. de Rennes/Univ. de Caen Normandie/Univ. du Mans/Univ. de Nantes/Institut Agro. 3. « Quel est l'impact du confinement sur le système alimentaire ? », blog Covid-19, la parole à la science sur lejournal.cnrs.fr

© SIMON LAMBERT/HAN-REA



Balcon d'un Immeuble parisien dans le 17^e arrondissement, le 23 mars 2020.

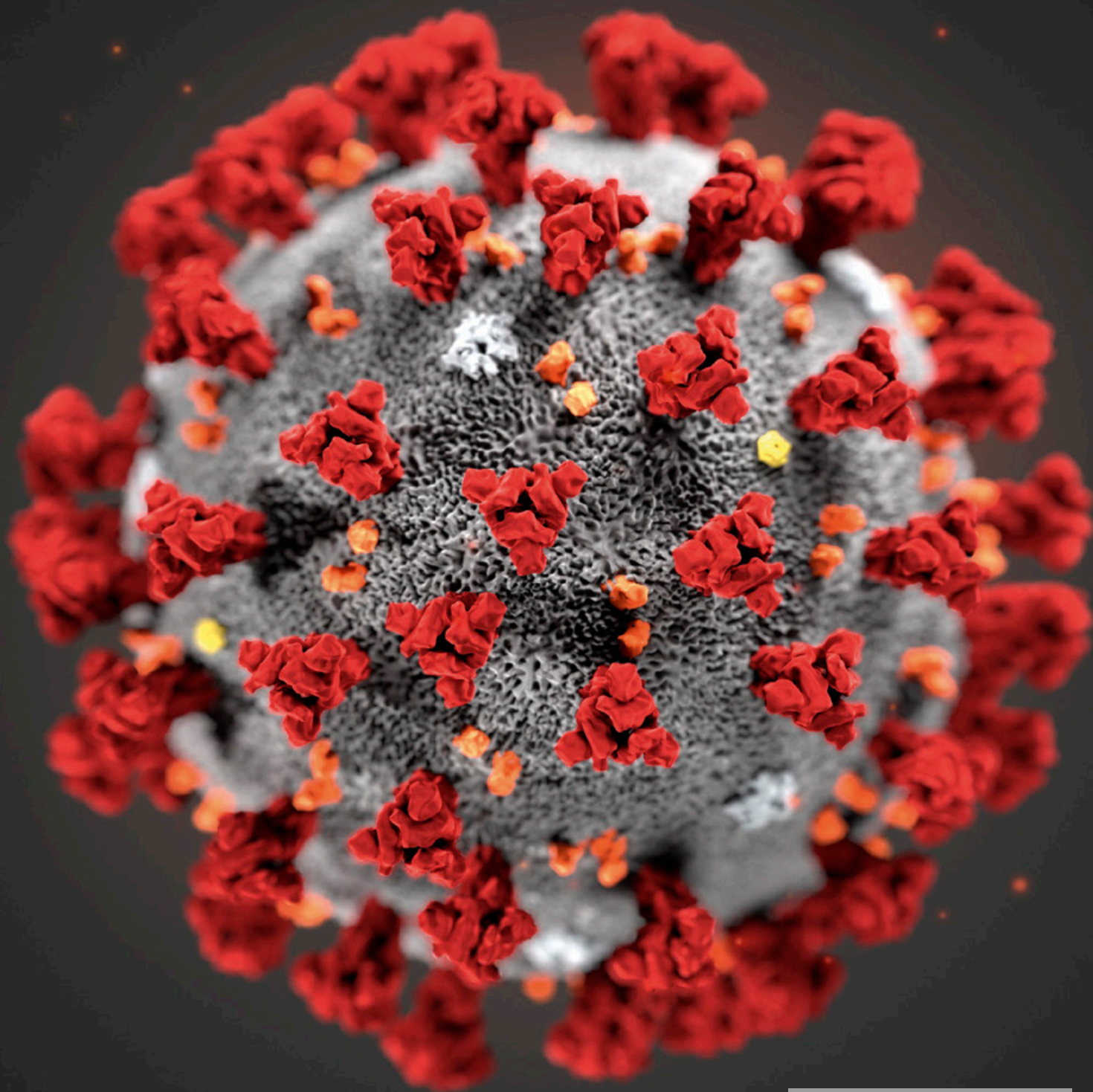


Illustration représentant le SARS-CoV-2, responsable du Covid-19. Les pics (les protéines virales Spike, en rouge) disposés en couronne à la surface des coronavirus donnent leur nom à cette famille de virus.

VIVANT



Face à la pandémie et à l'urgence sanitaire, comment travaillent les biologistes, et en particulier les virologues, dont le champ d'études s'inscrit généralement dans le temps long de la recherche ? État des lieux d'une discipline poussée par l'actualité sous les projecteurs.

PAR MARTIN KOPPE

C'est une mobilisation à l'ampleur totalement inédite. En quelques mois, des milliers de scientifiques, partout sur la planète, ont réorienté en urgence leur activité, leur savoir et leurs instruments à l'étude du nouvel ennemi numéro 1 : le virus SARS-CoV-2, responsable de centaines de milliers de morts. À la clé, déjà, des milliers de publications scientifiques... des connaissances qui se sont accumulées, des lueurs d'espoirs mais aussi des mystères qui persistent et résistent encore à l'investigation (*lire p. 21*). Les virologues sont particulièrement à pied d'œuvre, leur discipline couvrant un vaste champ d'études pour comprendre les virus.

Situés à la frontière du vivant, parfois même qualifiés d'objets biologiques, les virus ont un impact extrêmement fort sur les organismes, végétaux comme animaux. Ce qui les différencie des autres créatures microscopiques, telles que les bactéries, les protozoaires ou les champignons ? « *Les virus sont des parasites absolus, ils n'ont pas d'autre choix que de rentrer dans une cellule pour se répliquer*, explique Yves Gaudin, directeur de recherche CNRS et responsable d'équipe au sein du département de virologie de l'Institut de biologie intégrative de la cellule¹. *Ils dépendent strictement du métabolisme de cet hôte.* » Incapables de synthétiser leurs propres protéines, les virus doivent en effet détourner à leur profit la machinerie interne des cellules.

La virologie étudie ces parasites capables de muter et de franchir les barrières entre espèces, des travaux ciblant les virus les plus dangereux à un instant T, mais qui ont également la lourde tâche d'essayer d'anticiper les épidémies futures.

De la molécule à l'organisme

Pour cela, les virus sont scrutés à différentes échelles : moléculaire, cellulaire, dans l'organisme et, dans le cas d'épidémie, dans l'écosystème ou la société tout entière. Au niveau moléculaire, les chercheurs déterminent la structure du virus et de ses protéines. Les protéines virales constituent en effet des cibles thérapeutiques à bloquer pour empêcher le pathogène de pénétrer dans les cellules ou de s'y répliquer. Ces travaux utilisent des équipements de biologie structurale comme la résonance magnétique nucléaire (RMN) ou

la cryo-microscopie électronique (cryo-ME), une technique dont les récents progrès ont grandement facilité les études des virologues et des microbiologistes.

Au niveau cellulaire, les scientifiques se concentrent sur les interactions entre un hôte et le parasite qui tente de détourner sa machinerie interne. « *Les cellules disposent par ailleurs de leur propre système immunitaire, qui leur permet de savoir qu'elles sont en train d'être infectées*, détaille Yves Gaudin. *Elles produisent alors des protéines antivirales : les interférons et les facteurs de restriction. C'est un axe de recherche très important dans la crise actuelle.* » En effet, les virus dont le génome est constitué d'ARN (acide ribonucléique), comme le VIH, celui de la rage, de la grippe et le SARS-CoV-2, peuvent bloquer ces réponses cellulaires.

...

1. Unité CNRS/CEA/Université Paris-Saclay.

... Dans l'organisme, virus et cellules infectées ne sont pas isolés. L'approche physiopathologique prend en compte la présence de macrophages et de lymphocytes, ainsi que de tout l'organisme touché. Un environnement *a priori* nuisible pour le virus, mais qui peut également se retourner contre le malade. « *SARS-CoV-2 dérègle fortement le système immunitaire*, souligne Yves Gaudin. *Il peut provoquer ce qu'on appelle une tempête de cytokines.* » Protéines chargées de marquer les cibles pour le système immunitaire, les cytokines sont alors relâchées en de telles quantités qu'elles entraînent une inflammation généralisée, fatale en l'absence de traitement (lire ci-dessous). Un phénomène qui se retrouve chez d'autres virus à ARN, comme celui de la dengue, et qui est soupçonné d'être en partie responsable de l'énorme mortalité de la grippe espagnole.

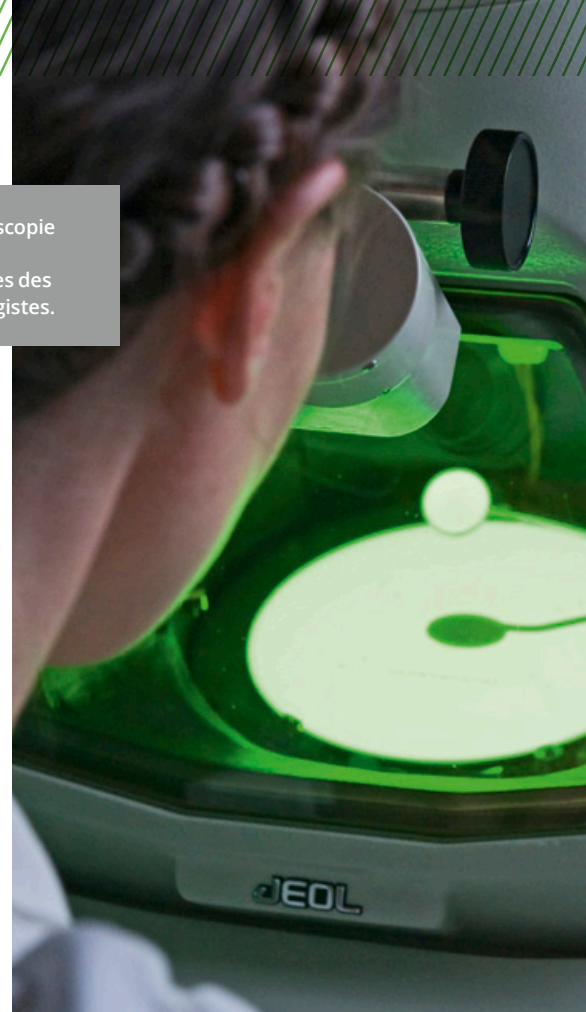
Enfin, l'épidémiologie examine et modélise la propagation des virus à l'échelle des populations (lire p. 26). Cela part du moment où ils franchissent les barrières entre les espèces, jusqu'à l'établissement de mesures politiques pour freiner et endiguer la maladie. À cette échelle, les sciences humaines peuvent être appelées en renfort.

La virologie ne s'intéresse cependant pas qu'aux agents pathogènes. La plupart des virus nous sont inoffensifs et n'en sont pas moins importants à étudier. « *On considère les virus comme les méchants, mais ils ont toujours coexisté avec les cellules et participé à l'évolution de la vie sur Terre*, rétablit Chantal Abergel, directrice de recherche CNRS et directrice du laboratoire Information génomique et structurale². *Sans eux, pas de mammifères ! C'est en effet une protéine d'origine virale qui a permis à nos ancêtres de développer le placenta, et donc de ne plus avoir à pondre d'œufs.* »

Le permafrost et les virus géants

La recherche sur les virus réserve bien des surprises. Chantal Abergel a participé à la découverte, avec son collègue Jean-Michel Claverie, d'un des tout premiers virus géants connus. Celui-ci était resté congelé pendant 30 000 ans dans le permafrost sibérien. Les virus géants avaient échappé aux scientifiques à cause d'une filtration systématique des échantillons qui ne les laissaient

Les progrès de la cryo-microscopie électronique (cryo-ME) ont grandement facilité les études des virologues et des microbiologistes.



pas passer. Ainsi, alors que le virus influenza, causant la grippe, possède une dizaine de gènes, on en compte jusqu'à 2 500 chez les pandoravirus (des virus géants capables de fabriquer leurs propres gènes, indépendamment de l'évolution). « *Les virus pourraient représenter une voie métabolique abandonnée*, s'enthousiasme Chantal Abergel. *Comme s'ils avaient perdu la compétition face au monde cellulaire et que le parasitisme était devenu leur seule solution.* »

Intérêt supplémentaire de la recherche, la capacité des virus à cibler très précisément certaines cellules peut être détournée pour les thérapies géniques. Yves Gaudin utilise ainsi le rhabdovirus³ de la stomatite vésiculaire (VSV) pour attaquer des cellules cancéreuses. D'autres virus, dits « bactériophages », ne visent que des bactéries, ils ne sont pas dangereux pour les humains et pourraient ainsi servir à éliminer les bactéries devenues résistantes aux antibiotiques. Certaines enzymes virales, comme la reverse transcrip-

Anne Goffard
virologue

À écouter sur
lejournald.cnrs.fr



Les tempêtes immunitaires

« L'évolution de la maladie est étonnante, avec une infection possible en deux phases. La première, virale, dure quelques jours pendant lesquels le virus se réplique dans l'organisme, provoquant fièvre, douleurs, etc. Dans les cas les plus graves, que l'on va retrouver en réanimation, une seconde phase se développe : une réaction inflammatoire disproportionnée, appelée orage cytokinique, responsable de détériorations pulmonaires, rénales, cardiaques, etc. »



BENOIT RAJAULPSCONIS PHOTO THÉQUE

tase, sont devenues des outils classiques de la biologie moléculaire. Enfin, les chercheurs utilisent les virus pour explorer les fonctions cellulaires, ils observent les interactions qu'ils développent au sein des cellules infectées afin de mieux comprendre certaines machineries et voies de signalisation de l'hôte.

Cerner la variation génétique

Directeur de recherche au CNRS et directeur adjoint du laboratoire Architecture et fonction des macromolécules biologiques (AFMB)⁴ à Marseille, Bruno Canard est spécialiste des virus à génome ARN, une famille qui provoque Ebola, le chikungunya ou la dengue, mais qui inclut aussi les coronavirus. « Les coronavirus, explique-t-il, sont connus depuis les années 1950 mais la communauté scientifique a commencé à produire des résultats significatifs avec l'avènement de la biologie moléculaire dans les années 1990. ...

SARS-CoV-2 se dévoile peu à peu

Le coronavirus du syndrome respiratoire aigu sévère, dont la forme SARS-CoV-2 sévit actuellement, est apparu lors d'une première épidémie en 2002-2003. « En 2002, nous ne connaissons la structure tridimensionnelle que d'une seule de ses protéines, mais nous en avons décrit une quinzaine depuis et seules quelques-unes restent à identifier, explique Bruno Canard, directeur adjoint du laboratoire AFMB à Marseille. Nous avons presque fait le tour des protéines et de leurs structures individuelles, mais on ne sait toujours pas comment elles s'assemblent les unes avec les autres pour fonctionner. »

Le virus se réplique en effet grâce à de véritables usines moléculaires, qu'il construit dans les cellules infectées avec ses protéines. D'autres mécanismes sont encore mal connus, comme l'adjonction de la coiffe, un nucléotide chargé de protéger l'ARN viral, et surtout le principe du maintien de la stabilité génétique.

« Le virus se réplique avec une enzyme très imprécise, la polymérase, avance Bruno Canard. Les erreurs doivent donc être ensuite régulées, et l'hélicase joue un rôle qui n'est toujours pas connu dans ce phénomène. »

Tous ces éléments sont pourtant nécessaires afin de mieux choisir les médicaments, et ne tester que ceux qui s'attaquent à des processus vitaux pour le SARS-CoV-2. Le génome du virus a également été séquencé pour remonter son horloge moléculaire, c'est-à-dire la succession et l'histoire de ses mutations et de ses formes. « On trouve des isolats de virus que l'on séquence, puis on suppose sur les mutations, détaille Bruno Canard. Il reste cependant la possibilité que la mutation en question soit apparue seulement après une sélection au sein du patient. » La puissance de diversité du virus est elle aussi encore mal

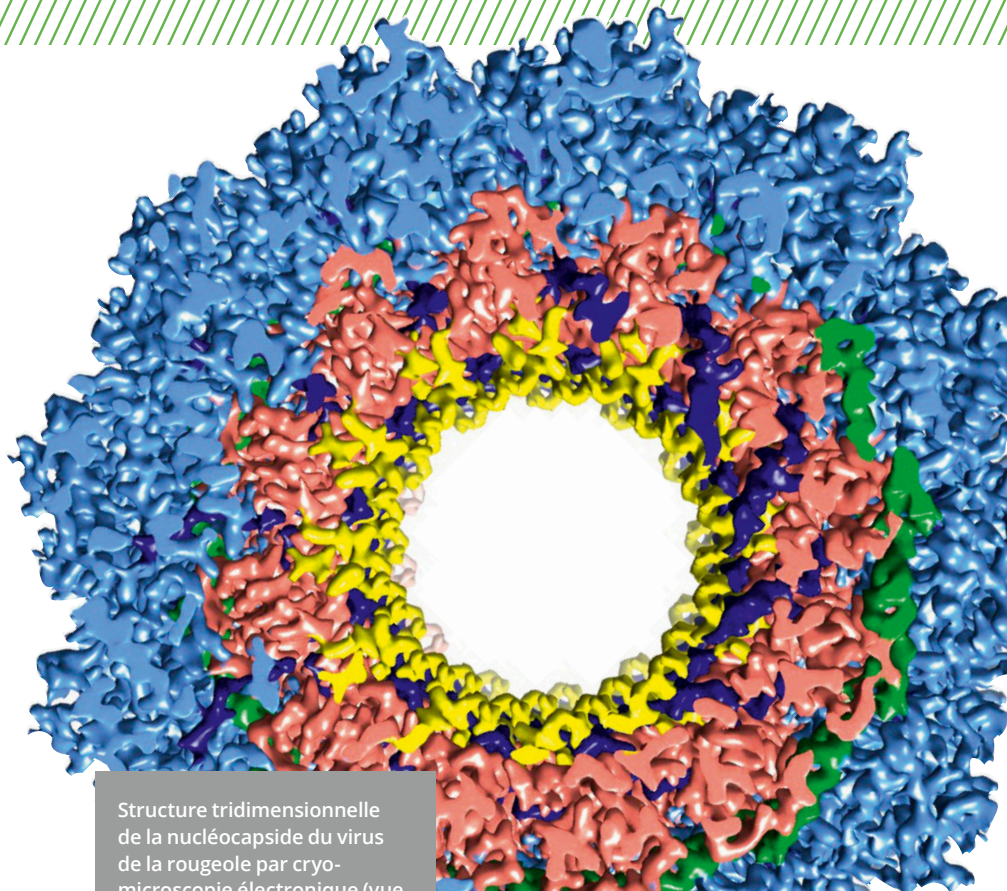
connue : existe-t-il des milliards de variations qui sont ensuite sélectionnées et réduites à un

petit nombre, ou sont-elles restreintes dès le début ? C'est un paramètre très important pour les traitements et les vaccins, qui doivent absolument cibler une zone du virus qui change peu. Sinon, celui-ci va muter et sélectionner ses versions résistantes. Quant à l'évolution de sa contagiosité, Bruno Canard estime que le virus est déjà suffisamment optimisé. « Sa protéine Spike a vingt fois plus d'affinité avec les protéines humaines qu'avec celles des chauves-souris ! »

Enfin, au niveau clinique, le site internet Covid-NMA répertorie environ 3000 études, dont un millier d'essais randomisés. « Pour l'instant, rien de spectaculaire n'a été observé lors des essais cliniques, souligne Bruno Canard. Il faut travailler sur de nouvelles molécules et pistes pour améliorer les traitements. »

... Dans mon domaine, la première structure tridimensionnelle d'une protéine a été réalisée en 2002 par Rolf Hilgenfeld. Elle passe totalement inaperçue, car le virus (le TGEV) n'est pas médiatique : il donne des gastro-entérites aux porcs d'élevage... En revanche, cette structure permet à Rolf Hilgenfeld de réaliser très rapidement la structure de la première protéine du virus du SRAS, la protéase principale, en 2004. Il se trouve que ce type d'enzymes, les protéases virales, sont des cibles intéressantes pour la conception de médicaments. De notre côté, nous avons réalisé la première structure originale d'une protéine du SRAS quelques mois après, en 2004. »

Ces agents infectieux présentent en général un génome réduit et, comme l'ARN est moins stable que l'ADN, ils mutent et évoluent plus rapidement. Certaines de ces erreurs dans la copie génétique pourraient nuire au fonctionnement du virus, mais SARS-CoV-2 possède une enzyme, l'exonucléase, qui répare les défauts les plus importants. « Contrairement aux protéines présentes sur l'enveloppe des virus, sans cesse en lutte contre le système



Structure tridimensionnelle de la nucléocapside du virus de la rougeole par cryomicroscopie électronique (vue de dessus), qui permet de visualiser la protéine centrale.

© GRÉGORIE EFFANTIN/UJF/IBS/CNRS PHOTOTHÈQUE

immunitaire, l'appareil de synthèse de l'ARN du virus varie peu, avance Bruno Canard. Il est en effet davantage soumis aux lois de la thermodynamique et de la cinétique, ses marges de manœuvre réduites en font une cible idéale. » Enrayer cet appareil par des médicaments constitue d'ailleurs la stratégie employée avec succès dans des traitements antiviraux contre le VIH, l'hépatite C ou l'herpès.

Les stratégies de vaccination



Bruno Pitard
biologiste

À écouter sur
lejournald.cnrs.fr

« Il existe quatre stratégies qui ont déjà fait leurs preuves par le passé.

> 1. L'inactivation du virus lui-même. C'est une stratégie classique et maîtrisée, utilisée par exemple pour la grippe saisonnière. Le virus est produit à grande échelle en laboratoire puis inactivé par différents procédés, chimiques ou autres, avant d'être réinjecté à l'individu à vacciner.

> 2. L'utilisation de la protéine S (Spike), par laquelle le virus interagit avec la cellule hôte. Cette stratégie de vaccin

sous-unitaire implique de produire uniquement la protéine S en fermentation (génie génétique) à grande échelle. Le vaccin est utilisé en associant cette protéine avec un adjuvant pour booster la réponse immunitaire.

> 3. L'utilisation de l'information génétique. La séquence codant la protéine S étant connue, il est possible d'utiliser une stratégie de vaccination par acide nucléique. Il s'agit d'utiliser un autre virus, connu et maîtrisé, pour transporter la séquence à l'intérieur des cellules de la personne à vacciner.

Celles-ci vont alors produire la protéine S, qui va à son tour induire la production de cellules immunitaires pour lutter contre cette protéine.

> 4. La réalisation d'un assemblage supra-moléculaire avec la séquence codant la protéine S, par des procédés physiques ou des molécules chimiques, afin de s'en servir comme d'un cheval de Troie pour pénétrer les cellules. Celles-ci vont alors produire la protéine S immunogène, et induire la production d'anticorps et de lymphocytes T spécifiques. »

Aucun virus ne doit être négligé

La variation génétique virale est un problème auquel Roland Marquet, directeur de recherche CNRS au laboratoire Architecture et réactivité de l'ARN, est confronté. Il étudie le VIH et le virus influenza, qui a la particularité d'être segmenté en huit parts, assimilables à des chromosomes viraux. Or si deux virus influenza différents infectent une même cellule, ils peuvent réassortir leur matériel génétique et répliquer un virus hybride. Un phénomène qui leur permet d'évoluer extrêmement rapidement et de générer des viraux au pouvoir pandémique élevé.

Comprendre les mécanismes de réassortiment génétique est ainsi un enjeu important. « La recherche en viro-

logie doit rester la plus large possible, insiste Roland Marquet. *On ne peut pas prédire quels virus vont passer des animaux à l'homme. Si on regarde les pandémies des XX^e et XXI^e siècles, elles ont toutes été causées par des virus de la grippe ou, comme le sida, par un rétrovirus. Si on se cantonne à ceux qu'on pense les plus importants, on se retrouve démunis lorsque c'est un coronavirus qui frappe.* » « Nous devons absolument comprendre la physiologie de tous les virus, abonde Chantal Abergel. SARS-CoV-2 n'est ni le plus infectieux ni le plus mortel, je ne sais pas comment nous pourrions réagir si un nouveau virus bien plus dangereux apparaît. »

Soutenir la recherche en virologie

Face à l'épidémie en cours, l'Agence nationale de la recherche a lancé une procédure pour soutenir 86 projets contre SARS-CoV-2. Depuis le laboratoire Microbiologie moléculaire et biochimie structurale⁵, Lauriane Lecoq coordonne l'un d'eux où elle observe, par résonance magnétique nucléaire, les interactions entre différentes molécules et la protéine ORF8 du virus. Des informations cruciales pour mieux orienter la recherche de médicaments. Lauriane Lecoq procède déjà ainsi pour les virus de l'hépatite B, l'hépatite D et de la dengue, dont elle étudie tout particulièrement les protéines de capsid. Ces protéines s'assemblent pour former une couche protectrice, parfois sphérique, autour de l'ADN ou de l'ARN du virus. Lors de la contamination d'une cellule, la capsid et son enveloppe y pénètrent et la capsid relâche les éléments infectieux dans le noyau. Cette protéine est donc une cible pharmaceutique majeure.

Malgré toutes ces pistes d'intérêt et l'importance de pouvoir combattre les épidémies, de nombreux virologues estiment que leur discipline n'a pas été suffisamment soutenue au cours des dernières décennies. « Nous manquons d'agences spécifiques pour les virus émergents, regrette Bruno Canard. Des travaux abondants sont faits sur leur séquençage, mais nous

Les secrets du génome



Isabelle Imbert
biologiste

À écouter sur
lejournel.cnrs.fr

« Avec un génome très long, 30 000 nucléotides, et 16 protéines non structurales impliquées dans le processus de réplication, les coronavirus occupent une place à part dans la famille des virus à ARN et représentent un terrain complexe à étudier. Afin de maintenir une telle longueur de génome, ces virus expriment une activité enzymatique acquise au fur et à mesure de l'évolution, impliquée dans un système de correction des erreurs lors de la réplication. Comprendre comment fonctionne cette activité ARN polymérase ARN-dépendante en ferait une cible de choix pour de futurs traitements. »

avons besoin de connaître leurs mécanismes d'entrée dans les cellules, leurs mécanismes de réplication et leurs interactions avec le système immunitaire. Trop peu d'équipes se consacrent à ces sujets. La cryo-microscopie électronique a permis une véritable révolution en biologie structurale, mais nous en sommes encore trop peu équipés en France. »

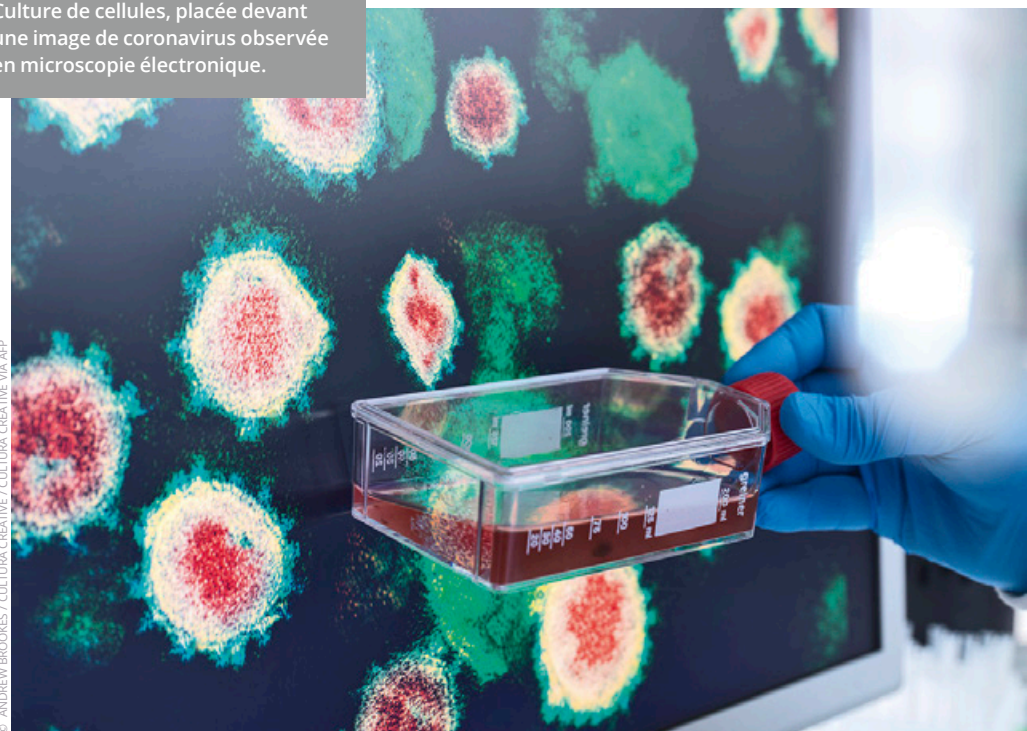
« La recherche fondamentale en virologie doit être soutenue, insiste aussi Lauriane Lecoq. On ne peut pas décider d'où va l'argent seulement en fonction de l'actualité, il faut une vision sur dix à

vingt ans. Même des virus qui ont déjà un vaccin ou un traitement efficace, comme les hépatites B et C, peuvent muter. » Tout cela contribue au paradoxe d'une discipline riche et cruciale, mais vers laquelle on ne se tourne souvent que dans l'urgence. « La science fondamentale sérieuse, indépendante, réfléchie, collégiale est notre meilleure assurance contre beaucoup de fléaux », conclut Bruno Canard. II



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

Culture de cellules, placée devant une image de coronavirus observée en microscopie électronique.



© ANDREW BROOKES / CULTURA CREATIVE / CULTURA CREATIVE VIA AFP

5. Unité CNRS/Université Claude Bernard Lyon 1.

Un test salivaire ultra-rapide pour le dépistage

VIVANT 

Innovation. Baptisé EasyCov, ce test portable développé en un temps record par les chercheurs du laboratoire montpelliérain Sys2Diag donne un résultat en moins d'une heure.

PAR LAURE CAILLOCE

Fini les écouvillons enfoncés dans les fosses nasales, les robots qui tournent pendant des heures dans les laboratoires d'analyses médicales et les litres de réactifs engloutis. Depuis le 15 juin, un test révolutionnaire permet de diagnostiquer sur le terrain et (presque) instantanément les patients atteints du Covid-19 : baptisé EasyCov, ce test portable demande quelques gouttes de salive, un tube à essai, et moins d'une heure de chauffe à 65 °C pour livrer son résultat... Petite fierté : il a été développé au sein du laboratoire Sys2Diag, un laboratoire qui associe des chercheurs CNRS et des chercheurs des entreprises Alcediag et SkillCell (groupe Alcen), sous la houlette du biologiste Franck Molina. De quoi accélérer et massifier encore la stratégie de tests préconisée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) depuis le début de la pandémie.

À ce jour, 200 000 kits sont produits chaque semaine et commercialisés en France via le groupe de laboratoires de biologie médicale Inovie. À peine mis sur le marché, EasyCov intéresse déjà les sportifs de haut niveau, et des pays d'Asie et d'Amérique du Sud sont sur les rangs pour se le procurer. « Avec un test de terrain rapide, quatre à cinq fois moins cher que les tests actuels, on peut tester des passagers avant qu'ils n'embarquent dans un avion ou un bateau, par exemple, ou envisager de tester régulièrement les résidents et personnels des Ehpad », indique Franck Molina. Son déploiement chez les médecins de ville ou le développement futur d'un autotest réalisable à la maison dépendent maintenant du cadre que fixeront les autorités de santé.

La salive, un milieu hostile

« À l'origine, Sys2Diag n'est pas spécialisé dans la détection virale, raconte le biologiste. Notre cœur de métier est la mise au point d'outils de diagnostic innovants, et jusqu'à présent nous avons surtout travaillé dans le domaine de la psychiatrie, avec un test permettant de déceler les dépressions profondes et les risques de passage à l'acte, et dans le domaine des machines cellulaires – des cellules artificielles qui se comportent comme de petits ordinateurs et sont par exemple capables de repérer le prédiabète dans les urines d'un patient.

Mais quand l'épidémie de Covid-19 s'est accélérée en France et que les tensions sur les tests et les réactifs ont commencé à se faire sentir, nous nous sommes dit que nous devons tenter quelque chose, en nous appuyant sur les technologies et les briques que nous avons déjà utilisées. » C'est ainsi que, la veille du confinement et alors que tout le laboratoire s'apprête à se mettre en télétravail, la décision est prise par l'équipe de se lancer dans le développement d'un test salivaire.

« L'idée était de faire un test léger et facile d'usage, pour arrêter d'acheter de grosses machines qui consomment beaucoup de réactif, raconte Franck Molina. Nous voulions également éviter d'aller chercher du virus au fond des fosses nasales – une opération qui peut se révéler douloureuse pour le patient, et risquée pour le soignant, car le prélèvement peut provoquer une gêne chez le patient et un éternuement. » Or où trouve-t-on du virus en grande quantité, ailleurs que dans les sécrétions nasales ? Dans la salive. « Un choix risqué, que nous sommes les seuls au monde à avoir fait. Car la salive, pleine d'enzymes, de bactéries et de cellules, est connue pour être un important perturbateur biologique. »

Comme les tests classiques, EasyCov traque l'ARN du virus – ce dernier ne possède en effet pas d'ADN, raison pour laquelle il a besoin d'un hôte pour pouvoir transcrire son ARN en ADN et se reproduire. Mais le choix technologique fait par Sys2Diag pour y parvenir est radicalement différent. « Les tests employés par les laboratoires d'analyses, dits "RT-PCR", fonctionnent en trois étapes et par cycles



© SYLVAIN THOMAS / AFP

► Le test se lit en moins d'une heure. Jaune, il est négatif, rouge, positif.

successifs de températures différentes, détaille Franck Molina. D'abord, ils extraient l'ARN du virus, puis ils le transcrivent en ADN, enfin ils amplifient cet ADN, jusqu'à ce que la quantité d'ADN soit suffisante pour permettre la lecture. Notre test utilise une technologie assez ancienne mais peu connue appelée "RT-lamp", qui permet de tout faire à la fois : les enzymes que nous utilisons fonctionnent simultanément et réalisent toutes les opérations en même temps, à une température unique de 65 °C. »

« De la biochimie fine », de l'aveu même du chercheur, qui requiert généralement deux à trois ans pour aboutir à un produit commercialisable, plutôt que deux à trois mois. « Nous avons dû surmonter toutes sortes de galères pour y arriver, confie le biologiste. Mais le plus difficile, ça a été d'obtenir des réactifs pour pouvoir faire nos manipulations. Nous avons lancé des commandes partout en Europe, qui arrivaient au compte-gouttes... » Sans compter quelques sueurs froides, comme cette semaine d'avril où les tests réalisés par le laboratoire sont soudain devenus tous positifs ! « On a compris après coup que c'est le réactif qu'on avait reçu d'un de nos fournisseurs qui était lui-même contaminé par le virus, mais ça nous a mis un sacré coup au moral. »

La confiance de l'industriel

Une chose est sûre : il lui aurait été impossible de mener l'aventure à bien sans l'aide de tout un écosystème. « Quand les réactifs nous ont manqué, des laboratoires montpelliérains ont rouvert leurs portes pour nous en fournir.

La région Occitanie a effectué plusieurs milliers de précommandes d'un test dont on n'était pas encore sûr qu'il aboutirait un jour. Quant à la délégation régionale du CNRS, elle s'est mise en quatre pour nous aider, établissant des contrats à plus de minuit pour obtenir du virus atténué en urgence. » Et cela alors que tout le monde, équipes de Sys2Diag comprises, était confiné à la maison. « Au début, j'étais le seul à venir au laboratoire, pour des visioconférences, poursuit Franck Molina. Je suis en effet l'un des douze membres du comité de chercheurs (Care) qui conseille le gouvernement sur les tests, vaccins et thérapeutiques. Le reste de l'équipe était à distance et s'occupait des commandes de réactifs, des contrats, et de mille autres choses. Puis un chercheur m'a rejoint, puis deux, puis trois, jusqu'à nous retrouver à dix au laboratoire. Nous commandions des repas que nous mangions au labo, car aucun d'entre nous n'avait le temps de faire des courses ! »

Mais la clé ultime du succès d'EasyCov, Franck Molina en est convaincu, c'est le partenariat public-privé dont il a bénéficié : « pour développer et industrialiser un test en trois mois à peine, il ne suffit pas d'inventer quelque chose dans un labo, il faut y associer rapidement les volets clinique et industriel. Quand on a les trois ensemble, on va vite et on y arrive ! » Les tests cliniques ont été réalisés entre avril et mai sur 133 patients du CHU de Montpellier, tandis que le partenaire industriel SkillCell débutait les démarches pour lancer la fabrication au plus vite. « Ils nous ont fait confiance, alors que rien n'était encore validé », rappelle le chercheur. ▀



© JOM ARIYA/STOCKADOB.COM

Rarement le monde n'aura guetté avec autant d'attention les travaux des modélisateurs. Depuis le début de la crise, chaque jour a drainé son lot de projections sur la durée, le nombre de victimes ou la possibilité d'un rebond de l'épidémie. Mais comment aborder ces outils scientifiques et médicaux qui ne sont pas conçus, à la base, pour éclairer le grand public ? Comment sont-ils construits ?

« Les modèles d'épidémies sont généralement de deux types : agrégés, à l'échelle des populations, ou distribués, à l'échelle des individus », explique Éric Daudé, géographe et directeur de recherche CNRS au laboratoire Identité et différenciation de l'espace, de l'environnement et des sociétés¹. Ils vont ainsi du peu précis, mais pratique aux grandes échelles, au très détaillé qui ne décrit qu'un contexte très spécifique. Les modèles développés au départ dans le cadre du Covid-19 entrent dans la première catégorie, où des équations différentielles décrivent l'évolution de l'état de quatre genres de population : Saine, Exposée, Infectée et Remise (Seir). Les volumes de ces groupes changent en fonction de la dangerosité du virus et des moyens mis en œuvre pour lutter contre le fléau.

La contamination joue d'abord sur trois critères : le nombre de contacts entre individus sains et infectés, la facilité qu'a le pathogène à se transmettre lors de ces contacts et la durée pendant laquelle les patients sont infectieux.

Ce modèle de base peut être amélioré selon les scénarii envisagés, en intégrant les mouvements de population, les expositions différenciées, les tranches d'âge... « Ces modèles macroscopiques sont assez parcimonieux, c'est-à-dire qu'ils utilisent peu de paramètres, calibrés au fur et à mesure que l'on connaît mieux la maladie », précise Éric Daudé. Ils reposent en revanche sur des hypothèses très simplifiées.

La seconde catégorie, les modèles distribués, opte pour des approches informatiques qui décrivent cette fois-ci des individus et des comportements. Une méthode plus lourde, privilégiée lorsque les variations environnementales et sociales sont déterminantes dans l'émergence et la propagation de la maladie, ce qui est notamment le cas des maladies transmises par des vecteurs, comme des moustiques ou des puces. Ces modèles permettent par exemple de guider les actions de désinsectisation à l'échelle de quartiers, voire de rues, dans des villes vastes et complexes comme Delhi, en Inde ou Bangkok, en Thaïlande.

Des modèles face à l'inconnu

Si ces modélisations sont utilisées depuis longtemps et ont fait leurs preuves, on peut se demander ce qu'elles valent face à un virus très mal connu. « L'épidémiologie a l'avantage d'obéir d'abord aux lois de la physique », insiste Samuel Alizon, épidémiologiste et directeur de recherche CNRS au



Comment sont conçus les modèles des épidémies

VIVANT

NUMÉRIQUE

Épidémiologie. Depuis des mois, le monde scrute les projections concernant l'évolution de l'épidémie de Covid-19. Trois experts nous éclairent sur la science derrière ces modèles et les précautions à prendre concernant leurs interprétations.

PAR MARTIN KOPPE



Lire l'intégralité des articles
sur lejournel.cnrs.fr

laboratoire Mivegec². On obtient les données à partir des courbes d'incidence hebdomadaires des nouveaux cas et le suivi des contacts fournit l'intervalle sériel : le temps entre l'apparition des symptômes chez une personne et leur survenue chez ceux qu'elle a infectés. Un paramètre qui nécessite, en pleine épidémie, de retrouver des couples infectant-infecté dans la population. » Le modèle est ensuite calibré avec l'affinement des statistiques et des connaissances existantes, par exemple celles tirées de l'épidémie de SRAS de 2003. Pour les premiers stades des épidémies, les modèles stochastiques, c'est-à-dire basés sur le hasard, sont privilégiés. En effet, un petit groupe de personnes porteuses contamine les gens de manière très aléatoire. À partir d'un certain moment, la loi des grands nombres prend le dessus : on peut alors considérer que le taux de contamination est le même pour tout le monde. Les chercheurs se tournent alors vers des modèles déterministes, qui permettent de prévoir l'apparition des pics et de jauger les différentes stratégies de contrôle.

Les modèles aident aussi à mieux comprendre le virus. En comparant les prédictions aux statistiques du terrain, les scientifiques repèrent les paramètres qui expliquent les éventuelles différences. Ils en tirent des informations qui

leur échapperaient sinon et affinent leurs modèles. « La plus grosse difficulté n'est pas tant de découvrir quels sont les mécanismes de propagation, mais de connaître les conditions initiales de l'épidémie », précise Éric Daudé.

Des outils issus de publications particulièrement fondamentales sont cependant disponibles pour améliorer les simulations. Jean-Stéphane Dhersin, membre du Laboratoire analyse, géométrie et applications³ et directeur adjoint scientifique de l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (Insmi) du CNRS est ainsi ...

L'immunité de groupe



Samuel Alizon
épidémiologiste

À écouter sur
lejournel.cnrs.fr

« Si elle semble être la solution la plus rapide pour sortir d'une épidémie, l'immunité de groupe pose des questions éthiques, pratiques et techniques. En effet, pour y parvenir, les deux tiers de la population doivent avoir été contaminés et surtout, guéris. Elle repose aussi sur un double pari : que l'immunité générée par une infection soit suffisante et qu'elle dure assez longtemps. »

1. Unité CNRS/Université Le Havre Normandie/Université Caen Normandie/Université Rouen Normandie.
2. Maladies infectieuses et vecteurs : écologie, génétique, évolution et contrôle (CNRS/IRD/Univ. de Montpellier). 3. Unité CNRS/Université Sorbonne Paris Nord.

... spécialisé dans des modèles mathématiques très théoriques. Avec l'augmentation de la puissance de calcul et du traitement des données, ses travaux ont pu être appliqués. Il s'est alors progressivement intéressé aux problèmes de génétique des populations puis aux épidémies.

L'importance du R zéro

Le mathématicien a simplifié certains modèles, démontrant que des outils accessibles offraient des résultats suffisamment proches des modèles plus lourds et complexes. Ainsi, le processus de Bienaymé-Galton-Watson, conçu à l'origine pour surveiller... la survivance des noms de la noblesse britannique, est un modèle stochastique utilisé au début des épidémies. « Vous avez quelqu'un qui se reproduit avec un taux appelé R zéro (R_0), qui devient le nombre moyen de personnes infectées par un malade dans le cas des épidémies », détaille Jean-Stéphane Dherisin. Quand R_0 tombe en dessous de 1, l'épidémie recule. Ce R_0 peut être diminué par le confinement d'une population, comme nous en avons fait l'expérience, ou en renforçant l'immunité collective par le biais de la vaccination lorsque celle-ci est disponible.

Les modèles existants ne sont pas forcément rédigés à destination du grand public. « L'important est de bien prendre en compte la sensibilité aux hypothèses des modèles, conseille Samuel Alizon. Les modèles sont toujours issus d'une simplification de la réalité. Ensuite, il faut prêter attention aux intervalles de confiance et ne pas se concentrer uniquement sur la médiane. » En effet, si on lit que 2 % des personnes infectées vont décéder, mais que la marge d'erreur est de seulement un point de pourcentage, le nombre final varie en réalité... entre moitié moins et moitié plus. II

À lire sur le site du CNRS : « MODCOV19 : la modélisation pour mieux lutter contre la pandémie », entretien avec Jean-Stéphane Dherisin et Emmanuel Royer, directeurs adjoints scientifiques de l'Insmi.

En mars, l'Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions (Insmi) du CNRS a lancé la plateforme Modcov19¹. Son but : coordonner les actions impliquant de la modélisation autour de la maladie Covid-19. Rapidement, plusieurs centaines de réponses sont parvenues, issues des communautés des mathématiques, de la physique, de la biologie, de l'informatique, des sciences de l'environnement, de l'ingénieur ou des sciences humaines et

Une plateforme pour coordonner les compétences en modélisation

sociales. Les résultats et outils susceptibles d'éclairer la décision politique sont ensuite transmis à Care, le Comité analyse, recherche et expertise chargé par le gouvernement de donner un avis éclairé sur les propositions faites par les scientifiques.

1. <https://modcov19.math.cnrs.fr/>

Sciences numériques versus Covid-19

NUMÉRIQUE

SOCIÉTÉS

Informatique. Des spécialistes du numérique se sont mobilisés pour mettre les outils qu'ils développent en temps normal au service de la lutte contre la pandémie. Illustration avec ces trois projets proposés dans le cadre de la plateforme Modcov19.

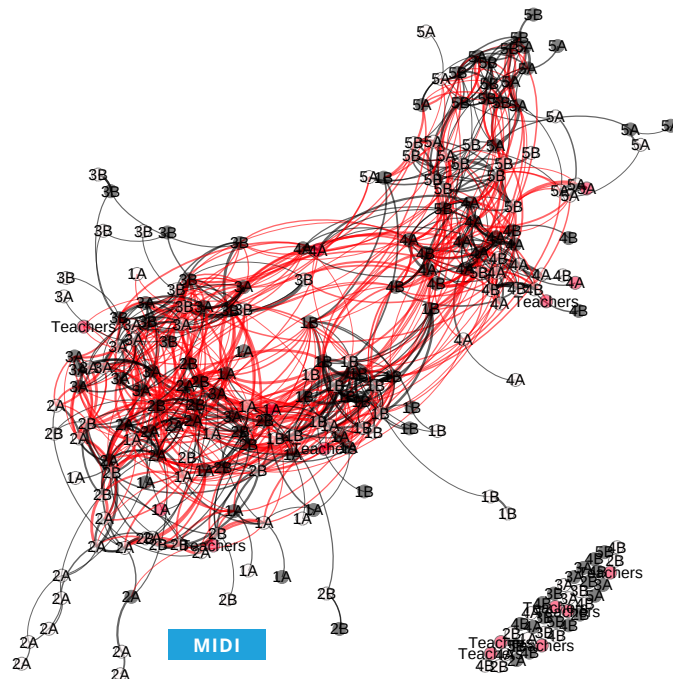
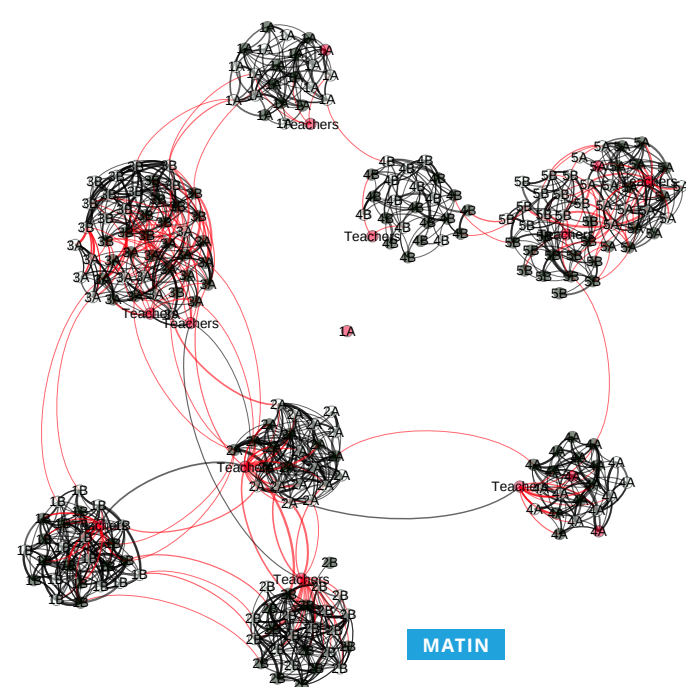
PAR MATHIEU GROUSSON

À l'Institut de recherche en informatique fondamentale¹, Claire Mathieu et ses collègues Laurent Viennot et Vincent Cohen-Addad ont très vite eu l'idée que leurs travaux sur les graphes pourraient avoir un intérêt pour étudier la propagation du virus à l'échelle des petites structures sociales : famille, école, entreprise... « Un graphe est un réseau de points appelés nœuds, reliés par des liens, explique Claire Mathieu. Dans le cadre d'une épidémie, chaque nœud représente une personne et chaque lien entre deux nœuds matérialise une interaction sociale entre deux individus. On se donne une probabilité pour la transmission du virus lors d'une interaction, à partir de quoi on peut étudier la façon dont l'infection se propage. »

Par des modélisations similaires, les chercheurs ont par le passé étudié la façon dont une information se propage au sein d'un groupe. Il en ressortait que pour la diffuser au mieux, il fallait privilégier les individus très connectés, ainsi que ceux appartenant à plusieurs communautés. À l'inverse, ce serait eux qu'il faudrait isoler en premier pour contenir une épidémie.

Des graphes pour le déconfinement

Si les scientifiques ont commencé en exploitant les données collectées en 2011 au sein d'une école primaire par des physiciens dans le cadre du projet SocioPatterns², soit la totalité des interactions de l'ensemble des élèves et enseignants pendant deux jours, ils visent la modélisation de réseaux représentatifs de différentes situations, dans une famille, un hôpital ou une entreprise. L'idée est de lier entre eux les différents graphes correspondants afin de comprendre par quels « chemins » passe une épidémie. « Nous pourrions peut-être aider à éclairer la réflexion sur les différents scénarii de déconfinement étudiés à l'échelle d'une ville ou d'un quartier, en indiquant concrètement quels sont les liens les plus pertinents à maintenir inactifs », envisage l'informaticienne.



Graphes montrant l'évolution des contacts entre élèves (en rouge) de classes différentes, le matin et à midi.

Direction à présent le Gipsa-lab³ de Grenoble, où Didier Georges est spécialiste des systèmes à dynamique spatio-temporelle qu'il modélise notamment pour la surveillance de systèmes naturels ou industriels complexes. Entouré d'autres scientifiques, il propose un modèle de la pandémie qui permettrait de suivre son évolution avec une résolution allant de la commune à l'ensemble du territoire. « À l'échelle de communautés réduites, l'idée est d'utiliser des modélisations multi-agents où les interactions sociales entre individus sont reproduites par une série de règles comportementales auxquelles on ajoute une part de hasard, détaille le chercheur. Le comportement d'une population et l'évolution de l'épidémie sont alors analysés à une échelle macroscopique ; de la même manière que les équations de la mécanique des fluides, à grande échelle, considèrent un liquide ou un gaz comme un milieu continu, sans modéliser le comportement de chaque molécule. »

Les chercheurs ont consacré une part importante de leur temps à collecter les données de santé publique nécessaires à la mise en œuvre du modèle. À terme, l'objectif est aussi d'en faire un outil de surveillance, capable d'alerter sur les risques de redémarrage de l'épidémie. « Ce type d'approches est par exemple utilisé dans l'industrie pour anticiper des pannes, ou encore dans le cadre de la prévention des incendies de forêt », complète Didier Georges.

Des modèles pour optimiser les coûts

« Les algorithmes que nous élaborons permettent d'allouer une ressource en fonction d'un objectif et de contraintes propres au problème posé », explique de son côté Samson Lasaulce, spécialiste en optimisation pour l'aide à la décision au Centre de recherche en automatique de Nancy⁴. Dans le cas du marketing, il peut s'agir de distribuer un budget publicitaire entre différents influenceurs afin d'assurer qu'une marque touche

un maximum de clients potentiels. « De la même manière, on peut se demander quelles sont les règles de confinement optimales à appliquer sur une zone géographique (dates de début et de fin, et intensité) en fonction d'un coût économique et sanitaire global sur l'ensemble du territoire. » Ainsi, avec ses collègues Vineeth Varma et Constantin Morescu, ils ont planché sur un modèle permettant de déterminer un calendrier de confinement optimal en fonction d'un ratio donné entre perte économique et coût sanitaire. À partir de là, « notre algorithme balaie toutes les possibilités afin de déterminer celle qui permet un coût minimal », précise l'informaticien.

Les scientifiques ont ainsi pu évaluer de combien aurait pu être réduit le coût sanitaire et économique si le confinement avait débuté en France dès les premiers jours de mars. Samson Lasaulce commente : « Il ne s'agit pas là de critiquer une décision politique prise dans un contexte de grande incertitude, mais de montrer comment, notre outil peut aider à optimiser une décision lorsque l'objectif est clairement identifié. » Pour aller au-delà d'un résultat rétrospectif, les chercheurs travaillent sur une nouvelle version de leur algorithme permettant de prendre en compte des niveaux de décision distincts, comme un ensemble de pays aux stratégies différentes ■

La logistique en temps de crise



Christian Artigues
informaticien

À écouter sur
lejournel.cnrs.fr

« La recherche opérationnelle, héritage de la Seconde Guerre mondiale, s'est mobilisée pour aider à la résolution de problèmes logistiques, cruciaux en période de crise. Avec des modèles génériques basés sur les formalismes mathématiques assez particuliers et précis comme les graphes, on peut par exemple optimiser les distributions de masques, ou les transferts de patients entre hôpitaux en fonction des ressources disponibles, comme les respirateurs. »

1. Unité CNRS/Université de Paris. 2. <http://www.sociopatterns.org>. 3. Grenoble image, parole, signal automatique (CNRS/Université Grenoble-Alpes). 4. Unité CNRS/Université de Lorraine.

Les données des réseaux sociaux mobilisées

Un accord entre le Facebook et l'université Paris sciences et lettres (PSL) permet à des chercheurs d'accéder à certaines données du réseau social. Lesquelles ?

Jamal Atif¹ : Ce sont des données de mobilité des utilisateurs du réseau, c'est-à-dire des informations statistiques sur le déplacement des personnes. Cela rejoint la démarche de Google qui a ouvert des données issues de Google Map. Avec cet accord, l'université PSL et ses partenaires, dont le CNRS, très mobilisés sur le Covid-19, devient la première université française à avoir accès à ces données. Celles-ci sont agrégées à des échelles spatiales qui ne compromettent pas la vie privée des utilisateurs, point sur lequel nous sommes très exigeants.

Que faites-vous de ces données de mobilité ?

J. A. : Elles sont croisées avec les données sanitaires, issues des hôpitaux par exemple. L'ensemble de ces données permet de construire des modèles prédictifs ancrés spatialement qui, en complément de modèles plus globaux, permettent de comprendre la dynamique de la pandémie et d'évaluer les politiques sanitaires.

SOCIÉTÉS

NUMÉRIQUE



© DR.

Informatique.

Pour mieux comprendre la dynamique de la pandémie, Facebook a mis à disposition des chercheurs certaines données de ses utilisateurs, mais sans compromettre leur vie privée. Explications avec Jamal Atif, spécialiste en science des données.

PROPOS RECUEILLIS PAR MATHIEU GROUSSON



© ROMAIN GALLAUD/REA

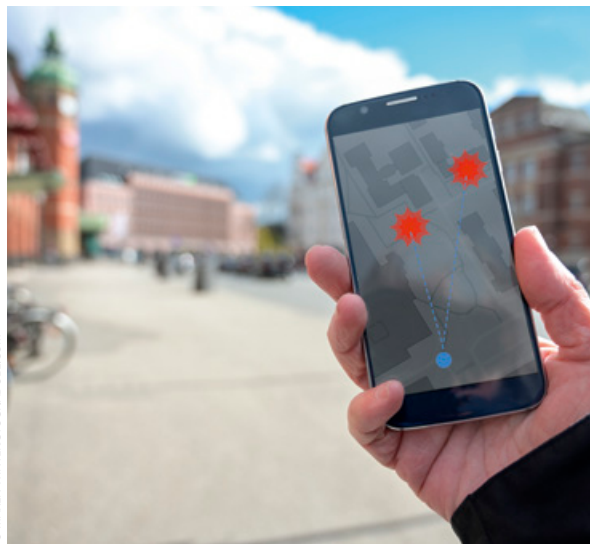
► Illustration montrant la géolocalisation des habitants de Paris.

À quelle échéance fonctionnent ces modèles ? Quels sont vos premiers résultats ?

J. A. : Nous essayons de prédire si, ici ou là, l'activité du virus sera augmentée ou diminuée dans les deux semaines suivantes. Début juin, les données à notre disposition et nos modèles confirment sa faible activité. Mais c'est maintenant que notre travail devient le plus crucial. Le but est bien sûr d'obtenir des signaux très précoces d'un éventuel redémarrage de la pandémie. Nos analyses des données de mobilité ont aussi montré que les Français ont bien respecté le confinement.

Quels sont les facteurs aggravant de la pandémie : les déplacements des personnes ou la densité de la population ?

J. A. : C'est un sujet qui nous préoccupe en ce moment suite à une question d'une personnalité de la cellule de crise sanitaire. Selon nos premières analyses, qui restent à confirmer, la densité semble peser un peu plus que la mobilité une fois que la pandémie est installée. Mais au début de celle-ci, il semblerait que ce soit l'inverse. II



► Une application de traçage sur smartphone (illustration).

1. Professeur à l'université Paris-Dauphine, membre du Laboratoire d'analyse et modélisation de systèmes pour l'aide à la décision (CNRS/Université Paris-Dauphine) et chargé de mission Science des données et intelligence artificielle à l'Institut des sciences de l'information et de leurs interactions du CNRS.

1,5 milliard de molécules passées au criblage virtuel

VIVANT



NUMÉRIQUE

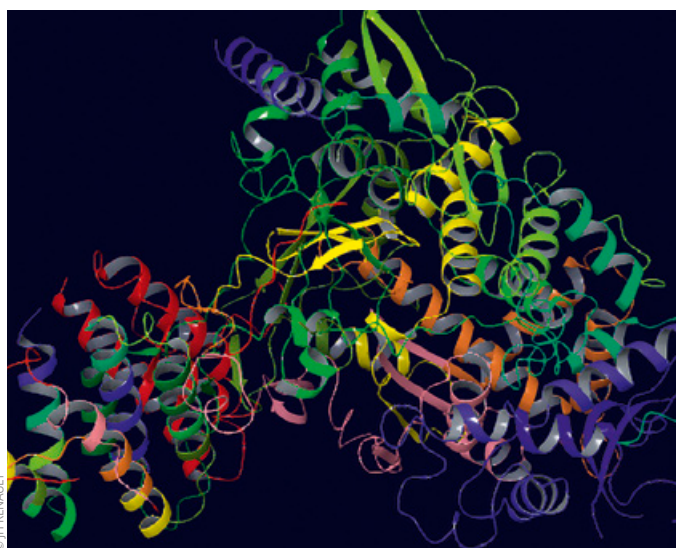


Chimie. Des scientifiques français ont monté un projet pluridisciplinaire de criblage virtuel à grande échelle afin d'identifier des candidats susceptibles d'inhiber le SARS-CoV-2.

PAR JONATHAN RANGAPANAICKEN

Un réseau de chimistes, biophysiciens, biologistes, informaticiens et médecins s'est structuré en seulement une semaine. Leur but : cribler virtuellement 1,5 milliard de molécules, c'est-à-dire les tester à l'aide de l'intelligence artificielle (IA), d'ici à dix-huit mois. « *L'originalité de notre approche "virtuelle", c'est de coupler une échelle ultralarge de criblage avec les connaissances du virus de biologistes et de médecins. Car ensuite, les candidats potentiels seront synthétisés, purifiés et testés "en vrai"* », explique Jean-Hugues Renault, directeur de l'Institut de chimie moléculaire de Reims¹ et porteur du projet.

Pour lui, c'est du jamais vu : en un temps record, le projet appelé HT-Covid² a mobilisé six laboratoires, un CHU et plusieurs grandes infrastructures de recherche dont la plateforme ChemBioFrance du CNRS, dédiée au criblage haut-débit. Et surtout, trois centres de calcul français qui mettent à disposition jusqu'à 115 000 processeurs et 1,5 pétaoctet (soit 1,5 million de gigaoctets) de stockage. Le CNRS finance une partie du projet ainsi que la région Grand Est. Et à l'heure actuelle, plusieurs centaines de millions de molécules ont déjà été criblées. « *Pour lutter contre le SARS-CoV-2, il y a trois possibilités : trouver un vaccin, piocher dans la pharmacopée existante ou trouver de nouvelles molécules ayant une activité*



antivirale. C'est dans ce troisième cas que notre criblage virtuel ultralarge entre en jeu », résume Jean-Hugues Renault. L'originalité réside dans une double approche du criblage virtuel permettant d'explorer un « espace chimique » extrêmement large.

Deux stratégies de criblage

D'un côté, 250 000 composés existants et répertoriés dans des bases de données ou des collections comme celle de la Chimiothèque nationale, sont testés *in silico* (par ordinateur) sur plusieurs cibles protéiques connues et pertinentes du virus. « *Chaque semaine, de nouvelles données sur la structure du virus sont*

publiées », se réjouit le chercheur. En parallèle, un criblage virtuel ultralarge est mené sur une seule cible : 1,5 milliard de structures moléculaires, conçues par IA et pouvant être synthétisées rapidement par des robots, sont testées sur l'ARN polymérase ARN dépendante à l'origine de la réplication du virus. Une étude croisée des résultats des deux approches permettrait d'obtenir une sélection de 500 candidats pour la prochaine étape : la fabrication de ces molécules et leur évaluation biologique.

➤ À l'origine de la réplication du virus, cette ARN polymérase ARN-dépendante sera la cible des molécules conçues par IA.

Une méthodologie transposable

Pour Jean-Hugues Renault, « *il n'y aura pas nécessairement de miracle en dix-huit mois, il s'agit d'une approche interdisciplinaire qui comporte des aspects de recherche fondamentale.* » Mais cette nouvelle méthodologie vient compléter les démarches académiques ou industrielles, et surtout, elle pourrait être transposée à l'identification pour d'autres pandémies. Les données produites par le projet HT-Covid seront en accès libre. Une manière aussi d'affirmer que la sortie de cette crise devra être une opportunité pour faire évoluer les pratiques, même au sein de la recherche. II

1. Unité CNRS/Univ. de Reims Champagne-Ardenne. 2. Le projet HT-Covid a été retenu sur la liste complémentaire de l'appel Flash Covid-19 de l'Agence nationale de la recherche 2020. Retrouvez la liste des partenaires du projet sur lejournel.cnrs.fr.



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

L'éthique de la recherche en situation de crise sanitaire



© CC. LEBEDINSKY/CNRS PHOTO THÈQUE

Par Jean-Gabriel Ganascia¹, président du Comets (comité d'éthique du CNRS) et professeur à Sorbonne Université.

SOCIÉTÉS

L'éthique et l'intégrité scientifique constituent-elles un luxe dont on pourrait se passer en situation de crise ? Éléments de réponses dans cette analyse de Jean-Gabriel Ganascia.

Dans la crise sanitaire du Covid-19, les décideurs ne sauraient construire une politique réaliste sans le secours des scientifiques. Et l'urgence expliquerait que l'on déroge exceptionnellement à certaines règles de la recherche. Mais la quête inconditionnelle de vérité chez les scientifiques et le souci de l'éthique l'interdisent.

Tout d'abord, les exigences de rigueur ne se discutent pas, même dans l'urgence, car les voies d'accès à la vérité demeurent identiques. Une science qui ne respecterait pas ces critères conclurait sur des résultats erronés qui risqueraient d'éconduire les décideurs et de tromper la population en masquant l'ampleur et la nature du danger. Ainsi, la communication faite autour des effets thérapeutiques de certains traitements médicaux, sans preuve scientifique irréfutable, a-t-elle laissé espérer l'existence d'un remède immédiat à un certain nombre de personnes qui se sont mises en danger pour l'acquiescer, et a pu désorienter les responsables politiques.

Pour éviter de tels écueils, il faut respecter les règles de l'expérimentation et se soumettre aux procédures d'évaluation par les pairs qui garantissent la fiabilité de la démarche scientifique. Contrairement à ce que certains allèguent, cela ne ralentit pas nécessairement la diffusion de la science car il est toujours loisible de déposer des prépublications sur des archives ouvertes et de les diffuser à toute la communauté scientifique ; voire d'essayer de raccourcir les délais d'évaluation des articles scientifiques, à condition de conserver la même exigence de rigueur.

L'éthique de l'expérimentation reste un impératif

Quant à l'éthique de l'expérimentation, en particulier de l'expérimentation humaine, elle demeure un impératif. Les principes cardinaux de la bioéthique – bienfaisance et non malfaisance, autonomie de la personne et justice – introduits dans le rapport Belmont² en 1979, ne souffrent aucune dérogation. On ne saurait administrer un traitement qui n'améliorerait pas la santé. En parallèle, il faut toujours s'assurer que les médicaments n'ont pas d'effets indésirables et, dans cette dernière éventualité, que le bénéfice l'emporte. L'expérimentation clinique, avec ses différentes phases³, est là pour s'en assurer.

Il est arrivé, dans des situations exceptionnelles comme lors de l'épidémie de sida, que l'on court-circuite certaines de ces phases et que l'on administre des antirétroviraux non autorisés en France à titre dit compassionnel, lorsqu'il n'existait aucune alternative. Mais, cela ne se fait qu'à titre individuel et ne saurait se généraliser à l'ensemble de la population. Cette entorse légitime à l'application des grands principes n'autorise pas n'importe quel manquement, en particulier que l'on expérimente



1. Chercheur au LIP6 (Unité CNRS/Sorbonne Université), expert en intelligence artificielle, apprentissage machine et sciences cognitives, il est aussi spécialiste en philosophie computationnelle, humanités numériques et éthique des nouvelles technologies. 2. <https://www.hhs.gov/ohrp/regulations-and-policy/belmont-report/read-the-belmont-report/in>



© FRANK RUMPFHORST/STUTZ/IMA PRESSZUMAVIRA

sur des populations vulnérables, comme ce fut le cas aux États-Unis avec l'étude de l'université de Tuskegee sur la syphilis réalisée sur des patients noirs pauvres.

Une communication scientifique plus rigoureuse

Il serait donc inacceptable d'évaluer un futur vaccin contre le Covid-19 en Afrique – où il n'y a ni masque, ni traitement, ni réanimation – comme l'ont suggéré deux chercheurs français. Au nom de l'autonomie de la personne, on doit quoiqu'il arrive solliciter le consentement éclairé des patients inclus dans une expérimentation clinique. Enfin, en vertu du principe de justice sociale, on doit mettre les ressources à égale disposition de l'ensemble de la population, sans discrimination d'aucune sorte.

Par ailleurs, pour que la population accepte les mesures sanitaires, il faut les expliquer afin qu'elle en comprenne le bien-fondé. Une communication scientifique sobre, claire et rigoureuse pour dissiper les idées fausses et aider à appréhender les connaissances nouvelles s'impose. Il appartient donc aux scientifiques de se manifester dans les médias pour rétablir, dans la mesure du possible, la véracité des faits et la signification des connaissances. Cette tâche apparaît d'autant plus ardue que les théories scientifiques sont complexes et que, dans le monde égalitaire dans lequel nous vivons, tout argument d'autorité qui ne se fonderait que sur la compétence de celui qui l'émet, sans pédagogie et sans explication plausible, paraît insupportable.

Certains en profitent pour faire valoir des postures dissidentes extrêmement populaires parce que reposant sur des explications simples, faciles à comprendre et répondant à des aspirations répandues, sans pour autant

➤ Sous les yeux des journalistes, des chercheurs travaillent à un vaccin contre le coronavirus dans un laboratoire de haute sécurité (Allemagne).

procéder à des études scientifiques rigoureuses. Des rumeurs réitérées font par exemple état d'une fabrication humaine soit intentionnelle, soit accidentelle du virus. Même si la validité de telles hypothèses a été fortement remise en cause par de nombreux scientifiques, leur subsistance dans l'esprit du public demeure. Lorsque ces théories erronées sont susceptibles d'induire des comportements dangereux, les scientifiques doivent faire œuvre de pédagogie pour rétablir la vérité ; c'est là encore un impératif éthique difficile à assumer.

Pour une éthique de responsabilité

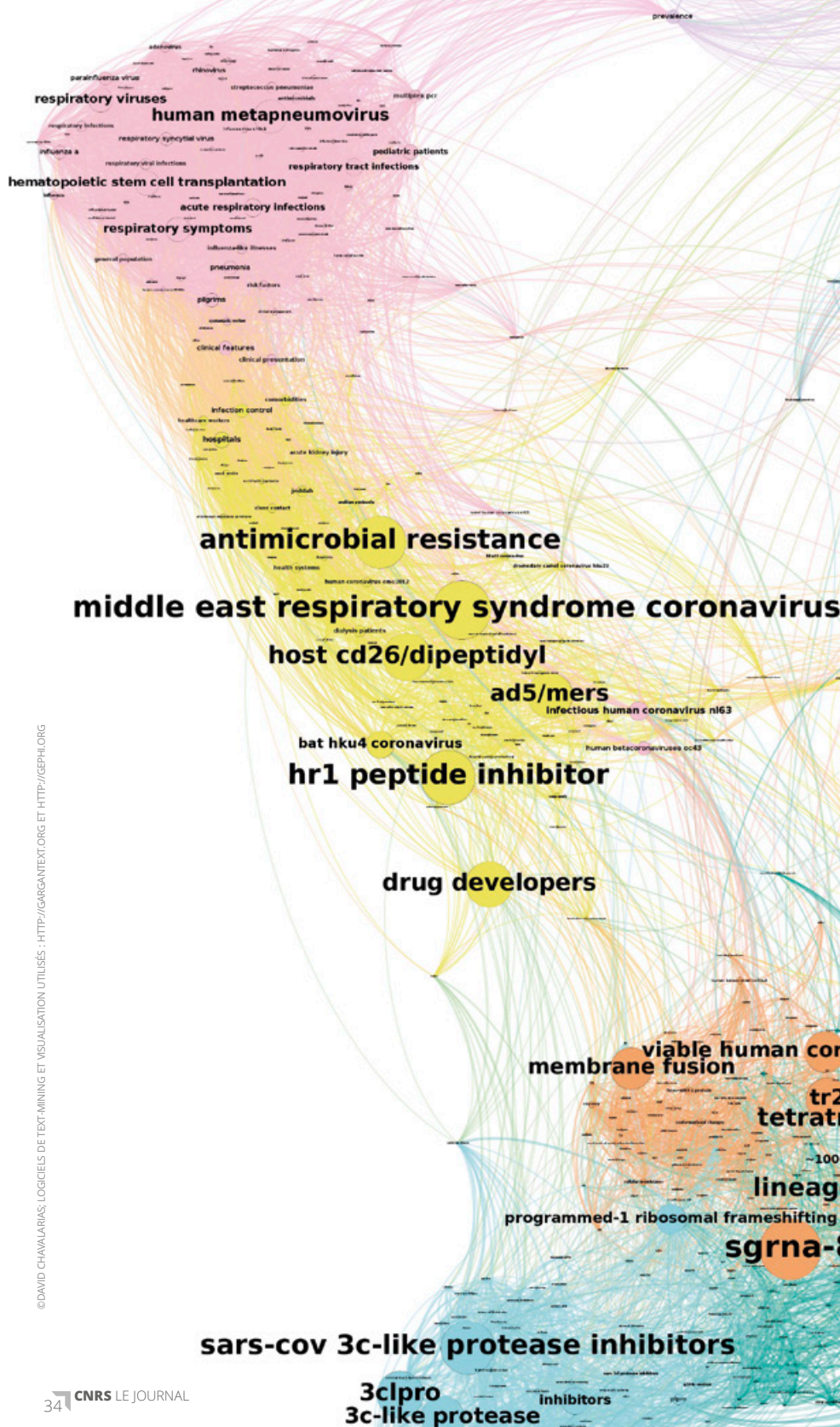
L'éthique en sciences part souvent de principes généraux. En temps usuel, il arrive que des scientifiques s'engagent vigoureusement pour les défendre, en s'opposant, par exemple, à la surveillance de l'État afin de protéger la vie privée. De telles prises de position exclusives peuvent être salutaires lorsqu'elles aident à lutter contre les abus ; elles relèvent alors de convictions personnelles et, à ce titre, d'une éthique individuelle légitime. Néanmoins, en temps de crise, la défense de grands principes ne suffit plus ; les scientifiques doivent aussi assumer leurs responsabilités en mesurant les conséquences de leurs engagements. Ainsi, s'il paraît important de protéger l'intimité de la vie privée, cela ne doit pas se faire au détriment de mesures de surveillance nécessaires à la protection de la santé publique. À cet égard, si une surveillance électronique pouvait éviter un rebond de l'épidémie, il serait coupable de s'y opposer au nom de principes généraux de protection de la vie privée. Dans le même temps, il serait essentiel, au nom de ces mêmes principes, de s'assurer que la surveillance demeurera limitée dans le temps, que le recueil d'information restera ciblé et proportionnel à des besoins clairement exprimés, que les données personnelles acquises seront effacées une fois la crise passée et enfin que les mesures privatives de liberté seront réversibles, en sorte que l'on soit assuré de pouvoir réactiver au terme de la pandémie des lois conformes aux aspirations de la société.

En temps de crise majeure, les scientifiques doivent abandonner les éthiques de conviction pour adopter une éthique de responsabilité. Cela ne signifie nullement qu'il faille abandonner les grands principes, mais cela veut dire que ceux-ci doivent être mis en regard les uns des autres et examinés dans le contexte actuel avec le souci permanent des conséquences immédiates de leur application. **II**

Ce texte a été élaboré à partir d'échanges entre son auteur et des membres du Comité d'éthique du CNRS, mais ne saurait constituer une position de ce comité.

 lire l'intégralité du point de vue sur lejournal.cnrs.fr

3. Phase préclinique comprenant des expérimentations *in vitro* et sur des animaux ; phase 1 pour vérifier la tolérance et l'absence d'effets indésirables sur des volontaires sains ; phase 2, sur des patients, pour déterminer la dose minimale efficace ; phase 3 d'étude comparative ; et enfin phase 4 de suivi à long terme des effets secondaires.



Le coronavirus en un coup d'œil

SOCIÉTÉS



NUMÉRIQUE



Informatique. L'Institut des systèmes complexes de Paris Île-de-France a publié plusieurs cartes construites à partir de l'analyse automatisée de l'ensemble des publications scientifiques sur le sujet. Son directeur David Chavalarias nous explique leur intérêt.

PROPOS RECUEILLIS PAR JULIEN BOURDET

dans le réseau). Les termes associés sont reliés entre eux par des lignes. On voit alors clairement apparaître, sous la forme d'amas de différentes couleurs, des thématiques de recherche portées par des communautés particulières (le coronavirus chez l'homme, chez le porc, les symptômes de la maladie, etc.).

À titre d'exemple concret, nous avons réalisé, le 11 avril, une carte sur l'ensemble des essais cliniques de traitements contre la maladie Covid-19 recensés par l'Organisation mondiale de la santé. Elle peut aider à coordonner les recherches en offrant une vision synthétique des pistes explorées par les essais cliniques en cours et passés, les combinaisons de traitements et les résultats attendus ou observés. On pourra ainsi tenter de nouvelles pistes en évitant de répéter des études similaires.

Notre objectif est que ce genre de visualisation devienne un standard pour éclairer les chercheurs sur les grands enjeux de leur recherche. Gargantext est un logiciel libre et tout un chacun peut l'utiliser pour créer sa propre cartographie² dans divers domaines : programmes politiques des candidats à une élection, dépôt de brevets ou pages web d'entreprises dans le cadre d'une veille technologique... Très bientôt, le logiciel sera collaboratif. L'idée est de produire des cartes de manière cumulative, qui puissent évoluer et s'améliorer en fonction du contexte et de la production scientifique. » II

Les scientifiques ont accès à une très grande masse d'informations dans laquelle il est souvent difficile de se retrouver. Par l'analyse de plusieurs milliers d'articles, les cartographies interactives¹ permettent de faire ressortir les principales thématiques abordées sur le virus et la façon dont elles s'organisent. D'un seul coup d'œil, on peut ainsi visualiser l'état de l'art de la recherche sur le sujet et accéder directement aux articles pertinents.

Ces cartes ont été créées avec le logiciel Gargantext, sur lequel je travaille depuis 2013 avec Alexandre Delanoë. L'outil effectue d'abord une « fouille de données textuelles » sur tout le corpus pour en extraire les termes les plus représentatifs. Puis une fois ces mots-clés identifiés, on cherche à savoir à quel point ils sont liés – par exemple dans un autre domaine, « cancer » à une forte chance d'être associé à « tabac ». Sur la carte, chaque point représente un terme (plus le point est gros, plus il est central



Cartographie des 1 000 mots clés les plus centraux d'un corpus PubMed sur le coronavirus (6 560 documents publiés entre le 1^{er} janvier 2020 et le 5 Février 2020).



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

1. À consulter sur <https://iscipif.fr/chavalarias/?p=1712> 2. Plus d'informations sur gargantext.org

« Face aux pandémies, les sciences de l'écologie sont plus que jamais nécessaires »



VIVANT



SOCIÉTÉS



Point de vue. Dans cette tribune, un collectif de scientifiques plaide l'importance de la recherche en écologie et évolution pour comprendre les phénomènes d'émergence de maladies infectieuses, et anticiper les menaces futures.

PAR UN COLLECTIF DE SCIENTIFIQUES DU LABORATOIRE CREES¹

Ces derniers mois, la communauté scientifique s'est mobilisée dans l'urgence face au virus SARS-CoV-2, pour apporter des réponses et orienter les décisions des gouvernements. En son sein, les champs de l'écologie et de l'évolution sont capitaux pour comprendre l'émergence d'un virus et la propagation de la maladie

infectieuse qui pourrait lui être liée. Car si cette pandémie est de nature exceptionnelle, elle n'est malheureusement pas une surprise. Le SARS-CoV-2 est l'exemple parfait d'une zoonose, c'est-à-dire le résultat du passage d'un pathogène de l'animal vers l'humain. Environ 60 % des nouvelles maladies infectieuses qui apparaissent chez les humains aujourd'hui

sont le résultat d'un tel phénomène. Les sources sont soit la faune sauvage, comme cela semble être le cas pour le SARS-CoV-2, soit les animaux d'élevage ou de compagnie. Les virus de la rougeole (issu des bovins), de la grippe (issu des oiseaux), de l'immunodéficience humaine (VIH, issu des singes), Ebola (issu vraisemblablement des chauves-souris) ou encore certains agents du paludisme (issu des singes) en sont les exemples les plus emblématiques.

L'émergence d'une maladie infectieuse est la résultante de trois événements : tout d'abord, un contact répété entre une ou plusieurs espèces animales infectées par un pathogène et l'espèce humaine. Ensuite, il faut qu'il y ait transmission du pathogène de l'animal à l'humain. Enfin, l'épidémie progresse par diffusion du

1. Centre de recherches en écologie et évolution de la santé, laboratoire Maladies infectieuses et vecteurs : écologie, génétique, évolution et contrôle (CNRS/IRD/Univ. de Montpellier).



©SIMON TOWNSLEY/REA

pathogène dans une population, si et seulement si le pathogène peut se transmettre de façon stable d'un individu à l'autre par contact direct ou indirect. Les disciplines de l'écologie et de l'évolution permettent justement l'analyse du fonctionnement des pathogènes dans leur(s) environnement(s) et la caractérisation de ces différentes étapes.

Des réservoirs de pathogènes

Cela commence par l'identification des pathogènes circulant naturellement au sein de communautés animales, qui peuvent jouer le rôle de réservoirs, et des risques qu'ils représentent pour les humains. Documenter et suivre leur dynamique dans la faune sauvage n'est pas une tâche aisée et de nouvelles approches doivent être développées avec les écologues. Certains insectes peuvent

par exemple être utilisés comme outils de surveillance indirecte des pathogènes : des mouches à viande ont été capturées en forêt africaine pour évaluer quelles espèces animales étaient affectées par l'anthrax ; et des mouches tsé-tsé ont été utilisées comme moyen d'obtenir du sang des animaux sauvages pour détecter la présence de pathogènes d'importance médicale et vétérinaire.

Il est ensuite capital de déterminer quand, comment et où le contact entre les espèces et la transmission à l'humain pourraient avoir lieu. Grâce à l'écologie et à l'anthropologie, qui fournissent à la fois des informations sur les aires de distribution et les déplacements animaux, et des connaissances sur les interactions entre populations animales et humaines, il est possible d'estimer (notamment avec la modélisation

► Scientifiques, en combinaison de protection, à la recherche de nouvelles souches du virus Ebola parmi la faune sauvage, en Sierra Leone (Janvier 2019).

mathématique) les risques spatio-temporels de contact entre les différentes populations. Enfin, il est nécessaire de comprendre comment les communautés animales interagissent et sont structurées dans l'espace et dans le temps, ce qui peut influencer sur la dynamique de certaines maladies infectieuses et donc leur probabilité d'émergence chez les humains.

Du changement climatique à la perte massive de la biodiversité, l'analyse des processus à l'origine de l'expansion d'un pathogène, incluant comportements humains et pratiques culturelles, devient primordiale. Par exemple, il a pu être démontré que la consommation de viande de poulet crue avait entraîné des cas mortels d'infection au virus H5N1 chez l'humain. Il faut aussi considérer les changements que nous imposons aux écosystèmes du fait de l'aug-...



©CÉLIL PRESILLON / CEREP / CNRS PHOTO THÈQUE

Des animaux sentinelles



Frédéric Keck
anthropologue
À écouter sur
lejournale.cnrs.fr

« La prévention des maladies par des politiques de santé publique ne doit pas se réduire à un territoire, à des politiques de vaccination, d'abattage ou de confinement. Il faut inclure rapidement des technologies de surveillance et d'anticipation par des signaux d'alerte précoces des épidémies sur les animaux, perçus comme des sentinelles. »

... mentation de l'agriculture et de l'élevage intensifs, de l'urbanisation et de la déforestation. Cette dernière a été mise en cause dans l'émergence de nouvelles formes de paludisme chez l'humain en Asie.

Un système clé-serrure

Une fois le contact établi, l'infection proprement dite peut débuter de différentes manières : par voie aérienne, inoculation vectorielle, ingestion ou simplement par voie transcutanée. Quelles voies de transmission un nouvel agent infectieux va-t-il utiliser ? Quelle taille minimale d'inoculum (nombre de cellules ou de particules virales) est-elle nécessaire à l'infection ? Le pathogène peut-il survivre dans l'environnement en dehors de son hôte ? Des vecteurs sont-ils impliqués et si oui, sont-ils capables de faire le pont entre les animaux et l'humain ? Autant de questions auxquelles les sciences de l'écologie peuvent là encore apporter des réponses.

Les scientifiques travaillent dans des conditions proches de la nature sur l'un des 16 lacs artificiels de la plateforme expérimentale Planaqua, en Seine-et-Marne.

Il y aura transmission si et seulement si l'agent infectieux est capable de se développer dans le nouvel environnement que représente pour lui l'organisme humain. Heureusement ce n'est souvent pas le cas, mais lorsque cela arrive, il est important de comprendre les processus évolutifs qui lui permettent de proliférer chez cette nouvelle espèce hôte. Dans le cas des virus, c'est souvent leur capacité à se fixer à la surface des cellules humaines qui conditionne cette possibilité. Ce mécanisme est fréquemment comparé à un système clé-serrure. Chaque espèce hôte dispose d'une serrure qui lui est propre à la surface de ses cellules. Pour que le virus puisse « sauter » d'une espèce hôte à l'autre, il est donc nécessaire qu'il dispose d'un passe-partout ou alors qu'il développe, par hasard, une nouvelle clé, via une mutation de son matériel génétique. La biologie évolutive et la génétique offrent des outils pour déterminer quels agents pathogènes pourraient s'adapter rapidement à de nouvelles espèces d'hôtes. Une fois installé, le nouveau pathogène peut se propager dans l'ensemble de la population. Notre monde globalisé favorise bien évidemment le phénomène.

La prévention ne suffit plus

Pour arriver à prédire la propagation spatiale et temporelle d'une épidémie, et son éventuelle transition pandémique, les modèles mathématiques actuellement utilisés s'appuient entre autres sur l'écologie théorique, héritière des premières formalisations de la dynamique des populations. Plus

réemment, des modèles théoriques d'épidémiologie évolutive ont permis de combiner la dynamique épidémiologique (qui trace la démographie de la maladie) avec la dynamique évolutive (qui trace l'apparition de nouvelles souches du pathogène au cours de l'épidémie).

Agir en amont est primordial car prédire le risque de pandémie une fois le pathogène installé ne suffit plus. Les chercheuses et chercheurs en écologie et en biologie évolutive sont déjà à pied d'œuvre et motivés par ces défis scientifiques. Malheureusement, leur travail a fortement été freiné par un manque de financements et des conditions de travail dégradées par l'ampleur des charges administratives, le montage de dossiers de demandes de financement et la diminution des postes alors que le nombre d'étudiants dans nos universités ne cesse d'augmenter. Néanmoins, restons positifs. Beaucoup s'accordent désormais à reconnaître qu'une recherche fondamentale et une formation accrue couvrant les champs de l'écologie et de la biologie évolutive sont indispensables au développement d'une lutte intégrée contre les pathogènes. Restera ensuite à convaincre politiques et décideurs en santé publique d'intégrer les résultats de ces recherches dans leurs choix. ■

Des pathogènes persistants



François Renaud
biologiste
À écouter sur
lejournale.cnrs.fr

« Éradiquer un pathogène, c'est un peu une hérésie. Mise à part la variole, déclarée aujourd'hui comme éteinte par l'OMS, il n'y a pas une maladie infectieuse qui soit éradiquée sur Terre. La tuberculose, entre autres, existe toujours et les cas de peste repartent même dans certains pays. Il est donc important de connaître les composants en amont et en aval d'une maladie avant qu'elle touche les hommes. »



Lire l'intégralité du point de vue sur lejournale.cnrs.fr

«L'urgence environnementale est bien plus pressante aujourd'hui»



Entretien avec Serge Morand, écologue et biologiste de l'évolution. Pour lui, les chercheurs en sciences de l'environnement et en écologie sont plus politisés qu'il y a vingt ou trente ans.

PROPOS RECUEILLIS PAR FABIEN TRÉCOURT

En tant qu'écologue, quelle autre politique appelez-vous de vos vœux aujourd'hui?

Serge Morand ¹ : Avec l'accélération de la mondialisation, toutes les conditions étaient réunies pour qu'une maladie infectieuse émergente de ce type se propage à grande vitesse. Malheureusement, il me semble qu'un certain déni a prévalu depuis une vingtaine d'années. Nous et nos institutions avons du mal à remettre en cause notre manière d'occuper la planète et de circuler. L'émergence de ces épidémies est aussi largement due à la part croissante qu'occupent les animaux domestiques et d'élevage dans notre environnement, démultipliant les risques de transmission d'un virus d'une espèce à l'autre. La production intensive de protéines végétales destinées à nourrir toutes ces bêtes, encourage la déforestation et entraîne une perte

► Récolte de l'orge en France. L'agriculture est au centre de nombreux enjeux : sécurité, biodiversité, rapport de l'homme à la nature...



© H. RIGEL / BIOSPHOTO / BIOSPHOTO VIA AFP

massive de biodiversité. Cela bouleverse des équilibres naturels et des mécanismes de résilience qui nous permettraient de mieux faire face aux épidémies.

Faut-il réformer en priorité la politique agricole ?

S.M. : Il est impératif de revenir à des pratiques moins massives, moins mondialisées et plus territorialisées. Paradoxalement, les institutions internationales semblent les plus en pointe sur ce point. La Commission européenne appelle depuis quelques mois à un « green deal » d'une manière qui me semble sincère. L'année dernière, même le Fonds monétaire international a annoncé vouloir œuvrer contre le réchauffement climatique et en faveur de l'environnement. Tout le monde est conscient de la nécessité de réformer la politique agricole commune. Il faut arrêter de subventionner en fonction de la production notamment, et prendre davantage en compte des critères écologiques : le service rendu par un agriculteur à son environnement, à l'économie locale... ou les économies d'eau qu'il a rendues possibles.

Y a-t-il une volonté plus marquée aujourd'hui chez les chercheurs en écologie de passer à l'action ?

S.M. : C'est très clair, ne serait-ce que parce que l'urgence environnementale est bien plus pressante aujourd'hui. Mais cela rejoint aussi des tendances de la recherche scientifique. Des domaines d'études, encore marginaux il y a vingt ou trente ans, occupent désormais une place de premier plan. Je pense par exemple à « l'écologie de la conservation » et de « la restauration » qui étudie des espaces jugés caractéristiques – fleuves, villages, mais aussi anciennes mines par exemple. Un enjeu fort est d'étudier leurs interactions avec d'autres lieux et acteurs, et d'imaginer les meilleures façons de les préserver au titre de patrimoine bioculturel. À un autre versant, tout ce qui relève de l'écologie dans le domaine de l'agriculture, de l'agronomie ou même de l'économie occupe une place croissante. Enfin du côté des sciences humaines, de l'anthropologie par exemple, les études sur les interactions entre l'humanité et la nature se sont démultipliées. Je pense notamment aux travaux de l'écologue John Thompson et du géographe Raphaël Mathevet ² sur la « solidarité écologique », qui ont directement influencé la charte des parcs nationaux de France. **II**



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

1. Directeur de recherche au CNRS, à l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier (CNRS/Université de Montpellier/IRD/EPHE) et chercheur au Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Mesri/MEA). 2. Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive.

« Nous devons mieux anticiper les risques sévères »

TERRE



© F. RHODES / CEA

Entretien. La crise du Covid-19 aura-t-elle un impact positif dans la lutte contre le changement climatique ? L'avis de la climatologue Valérie Masson-Delmotte, co-présidente du groupe 1 du Giec¹.

PROPOS RECUEILLIS PAR LOUISE MUSSAT

De nombreux citoyens souhaitent que la crise sanitaire, sur laquelle ils ont été massivement informés, laisse émerger une société plus soucieuse et respectueuse de l'environnement. Est-ce soit possible ?

Valérie Masson-Delmotte² : Durant quelques semaines, beaucoup de personnes ont apprécié un air plus propre, des villes moins bruyantes, ce qui a donné une idée de ce qu'on peut gagner en transformant nos modes de vie. Certaines tendances semblent aussi avoir été renforcées, comme l'achat direct d'aliments aux producteurs ou l'utilisation du vélo pour les déplacements de proximité, et pourraient s'inscrire dans la durée. C'est encourageant. Mais ce qui fera la différence, c'est la nature des plans de relance. Ils doivent se faire au bénéfice de l'emploi mais aussi de l'environnement, sous peine de vite observer un effet rebond. Après la crise financière de 2008, la plupart des plans de relance n'ont pas intégré les enjeux environnementaux et ont retardé les actions pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

Avez-vous eu l'occasion de vous exprimer à ce sujet auprès du gouvernement ?

V. M.-D. : Le Haut conseil pour le climat³ dont je fais partie, a été auditionné par le ministre de l'Économie et des Finances durant une heure un mercredi de mai. Nous avons présenté les recommandations issues d'un rapport spécial « Climat, santé, mieux prévenir, mieux guérir » que nous venions de publier. Construire un développement soutenable demande d'assurer un développement économique et social tout en préservant l'environnement, et en réduisant de manière importante et tenace les émissions de CO₂. J'ajouterais qu'il faudra aussi porter une attention toute particulière aux jeunes dont l'entrée sur le marché du travail pourrait être très fortement impactée par la crise économique qui se profile.

La France doit-elle s'inspirer d'autres pays qui feraient, selon vous, les bons choix post-crise ?

V. M.-D. : L'Allemagne s'est montrée assez exemplaire dans la gestion de la crise. La communication d'Angela Merkel, qui a une formation scientifique approfondie⁴, était à la fois bienveillante, prudente et très claire sur les éléments scientifiques. Les responsabilités ont été également partagées entre l'État et les régions. En Allemagne, des choix forts semblent se mettre en place pour accélérer la transition vers une mobilité plus propre.

S'il y avait une grande leçon à tirer, et qui pourrait servir à mieux gérer une future crise majeure liée au changement climatique, quelle serait-elle ?

V. M.-D. : Sans aucun doute l'anticipation de risques potentiellement très sévères. La France n'y est pas assez préparée. On l'a constaté lors de la canicule de 2003. D'ailleurs, les mesures prises pour limiter les conséquences de

1. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2. Climatologue au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE – unité CNRS/CEA/Univ. de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines). 3. Créée en novembre 2018, cette instance doit donner un avis indépendant sur la politique gouvernementale en matière de climat, en particulier sur sa compatibilité avec l'Accord de Paris. 4. Elle est titulaire d'un doctorat en chimie quantique.

vagues de chaleur qui seront à l'avenir plus intenses et plus fréquentes sont encore insuffisantes : par exemple, les espaces verts, sources de fraîcheur, manquent toujours cruellement au cœur de certaines villes. Il faut aussi se préparer à des risques composites : comment gérer une pandémie pendant une vague de chaleur intense (rappelons qu'il a fait jusqu'à 46 °C l'été dernier en France) ou en cas de cyclone s'il faut évacuer les populations (comme au début du mois de juin en Inde) ? Pour limiter les vulnérabilités et l'exposition à ces risques, il faut renforcer la capacité de détection des phénomènes nouveaux majeurs, mettre en place des systèmes d'alertes précoces, renforcer la transparence et la communication au niveau international. Et bien sûr agir à la racine des risques liés aux zoonoses et au réchauffement climatique en préservant les écosystèmes et en réduisant de manière tenace les émissions de CO₂.

Nous sentons-nous désormais plus concernés par les potentielles crises à venir, notamment celles qui seront directement liées au changement climatique ?

V. M.-D. : Je l'espère. En tout cas, les collègues qui travaillent sur les épidémies observent depuis quelques mois ce que nous, climatologues, observons depuis des années : d'abord du déni, la volonté de tenir à distance quelque chose d'angoissant, de la sidération, de la colère, un sen-

► Les habitants de Mumbai ont été appelés à rester confinés alors que le cyclone Nisarga touchait l'Inde le 3 juin dernier.

timent d'impuissance, et, lorsque ces étapes sont surmontées, et que la nouvelle situation est intégrée, la mise en œuvre de solutions concrètes. Ceci dit le risque n'est pas perçu de la même manière. Celui de pandémie a été ressenti comme immédiat, personnel. Celui lié au changement climatique a longtemps été considéré comme graduel, éloigné, lointain, pour les générations futures, ou d'autres régions du monde. Mais la réalité des conséquences du réchauffement climatique, et tout particulièrement l'intensification des événements extrêmes comme les vagues de chaleur, les pluies torrentielles, ou les sécheresses, a fait évoluer la perception de ce risque au cours des dernières décennies, le rendant beaucoup plus concret...

Mis sur le devant de la scène ces derniers mois, les scientifiques sont-ils désormais plus écoutés par les décideurs ?

V. M.-D. : Évidemment, devant une situation nouvelle, le besoin de connaissances est vital. Mais chaque nouveau résultat a été rendu public sans recul critique, et commenté, parfois par des journalistes qui connaissent mal la démarche scientifique, suscitant la perplexité du public. Je ne saurais dire si nous serons désormais plus écoutés. J'espère surtout que la société va comprendre le processus complexe de la production de connaissances. Chaque





© KATRIN BAUMANN / CONVENTION CITOYENNE POUR LE CLIMAT

nouvelle étude est parcellaire, incomplète, et surtout parfois réalisée dans l'urgence. De ce fait, il est important de mettre en commun les connaissances produites dans le monde entier, d'avoir du recul, de faire preuve d'esprit critique pour passer de la production de connaissances partielles à ce qui est solidement établi, ou pas. En science, pour tirer des conclusions fiables, on a besoin de faire « décanter » collectivement les résultats.

La Convention citoyenne pour le climat vient s'achever. De quoi s'agit-il et quel en est l'objectif ?

V. M.-D. : Cette expérience démocratique, dont la 7^e et dernière session s'est tenue les 19, 20 et 21 juin, a eu lieu en pleine sortie de crise sanitaire. Elle a réuni 150 personnes tirées au sort et représentant « la diversité des citoyens et des citoyennes françaises ». L'objectif était de « définir une série de mesures permettant d'atteindre une baisse d'au moins 40 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030, et ce dans un esprit de justice sociale ». Le président de la République s'est engagé à ce que les propositions législatives et réglementaires des 150 personnes soient « *soumises "sans filtre" soit à référendum, soit au vote du parlement, soit à application réglementaire directe* ». La démocratie participative est-elle un outil efficace pour lutter contre le changement climatique ? Nous le verrons dans les mois et années à venir...

Cette consultation sur le climat était inédite en France. Y en a-t-il eu ailleurs ?

V. M.-D. : Il y a eu quelques précédents, notamment un exercice de démocratie participative⁵ en 2018 en Irlande auquel j'ai été invitée à intervenir. J'avais été impressionnée par la profondeur de la réflexion de certains participants qui visait à ancrer l'action pour le climat dans des transformations de la société au bénéfice de tous. Suite à cela, j'avais cosigné une tribune⁶ pour appeler à mettre en place ce type de délibération citoyenne en France.

➤ [Précédente session de la Convention citoyenne pour le climat, initiative lancée en octobre 2019.](#)

J'ignore si cela a pesé dans la décision d'organiser la convention, mais c'est évidemment une initiative que je soutiens : nous avons besoin d'espaces de réflexion de ce type-là, il faut faire confiance à l'intelligence collective.

Qu'est-ce qui vous a le plus marquée lors de la première session, en octobre dernier ?

V. M.-D. : L'implication des gens, leur soif de s'approprier les enjeux, la profondeur des débats, mais aussi le manque d'informations qu'ils déploraient. Je suis intervenue⁷ pour expliquer les méthodes permettant de produire les connaissances en sciences du climat et les enjeux, à l'échelle globale comme locale. Certains facilitateurs m'ont confié que plusieurs participants avaient été très secoués par mon intervention et avaient pris conscience de l'ampleur des enjeux. Ils ne comprenaient pas pourquoi ces éléments – comme l'évolution du climat en France, région par région par exemple – n'étaient pas plus clairement communiqués dans les médias. Une fois informés, les gens se sentent souvent pleinement concernés, formulent des questions très pertinentes et fourmillent de propositions concrètes. J'en ai suivi certains sur Twitter qui, depuis, s'efforcent d'organiser à leur niveau, dans des cafés ou sur Internet, des espaces de discussions et d'échanges.

Où en est le prochain rapport du groupe 1 du Giec que vous copilotez ?

V. M.-D. : Les 234 auteurs travaillant dans 60 pays différents ont analysé environ 12 500 publications scientifiques, et produit une première version du projet de rapport en 2018. La seconde version, à l'automne 2019, a pris en compte quelque 23 000 commentaires de 750 relecteurs scientifiques. Les premiers projets de résumés du rapport (résumé technique et résumé à l'intention des décideurs) ont ensuite été élaborés entre janvier et février 2020 à la suite d'intenses échanges en ligne. La relecture de cette seconde version de rapport a démarré le 2 mars, quelques jours avant que l'OMS ne déclare la pandémie. Nous avons dû rallonger de six semaines la durée de cette relecture, qui vient de se terminer, et a reçu plus de 51 000 commentaires de 1 279 relecteurs et 42 gouvernements (environ 60 % de plus que le 5^e rapport, en 2012). Nous avons mis en place un programme de travail en ligne, étalé sur quatre mois, avec 74 réunions de coordination. Reste à savoir s'il sera ou non possible de tenir une réunion physique début 2021... Quoi qu'il en soit, l'approbation du rapport, initialement prévue en avril 2021, sera retardée de plusieurs mois. **II**



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

5. L'assemblée citoyenne irlandaise, Citizens Assembly. 6. « Réinventons le dialogue autour de la transition écologique, I », *Le Point*, 25 novembre 2018. En ligne sur [lepoint.fr](https://www.lepoint.fr)
7. <https://www.youtube.com/watch?v=oSPb5o7oZIU>



D.R.

Raouf Boucekkine
Enseignant-chercheur
à Aix-Marseille school
of economics
(CNRS/EHESS/AMU).



D.R.

Claire Lapique
journaliste scientifique
à Aix-Marseille school
of economics
(CNRS/EHESS/AMU).

POINT DE VUE

Quel sera l'impact économique de la crise ?

Les mesures de confinement sont-elles efficaces ? Aurait-il fallu tester plus amplement la population ? Les politiques publiques en réponse à la crise sanitaire sont bien différentes selon les pays. En Corée du Sud ou au Japon, la vie a presque semblé suivre son cours, si ce n'est le respect des mesures barrières, le déploiement d'un arsenal de technologies et de tests –, tandis que la Chine et de nombreux pays européens ont confiné leur population plusieurs mois. Quelles stratégies se sont avérées les plus efficaces ? Le projet Ecodiv-19¹ vise à répondre à cette question avec recul. À la clé, des indications précieuses pour comprendre les ressorts de la crise économique actuelle, dont la Banque mondiale a estimé le 8 juin qu'elle serait la pire des 150 dernières années.

Des effets secondaires variables

Si l'épidémiologie économique dresse un tableau des stratégies les plus efficaces et oriente la décision publique, elle permet aussi de se pencher sur les répercussions socioéconomiques d'une pandémie, très différentes selon sa violence et sa durée. La grippe espagnole, qui a tué plusieurs dizaines de millions de personnes entre 1918 et 1919, n'a pas les mêmes conséquences économiques qu'une épidémie comme celle du sida qui s'étend dans le temps. La première catégorie produit un effet de déséquilibre ponctuel mais très fort, qui peut être suivi ou non d'une reprise économique selon notamment le profil par âge de la mortalité (si les victimes sont plutôt âgées, ou plutôt jeunes et donc faisant partie de la population active).

La seconde catégorie peut modifier durablement et fortement les comportements socioéconomiques. Les épidémies à plusieurs vagues, comme celles de peste noire qui ont décimé l'Europe au Moyen Âge ou de paludisme en Afrique subsaharienne, peuvent conduire à des trappes de pauvreté, mais également aboutir à un phénomène d'immunisation collective, préalable au décollage économique. C'est un débat que l'on retrouve aujourd'hui concernant l'épidémie de Covid-19.

Des répercussions incertaines

Les épidémies jouent ainsi sur les comportements des individus qui peuvent, par exemple, concentrer leurs dépenses sur la consommation de base et la santé, amputant de fait l'investissement. C'est le cas de nombreux pays africains où les dépenses de santé sont majoritairement privées. Les séquelles peuvent s'observer après plusieurs décennies. Concernant le sida en Afrique du Sud, il a fallu attendre une vingtaine d'années avant que les impacts les plus marqués sur la croissance ne soient observés. Explication possible : plus l'espérance de vie est réduite, moins l'éducation est rentable, ce qui réduit

l'accumulation de capital humain dans le moyen et long terme, affectant ainsi la croissance à long terme.

Dans la crise actuelle, la fermeture des écoles, les quarantaines ou le chômage partiel ont atténué l'impact humain de la maladie, mais il est encore trop tôt pour faire des prédictions solides sur l'avenir des économies. Mis à part le caractère récessif sans précédent des mesures radicales de contrôle prises, à court terme, les inconnues tant épidémiologiques qu'économiques restent nombreuses. Le projet Ecodiv-19 vise d'abord l'approfondissement de l'analyse de la crise du Covid-19 en cours avec pour objectif plus large l'identification des meilleures réponses d'un point de vue sanitaire et économique dans un contexte d'incertitude radicale. Tous ces résultats seront mis en ligne gratuitement. ■



Lire l'intégralité de l'article sur le site de la revue *Dialogues économiques* éditée par l'AMSE et sur lejournel.cnrs.fr

1. Épidémiologie économique du Covid-19 (Ecodiv-19), projet lancé par Raouf Boucekkine (AMSE), Josselin Thuilliez (CNRS/Centre d'économie de la Sorbonne) et Jérôme Adda (Univ. Bocconi, Milan) et retenu par l'Agence nationale de la recherche suite à son appel de mars 2020. Pour en savoir plus : <https://bit.ly/3hDMZck>



«L'humanité a toujours vécu avec les virus»

©BIANCHETTI COLLECTION/ BRIDGEMAN IMAGES



DR.

SOCIÉTÉS



Histoire. De la peste noire au Covid-19, nos sociétés ont souvent été traversées par des crises sanitaires, comme nous le rappelle l'historienne Anne Rasmussen.

PROPOS RECUEILLIS PAR LOUISE MUSSAT

Quelle est la dernière pandémie à avoir marqué l'histoire avant la crise actuelle ?

Anne Rasmussen ¹ : Sans aucun doute la grippe dite « espagnole », apparue au printemps 1918. La situation de guerre mondiale, avec ses déplacements incessants, facilita la propagation d'un virus respiratoire très contagieux. Les épidémiologistes soupçonnaient que, comme aujourd'hui avec le coronavirus, des « porteurs sains » – une notion alors toute nouvelle – contribuaient à disséminer le virus. Le bilan s'établit aujourd'hui autour de 50 millions de morts, estimation basse. C'était la

première pandémie à une échelle aussi globale.

La révolution industrielle au XIX^e siècle a eu un impact sur la circulation épidémique...

A. R. : Oui, par exemple lors de la pandémie grippale de 1889-1890, on dit que « la grippe prend le train ». On fait déjà le constat que ce qui survient en Ouzbékistan, par exemple, peut avoir un impact sur un village en France. Avant 1889, l'Europe avait certes déjà été confrontée à des maladies qui sortent de leur bassin d'origine : peste noire au XIV^e siècle, fièvre jaune en 1822, choléra en 1832. Mais la

révolution des transports étend et accélère leur diffusion, avant même que l'avion l'amplifie encore.

Quelles ont été les stratégies pour les contenir ?

A. R. : Pour la grippe espagnole, les mesures de quarantaine, adoptées en Australie ou, localement, dans des villes américaines, ont été peu pratiquées en Europe : on y est encore en guerre, le déplacement des troupes prime. D'ailleurs, la censure militaire en France et en Allemagne laisse l'Espagne, neutre à l'époque, donner les premières informations publiques sur cette grippe qui est ainsi qualifiée d'« espagnole ». Auparavant, dans l'Europe du XVII^e siècle, par exemple, on déployait des « mesures barrières », comme les célèbres costumes des « médecins de peste », et on évitait de fréquenter les malades. À l'époque du choléra de 1832, on déployait des cordons sanitaires (tenus par des militaires autorisés à tirer sur les contrevenants) pour empêcher la progression de la maladie sur le territoire, et les gens se calfeutraient d'eux-mêmes chez eux.

1. Directrice du Centre Alexandre Koyré (CNRS/EHESS/MNHN). 2. Il en existerait un quintillion, c'est-à-dire 1 suivi de 31 zéros, à la surface du globe.

► Mesures de désinfection contre une épidémie de choléra en 1884, à la gare de Lyon (Paris).

Les premières quarantaines remontent aux épidémies de peste noire du Moyen Âge et n'étaient pas toujours respectées...

A. R. : Le non-respect des consignes de quarantaine, dans le port de Marseille, est en effet à l'origine de la dernière grande peste en France, en 1720. Déjà à l'époque, ces précautions sanitaires pouvaient entrer en conflit avec des intérêts économiques. Et si l'on interrompt les circuits d'approvisionnement, les gens sont aussi susceptibles de mourir de faim ! Au XIX^e siècle, le principe de la quarantaine était d'ailleurs critiqué par certains, même en temps de choléra, comme contraire aux libertés individuelles.

Le XIX^e siècle est aussi l'époque de grandes avancées scientifiques...

A. R. : Absolument. Dans le dernier tiers du XIX^e siècle, la théorie des germes permet d'étayer de multiples recherches sur l'étiologie des maladies infectieuses (*étude de leurs causes, Ndlr*). On sait désormais qu'à une maladie infectieuse correspond un

Anne-Marie Moulin
médecin et philosophe

À écouter sur
lejournal.cnrs.fr



Histoire des quarantaines

« Les premières mesures ont été prises au XIV^e siècle, dans des ports commerçant avec l'Orient. Les bateaux circulaient avec des passeports sanitaires remis au départ par des consuls, souvent médecins. En cas de doutes, équipages et marchandises étaient obligatoirement stationnés à l'arrivée dans un lazaret, sorte d'hôpital-prison isolé, pendant un délai symbolique de quarante jours. »

germe spécifique. L'école allemande de Robert Koch (*qui a découvert l'agent de la tuberculose appelé bacille de Koch, Ndlr*) et la française, menée par Louis Pasteur, sont en compétition. Pour le choléra, la dysenterie, la peste, on identifie, isole et met en culture le germe associé pour fabriquer les premiers vaccins. Sur cette base scientifique, on met en place des mesures prophylactiques : on désinfecte, on aseptise... La mortalité, infantile en particulier, régresse. L'éloignement de ces fléaux nous a parfois fait oublier combien prophylaxie et vaccin sont alors apparus comme d'immenses progrès contre le malheur épidémique.

Grandes épidémies ou maladies endémiques, lesquelles ont le plus bouleversé les sociétés ?

A. R. : Les secondes ont un impact plus durable. La tuberculose et la syphilis hier, désignées comme des « fléaux sociaux », le paludisme aujourd'hui, ont des coûts démographiques et sociaux très élevés. Elles ont fait naître de véritables plans Marshall sanitaires, dès 1918 contre la tuberculose, après 1945 contre la variole. L'Organisation mondiale de la santé met alors en place un plan de quadrillage pour identifier chaque cas jusqu'à la disparition de la maladie. À la fin des années 1970, on a cru le combat contre les maladies infectieuses en passe d'être gagné. Puis le VIH nous a fait déchanter. Signalée à partir d'une description clinique à l'été 1981, confirmée par une enquête épidémiologique en 1982, la thèse d'une nouvelle maladie, le sida, est attestée par la découverte en 1983 d'un rétrovirus. En 1985, les tests de dépistage

mettent en valeur l'existence d'une phase latente de la maladie, la séro-positivité. À l'échelle historique, la temporalité de ces découvertes est très brève. Et on voit aujourd'hui combien ces procédures ont été accélérées lors de l'émergence du Covid-19.

L'émergence de nouveaux virus est-elle liée à l'accroissement de notre population ?

A. R. : C'est possible. Mais je pense aussi que nous sommes surpris quand une maladie virale survient car nous avons vraiment cru en venir à bout à la fin des années 1970. Notre confiance d'alors explique peut-être notre stupéfaction d'aujourd'hui. Mais les virus sont très nombreux² qui interagissent et interagiront toujours avec les humains

Comme en 1918, on se retrouve face à un pathogène inconnu...

A. R. : Oui, mais nous sommes nettement moins ignorants : le génome du virus a été séquencé en trois jours. Et nous disposons d'un système de soins très performant dont témoignent les techniques de réanimation, même si le nombre de lits n'est pas adapté au temps de crise, et d'un système social de protection, dans les pays riches tout au moins. Nous disposons d'antiviraux et d'antibiotiques qui, s'ils ne sont pas efficaces contre les virus, peuvent limiter les infections bactériennes associées. Et on travaille à un vaccin. Parmi ceux qui le réclament en urgence, il y en a sûrement qui ne font pas celui contre la grippe ou refusent certains qui sont obligatoires pour les enfants. C'est le moment de se rappeler que les vaccins nous ont libérés de maladies dont l'histoire montre combien elles étaient terribles. ||

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

► Gravure dite de « Dr Schnabel » (« docteur bec ») de 1656. Ces « médecins de peste » portaient masque et costume.



EDGAR MORIN : «*Nous devons vivre avec l'incertitude*»

SOCIÉTÉS

Entretien. En pleine crise du coronavirus, le philosophe reste fidèle à sa vision de la société. La pandémie, nous dit-il, doit nous apprendre à mieux comprendre la science et à vivre avec l'incertitude. Et à retrouver une forme d'humanisme.

PROPOS RECUEILLIS PAR FRANCIS LECOMPTE

La pandémie du coronavirus a remis brutalement la science au centre de la société. Celle-ci va-t-elle en sortir transformée ?

Edgar Morin : Ce qui me frappe, c'est qu'une grande partie du public considérait la science comme le répertoire des vérités absolues, des affirmations irréfutables. Et tout le monde était rassuré de voir que le président s'était entouré d'un conseil scientifique. Mais que s'est-il passé ? Très rapidement, on s'est rendu compte que ces scientifiques défendaient des points de vue très différents, parfois contradictoires, que ce soit sur les mesures à prendre, les nouveaux remèdes éventuels pour répondre à l'urgence, la validité de tel ou tel médicament, la durée des essais cliniques à engager... Toutes ces controverses ont introduit le doute dans l'esprit des citoyens.

Vous voulez dire que le public risque de perdre confiance en la science ?

E. M. : Non, s'il comprend que les sciences vivent et progressent par la controverse. Les débats autour de la chloroquine, par exemple, ont permis de poser la question de l'alternative entre urgence et prudence. Le monde scientifique avait déjà connu de fortes controverses au moment de l'apparition du sida, dans les années 1980. Or, ce que nous ont montré les philosophes des sciences, c'est précisément que les controverses font partie inhérente de la recherche. Celle-ci en a même besoin pour progresser. Malheureusement, très peu de scientifiques ont lu Karl Popper, qui a établi qu'une théorie scientifique n'est telle que si elle est réfutable, Gaston Bachelard, qui a posé le problème de la complexité de la connaissance, ou encore

Thomas Kuhn, qui a bien montré comment l'histoire des sciences est un processus discontinu. Trop de scientifiques ignorent l'apport de ces grands épistémologues et travaillent encore dans une optique dogmatique.

La crise actuelle sera-t-elle de nature à modifier cette vision de la science ?

E. M. : Je ne peux pas le prédire, mais j'espère qu'elle va servir à révéler combien la science est une chose plus complexe qu'on veut bien le croire – qu'on se place d'ailleurs du côté de ceux qui l'envisagent comme un catalogue de dogmes, ou de ceux qui ne voient les scientifiques que comme autant de Diafoirus (*charlatan dans la pièce Le Malade imaginaire de Molière, Ndlr*) sans cesse en train de se contredire...

La science est une réalité humaine qui, comme la démocratie, repose sur les débats d'idées, bien que ses modes de vérification soient plus rigoureux. Malgré cela, les grandes théories admises tendent à se dogmatiser, et les grands innovateurs ont toujours eu du mal à faire reconnaître leurs découvertes. L'épisode que nous vivons aujourd'hui peut donc être le bon moment pour faire prendre conscience, aux citoyens comme aux chercheurs eux-mêmes, de la nécessité de comprendre que les théories scientifiques ne sont pas absolues, comme les dogmes des religions, mais biodégradables...

La catastrophe sanitaire, ou la situation inédite de confinement que nous avons vécue : qu'est-ce qui est, selon vous, le plus marquant ?

E. M. : Il n'y a pas lieu d'établir une hiérarchie entre ces deux situations, puisque leur enchaînement a été chronologique et débouche sur une crise qu'on peut dire de civilisation, car elle nous oblige à changer nos comportements et change nos existences, au niveau local comme au niveau planétaire. Tout cela est un ensemble complexe. Si on veut l'envisager d'un point de vue philosophique, il faut tenter de faire la connexion entre toutes ces crises et réfléchir avant tout sur l'incertitude, qui en est la principale caractéristique.



© IAN HANNING/REA

Ce qui est très intéressant, dans la crise du coronavirus, c'est qu'on a peu de certitudes sur l'origine même de ce virus, ni sur ses différentes formes, les populations auxquelles il s'attaque, ses degrés de nocivité... Mais nous traversons également une grande incertitude sur toutes les conséquences de l'épidémie dans tous les domaines, sociaux, économiques...

Pourquoi ces incertitudes forment-elles, selon vous, le lien entre toutes ces crises ?

E. M. : Parce que nous devons apprendre à les accepter et à vivre avec elles, alors que notre civilisation nous a inculqué le besoin de certitudes toujours plus nombreuses sur le futur, souvent illusoires, parfois frivoles quand on nous décrit avec précision ce qui va nous arriver en 2025 ! L'arrivée de ce virus doit nous rappeler que l'incertitude reste un élément inexpugnable de la condition humaine. Toutes les assurances sociales auxquelles vous pouvez souscrire ne seront jamais capables de vous garantir que vous ne tomberez pas malade ou que vous serez heureux en ménage ! Nous essayons de nous entourer d'un maximum de certitudes, mais vivre, c'est naviguer dans une mer d'incertitudes, à travers des îlots et des archipels de certitudes sur lesquels on se ravitaile...

C'est votre propre règle de vie ?

E. M. : C'est plutôt le résultat de mon expérience. J'ai assisté à tant d'événements imprévus dans ma vie – de la résistance soviétique dans les années 1930 à la chute de l'URSS, pour ne parler que de deux faits historiques improbables

avant leur venue – que cela fait partie de ma façon d'être. Je ne vis pas dans l'angoisse permanente, mais je m'attends à ce que surgissent des événements plus ou moins catastrophiques. Je ne dis pas que j'avais prévu l'épidémie actuelle, mais je dis par exemple depuis plusieurs années qu'avec la dégradation de notre biosphère, nous devons nous préparer à des catastrophes. Oui, cela fait partie de ma philosophie : « Attends-toi à l'inattendu. »

En outre, je me préoccupe du sort du monde après avoir compris, en lisant Heidegger en 1960, que nous vivons dans l'ère planétaire, puis en 2000 que la globalisation est un processus pouvant provoquer autant de nuisances que de bienfaits. J'observe aussi que le déchaînement incontrôlé du développement techno-économique, animé par une soif illimitée de profit et favorisé par une politique néolibérale généralisée, est devenu nocif et provoque des crises de toutes sortes... À partir de ce moment-là, je suis intellectuellement préparé à faire face à l'inattendu, à affronter les bouleversements. ...

► Le philosophe Edgar Morin dans sa maison de Montpellier.

“La science est une réalité humaine qui, comme la démocratie, repose sur les débats d'idées.”

Pour s'en tenir à la France, comment jugez-vous la gestion de l'épidémie par les pouvoirs publics ?

E. M. : Je regrette que certains besoins aient été niés, comme celui du port du masque, uniquement pour... masquer le fait qu'il n'y en avait pas ! On a dit aussi : les tests ne servent à rien, uniquement pour camoufler le fait qu'on n'en avait pas non plus. Il serait humain de reconnaître que des erreurs ont été commises et qu'on va les corriger. La responsabilité passe par la reconnaissance de ses erreurs. Cela dit, j'ai observé que, dès son premier discours de crise, le président Macron n'a pas parlé que des entreprises, il a parlé des salariés et des travailleurs. C'est un premier changement ! Espérons qu'il finisse par se libérer du monde financier : il a même évoqué la possibilité de changer le modèle de développement...

Allons-nous alors vers un changement économique ?

E. M. : Notre système fondé sur la compétitivité et la rentabilité a souvent de graves conséquences sur les conditions de travail. La pratique massive du télétravail qu'a entraîné le confinement peut contribuer à changer le fonctionnement des entreprises encore trop hiérarchiques ou autoritaires. La crise actuelle peut accélérer aussi le retour à la production locale et l'abandon de toute cette industrie du jetable, en redonnant du même coup du travail aux artisans et au commerce de proximité. Dans cette période où les syndicats sont très affaiblis, ce sont toutes ces actions collectives qui peuvent peser pour améliorer les conditions de travail.

Ne serait-ce que sur notre mode de consommation ou d'alimentation, c'est peut-être le moment de se défaire de toute cette culture industrielle dont on connaît les vices, le moment de s'en désintoxiquer. C'est aussi l'occasion de prendre durablement conscience de ces vérités humaines que nous connaissons tous, mais qui sont refoulées dans notre subconscient : que l'amour, l'amitié, la communion, la solidarité sont ce qui fait la qualité de la vie.

Sommes-nous en train de vivre un changement politique, où les rapports entre l'individu et le collectif se transforment ?

E. M. : L'intérêt individuel dominait tout, et voilà que les solidarités se réveillent. Regardez le monde hospitalier : ce secteur était dans un état de dissensions et de mécontentements profonds, mais, devant l'afflux de malades, il a fait preuve d'une solidarité extraordinaire. Même confinée, la population l'a bien compris en applaudissant, le soir, tous ces gens qui se dévouent et travaillent pour elle. C'est incontestablement un moment de progrès, en tout cas au niveau national.



© JUAN HANNING-REA

Malheureusement, on ne peut pas parler d'un réveil de la solidarité humaine ou planétaire. Pourtant nous étions déjà, êtres humains de tous les pays, confrontés aux mêmes problèmes face à la dégradation de l'environnement ou au cynisme économique. Après avoir été tous confinés, du Nigeria à Nouvelle-Zélande, durant de longues semaines, nous devrions prendre conscience que nos destins sont liés, que nous le voulions ou non. Ce serait le moment de rafraîchir notre humanisme, car tant que nous ne verrons pas l'humanité comme une communauté de destin, nous ne pourrons pas pousser les gouvernements à agir dans un sens novateur. ||

“Je ne dis pas que j'avais prévu l'épidémie actuelle, mais je dis par exemple [...] qu'avec la dégradation de notre biosphère, nous devons nous préparer à des catastrophes.”

ET AUSSI...



*D'une grotte en Lozère jusqu'à Jupiter,
les scientifiques domestiquent
des ondes révolutionnaires, pistent des
dinosauriens et réfléchissent à la justice.*

Événement.

Présentation des quatre lauréats 2020 de la médaille de l'innovation du CNRS, qui récompense des personnalités dont les recherches ont conduit à des innovations marquantes sur les plans technologique, économique, thérapeutique et social.

PAR MARTIN KOPPE

« Mes travaux ont d'abord été vus comme relevant de la science-fiction, avec un horizon inatteignable », se remémore

Franck Molina. Ils se sont pourtant concrétisés. Directeur de recherche CNRS et directeur du laboratoire Modélisation et ingénierie des systèmes complexes biologiques pour le diagnostic¹, Franck Molina, déjà lauréat de la médaille de bronze du CNRS en 2004, est un pionnier de la biologie des systèmes. Au sein de cette discipline, on s'attache à simuler et à modéliser des systèmes biologiques complexes tels que les cellules. Mais à force de travailler sur les règles et les comportements du vivant, il s'est peu à peu orienté vers une approche inverse... Grâce à la biologie synthétique, il parvient à concevoir et programmer des cellules artificielles comme des biomachines dans le but de leur confier des tâches non naturelles.

Ces cellules artificielles servent en particulier à réaliser des diagnostics ultrarapides, bon marché et ne nécessitant pas la présence de professionnels de santé. Le simple changement de couleur d'une bille dans les urines indique l'insulinorésistance, un état précurseur du diabète. Elles pourraient à terme servir à détecter des pesticides. Les travaux de Franck Molina ont fait l'objet de nombreux transferts industriels vers des entreprises telles que BioRad, Alcediag, Tronico, DiaDx et Skillcell (*lire p. 24*).

1. Sys2Diag, CNRS/ALCEN.

Franck Molina

DES CELLULES ARTIFICIELLES
POUR LE DIAGNOSTIC



© DAVID JEAN / SYSDIAG / CNRS PHOTOTHÈQUE

Alors que les piles à hydrogène se répandent dans les secteurs de l'énergie et des transports, Daniel Hissel, professeur à l'université de Franche-Comté et membre de l'Institut Franche-Comté électronique mécanique thermique et optique – sciences et technologies¹, travaille sur le diagnostic de leur état en temps réel. Son but : mesurer en direct l'état des piles à hydrogène pour en augmenter les performances et la durée de vie. Son approche inclut l'ensemble des phénomènes à l'œuvre : chimiques, électriques, électrochimiques, thermiques, mécaniques...

Grâce à l'intelligence artificielle, le chercheur améliore également les systèmes hybrides qui combinent batteries, supercondensateurs et piles à hydrogène. Des algorithmes permettent d'optimiser les flux énergétiques en fonction de l'usage, pour maximiser les performances de chacune

Champions



© CNRS PHOTOTHÈQUE

Daniel Hissel

DES PILES À HYDROGÈNE
PLUS DURABLES

d'entre elles. Les travaux de Daniel Hissel sont valorisés dans la start-up H2SYS qu'il a cofondée en 2017 et qui emploie aujourd'hui dix salariés. L'entreprise a notamment participé à la conception de la première semi-remorque frigorifique fonctionnant à l'hydrogène, ainsi qu'un groupe électrogène silencieux et écologique, alliant batterie et pile à combustible. « La diffusion des savoirs, depuis les laboratoires CNRS vers la société, compte énormément pour moi, dit-il. C'est une façon d'avoir un impact direct dans les domaines économiques, sociétaux et environnementaux. »

1. Femto-ST, unité CNRS/Université Technique Belfort-Montbéliard/Université de Franche-Comté/ENSMM.

de l'innovation



© FRÉDÉRIQUE PLUS / CRTI / CNRS PHOTOTHÈQUE

Sophie Brouard

DES STRATÉGIES CONTRE
LE REJET DES GREFFES

Vétérinaire de formation, Sophie Brouard s'est progressivement intéressée au problème du rejet des greffes. À présent directrice de recherche CNRS au Centre de recherche en transplantation et immunologie¹, elle travaille sur la réduction des lourds traitements qui évitent le rejet, mais causent de nombreux effets secondaires. Elle s'intéresse notamment au phénomène de régulation lymphocytaire. « Quelques rares patients arrêtent parfois de prendre leurs médicaments, sans pour autant rejeter leur greffon », explique Sophie Brouard. La chercheuse a découvert que ces patients présentent dans leur sang des lymphocytes B



© FRÉDÉRIQUE PLUS / SYRTE / CNRS PHOTOTHÈQUE

Arnaud Landragin

DES CAPTEURS
ULTRA-PRÉCIS

Imaginez des capteurs si précis qu'ils permettent une navigation inertielle indiquant la position d'un appareil rien qu'en mesurant ses accélérations et ses rotations, et sans aide extérieure. L'interférométrie atomique offre ces possibilités. Arnaud Landragin, directeur de recherche au CNRS et directeur du laboratoire Systèmes de référence temps-espace¹, utilise le principe quantique selon lequel une particule est également une onde. Grâce à

des lasers, il parvient à séparer chaque atome en deux ondes qu'il éloigne puis recombine. Elles présentent alors d'infimes différences dues à l'action de la gravité dont on calcule ainsi la force locale.

Pour transformer des expériences de laboratoire en appareils de terrain, Arnaud Landragin a notamment amélioré les systèmes existants grâce à un jeu de miroir, afin qu'ils fonctionnent avec seulement un faisceau laser là où il en fallait au moins six auparavant. Ce réflecteur pyramidal, fiable et portable, est au cœur des premiers gravimètres à atomes froids commercialisés dans le monde, via l'entreprise Muquans qu'Arnaud Landragin a cofondée. Comme la composition du sous-sol influe sur la gravité, ces appareils permettant d'étudier le champ de pesanteur donnent de précieuses informations pour les géosciences. « L'association de la recherche et de l'innovation me correspond tout à fait, souligne le chercheur. J'ai toujours essayé de valoriser mes résultats, même les plus fondamentaux. »

¹. Syrte, unité CNRS/Sorbonne Université/Observatoire de Paris.

régulateurs (Breg), lesquels inhibent la prolifération des lymphocytes T effecteurs qui s'attaquent au greffon.

Sophie Brouard travaille aussi à l'identification de biomarqueurs sanguins du risque de rejet de greffe. L'objectif est de prévoir le rejet pour l'anticiper au niveau thérapeutique et également de réduire le nombre de biopsies sur le greffon, une manœuvre à risque pour celui-ci. Forte de 163 publications scientifiques et 13 brevets, elle a participé à la fondation des entreprises TcLand Expression, sur les biomarqueurs, et Effimune, devenue OSE Immunotherapeutics, qui traite des réactions immunitaires lors de cancers et de maladies auto-immunes.

¹. CRTI, unité Inserm/CHU de Nantes/Université de Nantes/ITUN.

Françoise Lamnabhi-Lagarrigue, reine de l'automatique

Événement Directrice de recherche émérite au CNRS, Françoise Lamnabhi-Lagarrigue a reçu le prix Irène Joliot-Curie 2019 de la femme scientifique de l'année pour ses travaux dans le domaine de l'automatique.

PAR GRÉGORIE FLÉCHET

Ce prix Irène Joliot-Curie de la femme scientifique de l'année¹ revêt une saveur toute particulière pour Françoise Lamnabhi-Lagarrigue. Première femme directrice de recherche de classe exceptionnelle dans son domaine, la voilà à présent saluée par ses pairs pour ses contributions à une discipline où ses consœurs furent longtemps sous-représentées. Surtout, elle se réjouit que soit mise en valeur l'automatique, savant mélange de mathématiques, de traitement du signal et d'informatique, qui la passionne depuis presque quarante ans mais reste méconnue du grand public. Le domaine infuse pourtant de nombreux secteurs – aéronautique, agroalimentaire, distribution d'électricité, robotique, industrie chimique, etc. – qui s'en servent notamment pour optimiser leurs performances.

« Il s'agit de développer des méthodes et des outils, pour la modélisation d'une très grande diversité de systèmes dynamiques, pour leur analyse et pour leur commande, dans le but de réaliser des tâches ou d'optimiser des critères, explique la directrice de recherche émérite au CNRS au Laboratoire des signaux et systèmes (L2S)². Et depuis quelques semaines, l'automatique est aussi envisagée dans la lutte contre le Covid-19, par exemple pour concevoir des scénarii de déconfinement capables d'assurer une survie maximale de la population tout en limitant les dommages économiques. » La revue *Annual Reviews in Control*, qu'elle dirige depuis 2015, a d'ailleurs lancé un appel à contribution³ dans l'objectif de mieux prédire la dynamique d'évolution de cette maladie.

De la recherche fondamentale au champ applicatif

Françoise Lamnabhi-Lagarrigue découvre l'automatique au tournant des années 1980. « Mathématicienne de formation⁴, j'ai choisi d'aborder ce domaine de recherche par son versant théorique au travers de l'analyse et du contrôle des systèmes non linéaires. » Après une première thèse en

traitement du signal et automatique soutenue en 1980, elle est recrutée au L2S la même année. Malgré les questions très fondamentales auxquelles elle se consacre ensuite pendant sa thèse d'État en physique obtenue en 1985, la scientifique perçoit vite le potentiel applicatif de ses travaux. Le déclic vient deux ans plus tard lors d'un stage postdoctoral à l'université d'État d'Arizona : « À l'époque, les chercheurs en automatique américains collaboraient déjà avec des industriels pour les aider à améliorer la robustesse et l'efficacité de certaines applications destinées aux secteurs de l'automobile et de l'aéronautique. »

Dès son retour en France, elle met en pratique cette philosophie coopérative. La chercheuse se voit en effet proposer un contrat avec le groupe PSA. Sa mission : mettre à profit l'automatique pour améliorer un système électronique embarqué dédié au contrôle de châssis d'automobiles : « Ce premier partenariat industriel réussi a achevé de me convaincre de la nécessité d'accentuer les interactions entre les équipes de recherche académiques et les entreprises susceptibles de bénéficier de notre expertise. »

Fédérer la communauté scientifique européenne

La chercheuse enchaîne alors les déplacements à travers l'Europe pour tisser des liens avec les équipes de sa communauté scientifique. Forte de ces rencontres prometteuses, elle crée, dès 1998, le premier réseau européen

Ses dates clés

- 1980 Doctorat en traitement du signal et automatique, université Paris-Sud. Recrutée au L2S.
- 1985 Doctorat d'État ès sciences physiques, université Paris-Sud.
- 1998 Création du premier réseau européen de recherche en automatique.
- 2008 Prix Michel-Monpetit de l'Académie des sciences.
- 2016 Prix IFAC (International federation of automatic control) Fellow.
- 2019 Prix Irène Joliot-Curie de la femme scientifique de l'année.



de recherche en automatique puis coordonne, dans la foulée, le plus grand réseau Marie Curie Training Site. Il permettra à 160 chercheurs post-doctorants de bénéficier de bourses de séjours à l'étranger de plusieurs mois. Entre 2004 et 2014, elle supervise ensuite les deux volets du réseau d'excellence européen Hycon (Highly-complex and networked control systems) qui vont faire dialoguer des scientifiques de vingt-six institutions de recherche européennes avec des dizaines d'acteurs privés spécialisés dans le contrôle des réseaux de communication, les procédés industriels ou la distribution d'énergie.

Pour pérenniser ces collaborations, Françoise Lamnabhi-Lagarigue fonde également l'Institut européen pour les systèmes embarqués (EECI) qui propose un large choix de formations aux doctorants en automatique du monde entier et enseignées par des experts internationaux renommés. « Depuis sa création, en 2006, l'institut a accueilli plus de 4 000 étudiants désireux d'élargir leurs connaissances en automatique théorique ou appliquée, se félicite-t-elle. Ces dernières années, le nombre de participants issus du secteur privé n'a cessé de croître, preuve de la relation de confiance que nous avons su instaurer avec l'industrie. »

Des réseaux électriques aux réseaux neuronaux

Malgré ce bouillonnement d'activités, ses travaux fondamentaux restent une constante dans sa carrière.

Aujourd'hui, ils se concentrent notamment sur la conception d'observateurs, sortes de logiciels, peu coûteux et fiables, qui permettent de déterminer une grandeur physique sans utiliser de capteurs physiques. Tandis que, côté applications et en lien avec le centre de recherche et d'innovations SuperGrid Institute de Lyon, elle développe des outils numériques facilitant l'insertion des énergies renouvelables, éolienne et solaire, dans le réseau électrique, et ce sans que celui-ci ne soit déstabilisé par le caractère fluctuant de ces sources. Un principe, qui, transposé aux réseaux neuronaux, pourrait contribuer à améliorer le traitement de la maladie de Parkinson. « Ces outils peuvent en effet servir à concevoir des dispositifs prenant en compte l'activité cérébrale du patient. Le but serait d'espacer les opérations de maintenance du pacemaker qui alimente les électrodes dans le cerveau. »

Depuis peu, la chercheuse s'intéresse aussi à l'impact des technologies émergentes sur notre société. Dans cette perspective, elle coordonne un panel d'experts internationaux dédié à l'analyse des questions éthiques et sociétales, toutes disciplines confondues, liées au déploiement à grande échelle de la 5G et de l'intelligence artificielle. « Cette initiative, International Panel For Ethics of Emerging Technology (IPEET), a pour objectif de répondre collectivement et indépendamment au besoin d'encourager et d'assurer une recherche et une innovation responsables autour de ces questions. C'est urgent... », conclut-elle. II

1. Ce prix récompense une femme ayant apporté une contribution remarquable dans le domaine de la recherche publique ou privée et dont les travaux sont reconnus tant sur le plan national qu'international. 2. Unité CNRS/CentraleSupélec/Université Paris-Sud. 3. <https://www.journals.elsevier.com/annual-reviews-in-control/call-for-papers/systems-control-research-efforts-against-covid-19-and-future> 4. Elle est titulaire d'une maîtrise en mathématiques de l'université Paul Sabatier de Toulouse.

Roland Marchal: «J'ai été un otage académique»

SOCIÉTÉS



Entretien. Le chercheur du CNRS a été libéré le 20 mars dernier après neuf mois et demi de détention en Iran. Il s'interroge sur la capacité des scientifiques à pouvoir continuer à y travailler, alors que Fariba Adelkhah, sa compagne, a été condamnée en mai à une lourde peine de prison.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURE CAILLOCE

De quoi vous accusaient les autorités iraniennes, vous qui êtes un spécialiste du Sahel ?

Roland Marchal : Ils m'ont d'abord accusé d'être le chef d'un grand réseau d'espionnage français en Iran, puis ça a évolué. À un moment, j'essayais d'influencer la politique extérieure de l'Iran – j'avais en effet invité un chercheur iranien à une conférence sur la mer Rouge organisée à Sciences Po en mars 2019. À un autre, je travaillais pour le Comité de sanctions des Nations unies sur l'Iran, sanctions dont je ne connaissais même pas l'existence alors ! Tout ça sur la base d'un mail d'un ami m'indiquant que des représentants de ce comité étaient présents en République centrafricaine à mon arrivée... À la fin, j'étais devenu un agent de la CIA, car je connaissais des diplomates américains – je travaille dans des pays d'Afrique où les États-Unis sont très présents – et que j'avais été invité à participer à des conférences organisées par le Département d'État par le biais d'un de ses services aujourd'hui appelé Bureau of Research and Intelligence (*intelligence veut également dire espionnage en anglais, NdIrr*).

N'avez-vous jamais vu de juge ?

R. M. : J'ai vu un juge une seule fois, en février 2020, soit huit mois après mon arrestation. Il m'a signifié le chef d'inculpation pour lequel j'aurais dû être jugé en mars dernier – avant d'être finalement libéré : collusion en vue de menaces sur la sécurité intérieure iranienne, sans me dire sur quels faits cette accusation était fondée. Jusque-là, j'étais aux seules mains des Pasdaran, les Gardiens de la révolution, qui dépendent uniquement du Guide suprême – hors du système judiciaire iranien classique.



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

Quel était votre état d'esprit durant tout ce temps ?

R. M. : J'ai d'abord cru à un malentendu car je ne travaille pas sur l'Iran et ne me suis jamais exprimé sur ce pays, puis j'ai espéré plusieurs fois ma libération, et à chaque fois cet espoir a été vain. Après plusieurs mois, et pour éviter des déceptions chaque fois plus douloureuses, j'ai cessé d'espérer une libération rapide. Le meilleur scénario que j'entrevois pour moi, c'était une libération à l'été 2020 ; un scénario raisonnable, c'était après les élections américaines de novembre 2020 ; le scénario le pire était que je sois condamné et que je doive effectuer une partie de ma peine. Autant vous dire que ma libération le 20 mars dernier a été une complète surprise pour moi.

Avez-vous eu connaissance du comité de soutien et des nombreuses actions menées en France ?

R. M. : Non, je n'en ai rien su durant des mois. Le consul de France le savait, mais nos échanges étaient brefs et très surveillés. C'est mon frère qui a brièvement mentionné le comité de soutien, lorsque j'ai pu l'appeler le 24 décembre. Le véritable enjeu de mon arrestation m'échappait également à l'époque. Ce sont mes gardiens qui ont fini par me le dire, en janvier 2020, alors que je faisais une grève de la faim pour réclamer l'accès à mon avocat et l'opération d'une hernie qui me faisait souffrir depuis des mois. Ils m'ont dit : « *Votre grève de la faim ne sert à rien, car votre sort est lié à celui d'un ingénieur iranien détenu en France.* »

“Dans l'esprit des Pasdaran, tout universitaire est un espion en puissance...”



© GUILLAUME BONNE/IAFTV/APP

► Roland Marchal,
le 7 avril 2020.

La libération de cet ingénieur iranien, c'est donc cela qui s'est joué durant tout ce temps ?

R. M. : Oui, en tout cas rétrospectivement. Cet ingénieur soupçonné de vouloir faire entrer du matériel technologique en Iran en violation des sanctions décrétées par les États-Unis a été arrêté à Nice en février 2019. Le 28 mai, la cour d'appel d'Aix-en-Provence a rendu un avis favorable à son extradition vers les États-Unis – et j'ai été interpellé le 6 juin à Téhéran. L'ingénieur a fait appel du jugement. La Cour de cassation a finalement confirmé la possibilité juridique d'une extradition le 11 mars 2020, mais le Premier ministre ne l'a pas signée. L'ingénieur iranien a été libéré. Il est parti le vendredi 19 mars au matin de Paris, et moi le samedi de Téhéran... J'ai été un otage académique, mais je ne suis pas le seul. Depuis l'élection de Donald Trump et le retour des sanctions contre l'Iran, les Pasdaran ont de plus en plus recours à ce moyen de pression.

Qui sont ces scientifiques emprisonnés en Iran ?

R. M. : Il y a eu de nombreuses arrestations d'universitaires binationaux, avec une prédilection pour les Irano-Britanniques et Irano-Américains, car ces deux pays ont arrêté de nombreux Iraniens au prétexte qu'ils essayaient de passer outre les sanctions. Fariba a partagé sa cellule avec une anthropologue irano-australienne ; j'ai pour ma part partagé la mienne avec un groupe de spécialistes de l'environnement d'une ONG iranienne – mais présidée par un Iranien qui avait également la nationalité américaine –, arrêtés alors qu'ils travaillaient dans la région du Baloutchistan. Dans l'esprit des Pasdaran, tout universitaire est un espion en puissance... et travaille, même s'il ne le sait pas, pour les services secrets de son pays ! L'une des choses qu'ils n'arrivent pas à comprendre, c'est la

liberté dont nous jouissons, notre capacité à choisir nos problématiques de recherche.

Faut-il cesser la coopération scientifique avec l'Iran ?

R. M. : Je suis universitaire et je pense qu'il est important d'avoir une coopération avec ce pays et de développer les échanges universitaires. Je suis donc hostile à un quelconque boycott. Mais en tant que scientifiques, nous devons pouvoir travailler en Iran en ayant la garantie que nous ne serons pas inquiétés sans motif valable, ou sur des bases complètement délirantes... de la même façon qu'on n'arrête pas n'importe comment un journaliste étranger. Ce doit être une priorité d'agenda pour nos autorités, au niveau français et européen, que d'obtenir un minimum de garanties sur le respect des scientifiques.

Fariba Adelhkhah, toujours détenue en Iran, s'est vu notifier le 16 mai sa condamnation. Avez-vous de ses nouvelles ?

R. M. : Fariba a été condamnée à la peine maximale, soit cinq ans de prison pour « collusion » contre la sûreté nationale, auxquels s'ajoute un an pour « propagande contre le système ». Nous y étions préparés : en première instance, la peine maximale est généralement prononcée dans les affaires concernant la sécurité nationale. C'est en appel que, théoriquement, le juge regarde la valeur de l'accusation et les arguments de la défense, et peut décider de réduire la durée de la peine de façon plus ou moins substantielle. Une chose est sûre : Fariba souhaite que sa libération se fasse sans conditions. Elle veut sortir la tête haute, avec son ordinateur et ses notes de terrain, et ne veut pas que sa libération soit assortie de restrictions de ses droits d'expression en Iran. ||

Les ondes térahertz enfin domptées

MATIÈRE

Physique. Sécurité, télécommunication, médecine... aucun domaine ne semble échapper aux ondes térahertz. Ces rayons situés entre l'infrarouge et les micro-ondes feront bientôt partie de notre quotidien. Explications.

PAR JULIEN BOURDET

Voir à travers les vêtements ou le plastique, détecter des explosifs ou des produits toxiques dans un paquet, identifier des cancers de façon précoce... Les ondes térahertz (THz), s'apprêtent à révolutionner notre quotidien en offrant une multitude d'applications précieuses. Jusqu'ici confinés au laboratoire, les rayons T, comme on les appelle aussi, ont fait ces dernières années leur entrée dans le monde industriel.

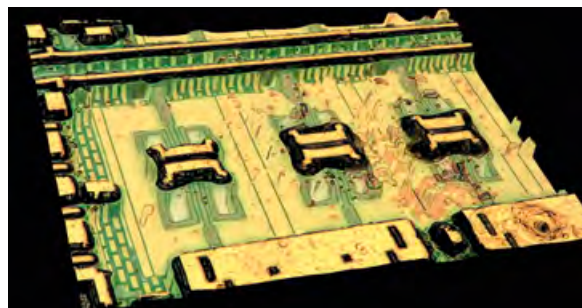
Des rayons doux mais perçants

Tout comme la lumière, les ondes térahertz sont des ondes électromagnétiques dont la fréquence s'étend entre 0,1 et 10 THz. Dans le spectre électromagnétique, ces radiations se situent ainsi entre les micro-ondes, utilisées notamment dans nos fours, et l'infrarouge, émis entre autres par nos télécommandes. Les propriétés des ondes THz sont extrêmement séduisantes. « Comme les micro-ondes, elles possèdent un fort pouvoir pénétrant leur permettant de traverser des matériaux tels que les vêtements, le bois, le plastique. Et comme la lumière visible, elles se laissent focaliser, pouvant révéler des détails fins, de l'ordre du millimètre, voire moins. Enfin, comme l'infrarouge et à l'inverse des rayons X, elles sont non

ionisantes, et donc a priori sans danger pour le vivant », explique Eric Freysz, du Laboratoire ondes et matière d'Aquitaine¹.

Si la première émission THz remonte à 1911, les ondes térahertz sont restées pendant longtemps quelque peu négligées par les scientifiques, faute de sources et de détecteurs suffisamment performants. Mais la recherche dans le domaine est aujourd'hui très active : pas moins d'une trentaine d'équipes travaillent sur le sujet rien qu'au CNRS. Les progrès technologiques ont permis de mettre au point des sources toujours plus compactes et puissantes et des détecteurs toujours plus sensibles et simples d'utilisation. Les rayons T enfin domptés, les idées d'applications fleurissent et certaines d'entre elles sont d'ores et déjà opérationnelles.

▲ Circuit intégré comportant des capteurs térahertz.



© IEEE MICROWAVE MAGAZINE DOI 10.1109/MMM.2019.2922119

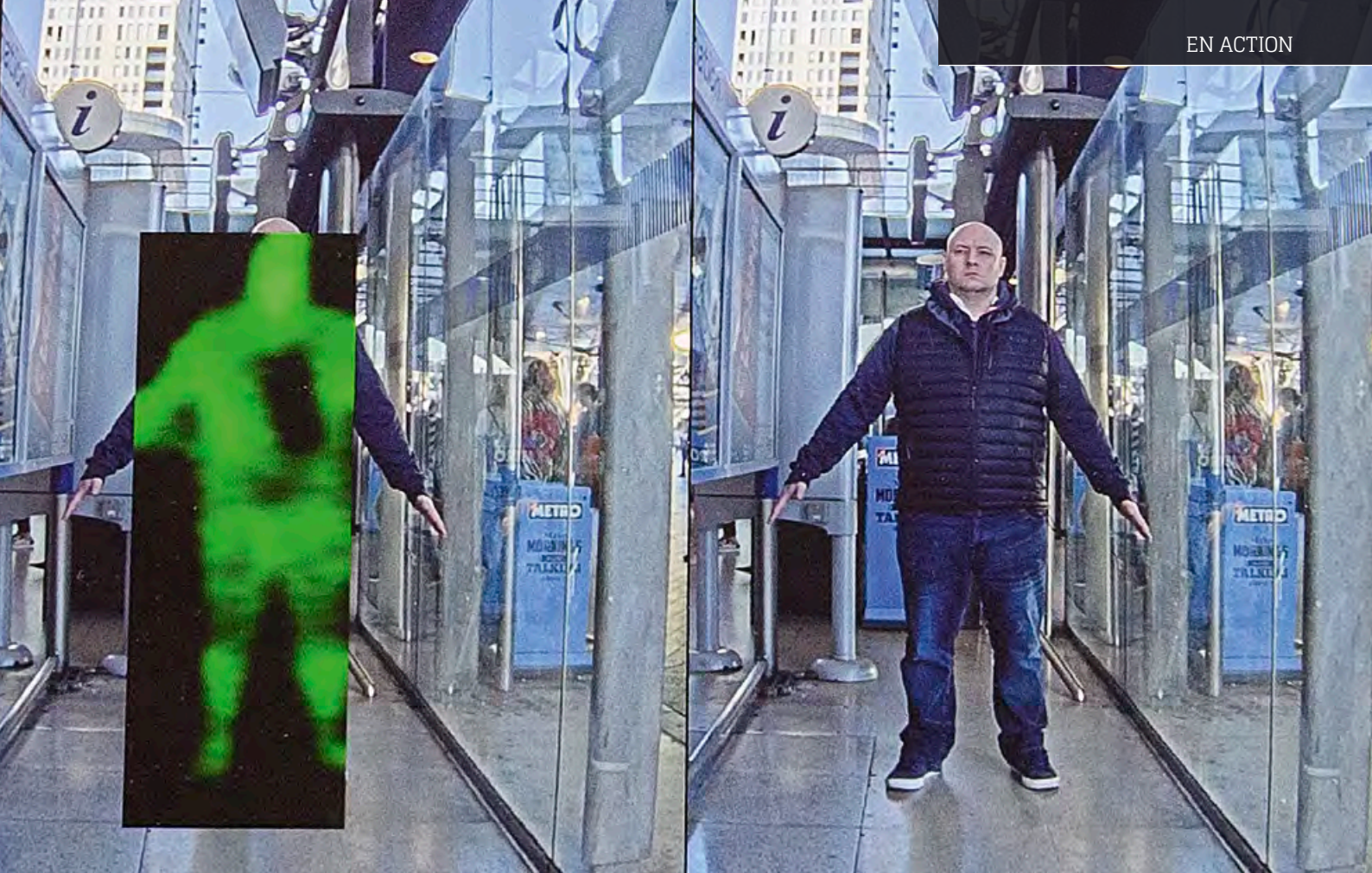
Dans le domaine de la sécurité d'abord, comme les ondes THz passent à travers les vêtements mais sont réfléchies par le métal et absorbées par les molécules d'eau, on pourrait les utiliser pour détecter des armes dissimulées. « Ces scanners corporels existent déjà dans certains aéroports mais ils fonctionnent à quelques dizaines de gigahertz (GHz). En passant au térahertz, on pourrait les rendre plus précis », note Juliette Mangeney, du Laboratoire de physique de l'École normale supérieure².

Détection et contrôle de qualité

On attend également beaucoup des ondes THz dans l'imagerie médicale, par exemple pour détecter de façon précoce certains cancers. Comme les cellules cancéreuses sont plus vascularisées et contiennent ainsi davantage d'eau, elles apparaissent différemment. Ce qui pourrait aider les chirurgiens à s'assurer que le retrait de la tumeur est complet, dans le cas d'un cancer du sein par exemple. « Nous avons développé en collaboration avec un laboratoire allemand un système qui permettra en 30 minutes de savoir si tous les tissus atteints ont bien été retirés. Les premiers tests dans les hôpitaux devraient commencer l'année prochaine », s'enthousiasme Patrick Mounaix, du laboratoire de l'Intégration du matériau au système³.

Ces ondes permettent aussi de faire de la spectroscopie, c'est-à-dire mesurer le pouvoir d'émission ou d'absorption d'un matériau, et identifier ainsi certaines espèces chimiques présentes. « La plupart des molécules ont des fréquences fondamentales de

1. Unité CNRS/Université de Bordeaux. 2. Unité CNRS/ENS Paris-PSL/Sorbonne Université/Université Paris-Diderot. 3. Unité CNRS/Université de Bordeaux/Bordeaux INP. 4. Unité CNRS/Université de Lille/Université Polytechnique Hauts-de-France/Centrale Lille Institut.



© LEON NEAL/GETTY IMAGES/AFP

vibration ou de rotation dans le domaine des térahertz », précise Patrick Mounaix. Il sera donc possible de détecter des explosifs ou des agents pathogènes cachés sur des personnes ou dans des enveloppes ; de déterminer la fraîcheur d'aliments ou le degré de maturité de fruits ; ou encore de caractériser des gaz polluants dans l'air.

Dans le secteur pharmaceutique, on peut contrôler de cette façon la conformité des molécules produites. Et dans l'industrie, on se sert des rayons T pour la mesure d'épaisseur individuelle de revêtements très fins (10 à 100 microns) et opaques comme la peinture de voiture. Bien d'autres applications dans le domaine du contrôle de qualité devraient suivre : inspection de pièces d'avions dans l'aéronautique ou encore recherche de défauts dans des matériaux en plastique en cours de fabrication.

Un meilleur débit pour le Wifi

Les télécommunications sont aussi concernées. Parce qu'elles correspondent à des fréquences plus

élevées que les ondes utilisées actuellement (radio, WiFi), les ondes THz permettront d'atteindre des débits bien supérieurs aux 10 gigabits par seconde (Gbits/s) obtenus à ce jour. Et rendront ainsi possible à terme la transmission sans fil de données très volumineuses sur les téléphones portables. « Plusieurs équipes dans le monde, dont la nôtre, ont montré qu'il était possible d'obtenir en laboratoire un débit de 100 Gbits/s avec des émetteurs THz délivrant des ondes de 300 GHz environ. En parallèle, en gagnant en puissance, on est parvenu à envoyer des données, certes à un débit inférieur, mais sur un kilomètre au lieu de quelques dizaines de mètres en laboratoire », explique Guillaume Ducournau, de l'Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie⁴.

Mais pour assister à un transfert massif de la science THz du laboratoire vers l'industrie, les chercheurs ont encore du pain sur la planche : ils devront développer des systèmes produisant ces ondes, les détectant et les mesurant, encore plus puissants,

▼ La caméra térahertz capte la chaleur corporelle du sujet, localisant les objets qui bloquent la chaleur.

GRAPHÈNE

Matériau bidimensionnel constitué d'une seule couche d'atomes de carbone, dont l'empilement constitue le graphite (la mine des crayons à papier).

plus compacts (quelques dizaines de centimètres carrés) et moins chers (quelques milliers d'euros). Ainsi en 2014, l'équipe de Juliette Mangeney a réussi à générer un rayonnement à partir d'un matériau innovant, le graphène, excité par des impulsions optiques ultracourtes. « Un premier pas important vers la mise au point d'un laser THz à la fois très compact et puissant, la source qui nous manque encore aujourd'hui », souligne-t-elle. Récemment, la physicienne a vu son projet sélectionné par le Conseil européen de la recherche. Objectif : réaliser d'ici à cinq ans un laser à base de graphène et démontrer son intérêt pour les télécoms et la sécurité. Vous n'avez pas fini d'entendre parler des rayons T !



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

LHC : dix ans après, l'aventure continue

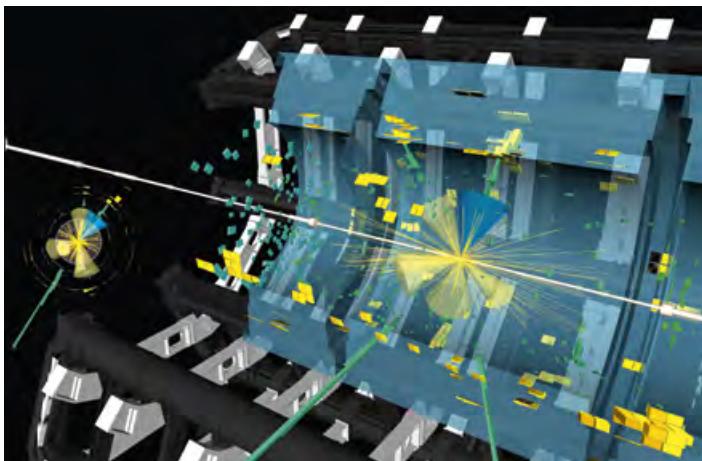
UNIVERS

Physique des particules. Au terme d'une décennie de fonctionnement, l'accélérateur du Cern a profondément renouvelé le visage de la physique de l'infiniment petit. Il redémarrera en 2021 avec des installations encore plus performantes.

PAR MATHIEU GROUSSON

Le 30 mars dernier, le LHC (Large Hadron Collider ou Grand collisionneur de hadrons en français) a fêté ses dix ans de fonctionnement à plein régime. Projetant les uns contre les autres, 30 millions de fois par seconde, des protons accélérés jusqu'à une vitesse proche de celle de la lumière, il s'appuie sur quatre expériences pour observer les particules issues de ces collisions. L'objectif des milliers de chercheurs, ingénieurs et techniciens qui participent à cette aventure scientifique inouïe qui se tient au Cern, à la frontière franco-suisse : dévoiler les lois fondamentales de notre Univers. Tandis que les installations sont en cours de mise à jour pour un niveau de performance accru, l'aventure est prévue pour durer au moins jusqu'en 2037.

▲ **Boson de Higgs produit en association avec deux quarks top dans Atlas.**



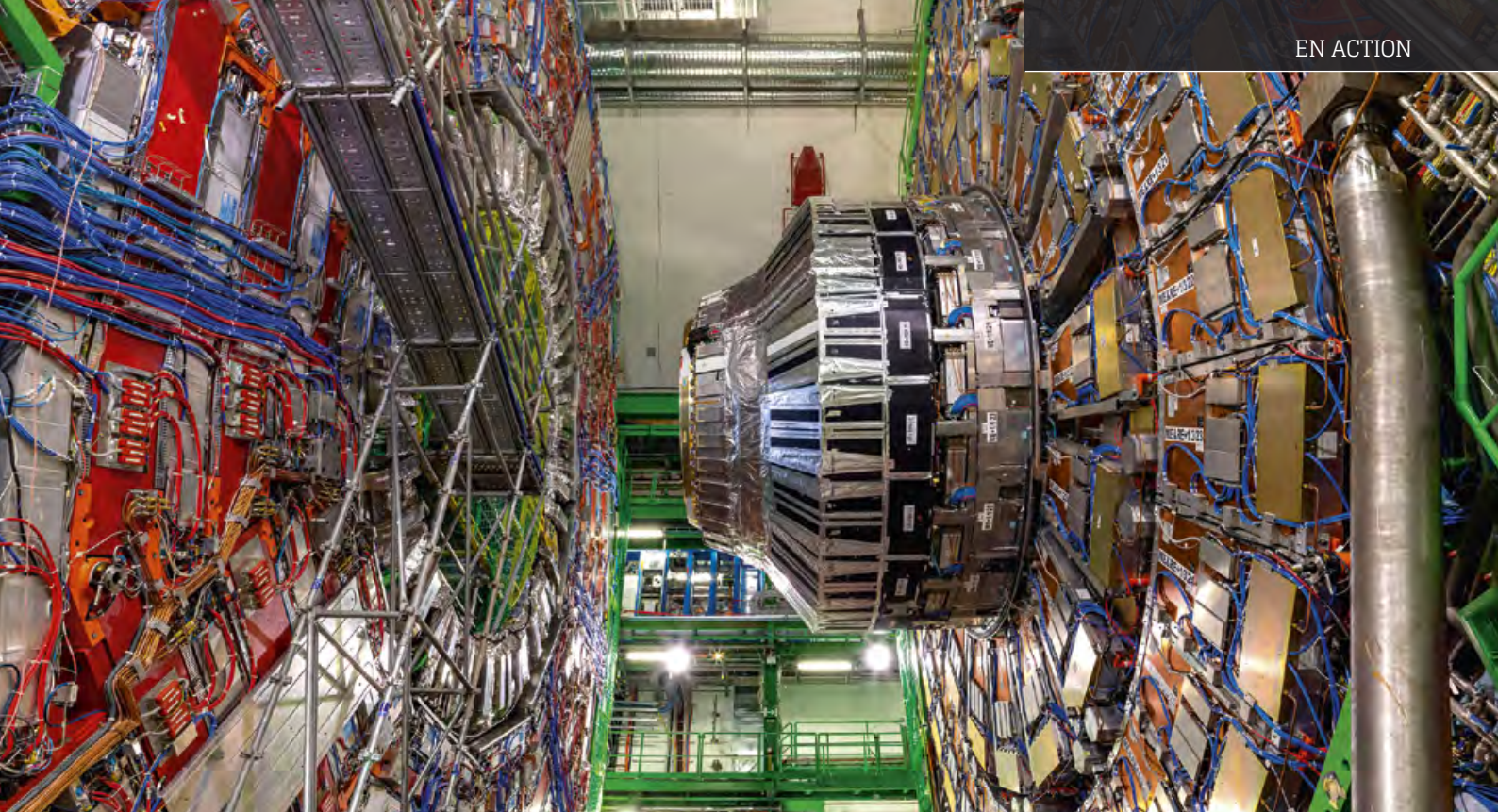
© CERN / ATLAS

L'expérience repose sur un principe simple : à chaque collision entre protons accélérés, en vertu de l'équivalence entre masse et énergie, l'énergie cinétique accumulée par ces particules se mue en « grains » de matière. Il y a une vingtaine d'années, les promoteurs du LHC avaient calculé que pour observer des phénomènes intéressants, les protons devraient atteindre une énergie de 7 téraélectronvolts, soit celle d'un moustique en vol, concentrée dans un volume mille milliards de fois plus petit. D'où la nécessité d'un accélérateur gigantesque et de quatre détecteurs hors-norme – Atlas, CMS, LHCb et Alice –, auxquels les scientifiques français apportent une contribution non négligeable. Comme le résume Laurent Vacavant, directeur adjoint scientifique à l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) du CNRS, « *la France participe à hauteur de 14 % au budget du Cern et à 10 % de l'effort sur les détecteurs. Concrètement, dix laboratoires de l'IN2P3 sont impliqués sur les quatre expériences, soit 250 chercheurs, 280 ingénieurs et techniciens, et une centaine de doctorants en permanence, auxquels s'ajoutent environ 150 personnes de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers du CEA.* »

Le boson de Higgs enfin détecté

Les dizaines de millions de capteurs qui équipent Atlas et CMS permettent des mesures dans tous les secteurs possibles. Une puissance grâce à laquelle les chercheurs ont pu mettre rapidement la main sur le boson de Higgs, une particule dont l'existence était postulée depuis 1964 pour expliquer la masse des autres particules. « *Au démarrage, on pensait qu'il faudrait 5 ou 6 ans avant de voir quelque chose*, raconte Isabelle Wingerter-Seez, responsable d'Atlas-France jusqu'en 2017. *Mais dès 2011, on a commencé à voir un signal sortir du bruit, et le 4 juillet 2012, nous avons pu confirmer que le boson de Higgs était bien là !* » Didier Contardo, responsable de CMS-France, ajoute : « *Nous savions comment l'observer au mieux, les expériences et la chaîne d'analyse se sont montrées aussi performantes qu'attendu, voire plus, et les deux détecteurs ont vu la même chose au même niveau de précision.* »

Le boson de Higgs apportait la dernière pierre manquante du modèle standard de la physique. Toutefois, Atlas et CMS avaient aussi été conçues pour révéler une nouvelle physique non décrite par ce modèle pour expliquer, entre autres, la nature de la matière noire, la valeur des constantes physiques ou l'absence d'antimatière.



© PATRICK DUMAS / LHC / CNRS PHOTOTHÈQUE

► Détecteur de l'expérience CMS dans sa configuration ouverte.

Mais pour l'instant, « nous n'avons pas observé l'once du début de quelque chose qui n'entre pas dans le cadre du modèle standard », se désole Isabelle Wingerter-Seez. Après avoir suivi les pistes les plus évidentes, les expérimentateurs se sont donc lancés dans un travail de bénédictins. « On cherche dans des recoins plus difficiles, des processus rares, des observables complexes, des modèles de nouvelle physique qui étaient a priori moins favorisés... », confirme Didier Contardo.

La surprise pourrait venir de l'expérience LHCb, dédiée à l'étude de la désintégration de particules appelées mésons beaux. En effet, d'après le modèle standard, matière et antimatière sont quasiment semblables en tout point. Or l'antimatière est totalement absente de l'Univers. LHCb étudie depuis plusieurs années les désintégrations des mésons beaux soit en électrons, soit en muons, sorte de cousins obèses des premiers. Or comme l'explique Renaud Le Gac, responsable de LHCb-France, « d'après le modèle standard, les deux processus devraient être parfaitement équivalents, ce qui d'après nos données n'est pas exactement le cas. À ce stade, ces différences ne sont pas encore significatives, mais elles sont en l'état la piste la plus sérieuse pour observer une physique qui sorte du cadre du modèle standard. »

Des quarks dans tous leurs états

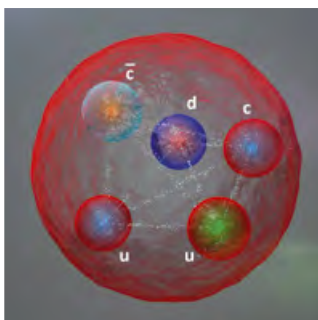
Restent d'autres belles découvertes inscrites dans le cadre du modèle standard. Ainsi l'expérience LHCb a pu produire en 2017 une particule composée de cinq quarks : le pentaquark. À la clé : une meilleure modéli-

sation des quarks – qui composent protons et neutrons – et de l'interaction forte, qui lie entre eux les quarks et les composants du noyau atomique.

L'interaction forte et ses médiateurs, les gluons, sont également au cœur des investigations menées auprès du détecteur Alice. Celui-ci fait entrer en collision des noyaux d'atomes de plomb afin de recréer un état très singulier de la matière dans lequel se trouvait l'Univers une micro-seconde après le big-bang : le plasma de quarks-gluons (ou QGP). « L'énergie du LHC permet l'obtention du QGP le plus chaud, le plus dense et à la durée de vie la plus longue jamais observée », explique Cvetan Cheshkov, coordinateur de physique adjoint d'Alice. On a ainsi pu préciser certaines propriétés du QGP et il s'avère qu'elles se rapprochent plus de celles d'un liquide sans friction que d'un gaz, un état de la matière sans équivalent connu.

Si le LHC a déjà apporté certaines réponses, il a ajouté de nouvelles questions parfois vertigineuses. Pour y répondre, toutes les équipes sont actuellement à l'œuvre pour améliorer les performances de l'accélérateur et des détecteurs dont la remise en service est prévue en 2021. Certaines de ces améliorations visent déjà à préparer la phase dite de LHC haute luminosité qui, à partir de 2027, et après adaptation de tous les matériels et logiciels d'analyse, verra au minimum quintupler le nombre de collisions par seconde au centre des détecteurs. Comme l'indique Laurent Vacavant, « à ce jour, nous n'avons recueilli que 5 % des données que le LHC prendra durant toute sa durée de fonctionnement. » Une chose est certaine, après dix ans, l'aventure continue plus que jamais. II

Représentation de la structure interne hypothétique d'un pentaquark.



© CERN / LHCb

Jupiter se dévoile

UNIVERS

Astrophysique. La sonde Juno orbite depuis près de quatre ans autour de Jupiter, dévoilant la dynamique et la structure interne de la géante gazeuse. Premier bilan d'une mission qui pourrait être prolongée jusqu'en 2026.

PAR VAHÉ TER MINASSIAN

Les chercheurs commencent tout juste à interpréter la moisson de données récoltées au cours de la mission Juno, en orbite autour de Jupiter depuis bientôt quatre ans. Quand en 2011, la Nasa lance Juno en vue d'étudier la structure interne, la formation et la dynamique de l'atmosphère et de la magnétosphère de la géante gazeuse, elle estime que la sonde ne pourra résister au mieux que dix-huit mois aux dangereuses ceintures de radiations de la planète. L'engin spatial doit,

en effet, réaliser une série de révolutions qui va le faire passer tous les 14 jours entre l'astre géant et ses ceintures de radiation chargées de particules accélérées mortifères pour l'électronique de bord.

Mais le 4 juillet 2016, lors de l'insertion autour de Jupiter sur une orbite de 53 jours, un dysfonctionnement du moteur principal a été détecté, laissant craindre que l'allumage suivant – destiné à raccourcir l'orbite à 14 jours – soit fatal. Toutes les options ont été étudiées et, après vérification,

l'orbite de 53 jours avait les caractéristiques adéquates. Il a été décidé d'y maintenir la sonde, mais la Nasa a été contrainte de repousser la fin des opérations de 2017 à 2021, un minimum de 35 survols étant nécessaire à Juno pour atteindre ses objectifs.

Cerner la nature de la géante

« La nouvelle orbite a, heureusement, exactement les mêmes qualités que la première, explique Philippe Zarka, directeur de recherche au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (Lesia), et co-investigateur de la mission Juno. Elle passe au-dessus des pôles et de l'équateur aux mêmes altitudes de 10 000 et de 5 000 kilomètres environ. Et elle survole aussi une longitude différente à chaque passage, donnant à la sonde la possibilité de balayer la totalité de la surface de la planète en profitant de la rotation de cette dernière sur elle-même. Elle a en plus l'avantage, étant plus allongée, de traverser la magnétopause,

1. Unité CNRS/Observatoire de Paris-PSL/Sorbonne Université/Université de Paris.

► Un anticyclone (en blanc) dans la haute atmosphère de Jupiter.

cette zone frontière magnétique mal connue le long de laquelle est dévié le vent solaire. »

Alors qu'elle entame sa 26^e orbite, Juno peut se targuer de belles réussites. La mission avait notamment pour objectif de cartographier le champ gravitationnel jovien avec une précision cent fois supérieure aux cartes réalisées jusqu'ici. Grâce à cette carte, les scientifiques ont pu mieux cerner la nature du cœur de Jupiter. Ce dernier ne serait pas constitué d'une graine métallique solide comme le supposaient certaines théories, mais d'un noyau diffus d'une masse dix fois supérieure à celle de la Terre et composé d'éléments chimiques plus lourds que l'hélium. Ce qui, selon les chercheurs, privilégie l'hypothèse d'une collision avec un objet de la taille d'Uranus au moment de la formation de Jupiter.

Juno a aussi livré de précieuses informations sur l'atmosphère de ce monde 318 fois plus massif que la Terre. Elle a ainsi mesuré que les fameuses bandes colorées caractéristiques de sa surface ont une épaisseur de l'ordre de 3 000 kilomètres, tandis que la Grande Tache rouge est plus superficielle : 300 km à peine d'épaisseur. Les mesures réalisées lors des précédentes missions montrent que ce titanesque anticyclone de 15 000 km de long et de 12 000 de large, semble avoir fortement rapetissé au

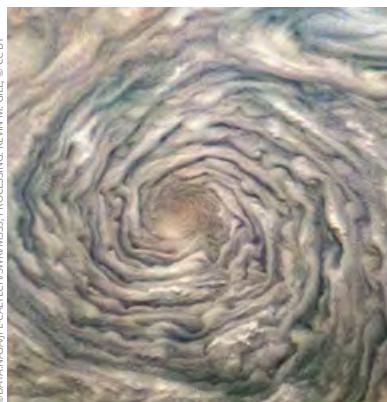
cours de ces trente dernières années. Juno pourrait nous en apprendre plus sur ce déclin qui, s'il se poursuit, implique une disparition complète de cette tache emblématique d'ici à 35 ans... La sonde a également fourni des clichés inédits des pôles où les astronomes ont eu la surprise d'observer des ensembles de cyclones régulièrement répartis autour d'un vortex central : huit au Nord, formant un octogone et cinq au Sud, disposés aux sommets d'un pentagone.

À la recherche d'eau

Les mesures réalisées en 1995 par la sonde atmosphérique de la mission Galileo juste avant sa désintégration avaient détecté très peu d'eau. Les observations de Juno semblent en revanche indiquer que les brumes d'ammoniac qui recouvrent la planète masquent par endroits des nuages d'eau circulant à des altitudes plus basses. *« Juno a relevé une grande disparité des teneurs de certains gaz comme l'ammoniac à l'échelle de la planète, ainsi qu'une abondance d'éclairs d'orages près des pôles »,* explique Philippe Zarka. *Cela accredit la thèse selon laquelle Galileo était tombée dans une région équatoriale particulièrement aride mais qu'ailleurs de l'eau est bel et bien présente. »* Enfin, l'engin a mesuré avec une telle précision le champ magnétique jovien qu'il a été possible d'établir que ce champ connaît des variations séculaires, tout comme celui de la Terre. Ces informations ont ainsi permis à l'équipe du Lesia de modéliser les propriétés des émissions radio de Jupiter.

L'aventure de Juno est loin d'être terminée. Les chercheurs comptent demander à la Nasa de prolonger son fonctionnement de cinq ans, pour un total de 77 orbites décrites. Avec trois objectifs : récolter un supplément de données, étudier l'environnement de Jupiter au moment d'un regain d'activité du Soleil et réaliser des survols multiples des lunes joviennes, Ganymède, Europe et Io. ■

► Vortex octogonal de 2 000 km de large, observé par Juno au pôle Nord de Jupiter.



© DATA NASA/JPL CALTECH/NOVA/ISS/PROCESSING: KEVIN M. GILL © CC BY



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

En bref

NOMINATION

François Houllier, président-directeur général de l'Ifremer, a été élu, le 23 avril, président de l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (AllEnvi).

RÉCOMPENSE

Le Grand Prix d'archéologie 2020 de la Fondation Simone et Cino Del Duca - Institut de France, est attribué à la mission franco-hellénique de Dikili Tash en Grèce, pour ses travaux sur cet habitat essentiellement protohistorique (du 7^e au 2^e millénaire av. J.-C.). La mission est dirigée, du côté français, par Pascal Darque et Zoï Tsirtsoni du laboratoire Archéologies et sciences de l'Antiquité (ArScAn).

EUROPE

Onze projets hébergés par le CNRS sont lauréats de l'appel Advanced Grant 2019 du Conseil européen de la recherche, qui finance cette année 185 scientifiques confirmés et reconnus tant au niveau national qu'international, pour un montant total de 450 millions d'euros.

INNOVATION

Le projet pilote du Conseil européen de l'innovation (EIC), destiné à détecter et développer des innovations technologiques, a annoncé le 11 mai dernier les 35 projets sélectionnés. Sur les 15 projets impliquant un partenaire français, huit incluent une unité du CNRS et de ses partenaires.

PARTENARIAT

Le Laboratoire plasmas et conversion d'énergie (Laplace) et la société NXP viennent de créer le laboratoire commun Sema (Systèmes embarqués pour la mobilité autonome). Ses travaux portent sur la sûreté de fonctionnement des électroniques embarquées, notamment pour les véhicules autonomes.

NOMINATIONS

Le 1^{er} mai, Francesca Grassia a été nommée secrétaire générale du Comité national de la recherche scientifique (CoNRS). Le 15 avril, Arnaud Lalo a de son côté été nommé responsable Opérations auprès du directeur général délégué à la science du CNRS.

Des empreintes de dinosaures dans une grotte de Lozère

© RÉMI FLAMENT/JOURNAL OF VERTEBRATE PALEONTOLOGY

VIVANT 

Paléontologie. Des empreintes de sauropodes, des dinosaures herbivores d'une trentaine de mètres de long, ont été retrouvées au plafond d'une grotte située sous le causse Méjean, en Lozère.

PAR LAURE CAILLOCE

C'est une sortie de spéléologues amateurs pas banale qui s'est déroulée ce jour de décembre 2015, dans la grotte de Castelbouc en Lozère. Cette cavité, très prisée des spéléologues débutants et accessible par un long boyau étroit, a révélé pour la première fois le trésor qu'elle conservait depuis des millions d'années : des traces de dinosaures géants, bien visibles au plafond du « grand tunnel » – une salle de 80 mètres de long, 20 mètres de large et 10 mètres de hauteur sous plafond. « *Ce qui est fou, c'est que des milliers de personnes sont déjà passées par cette grotte, sans jamais voir quoi que ce soit*, s'étonne encore Jean-David Moreau, paléontologue au laboratoire Biogéosciences¹ de Dijon, qui

organisait ce jour-là la sortie spéléo de l'Association paléontologique de Lozère qu'il préside. *Il a suffi qu'une personne lève les yeux vers le plafond et regarde un peu mieux que d'habitude pour repérer les traces : des empreintes bien visibles semblant appartenir à des dinosaures géants.* »

Trois pistes de dinosaures géants

Caractériser ces traces à la seule lumière des lampes frontales n'est pas chose aisée, et il a fallu que le chercheur et son équipe reviennent à plusieurs reprises pour confirmer l'incroyable trouvaille : l'on était bien en présence de trois pistes d'une vingtaine de mètres de long laissées par des sauropodes, des dinosaures herbivores quadrupèdes, au Jurassique moyen, il y a 170 millions d'années².

« *Deux des pistes laissent voir nettement l'alternance pieds-mains, les mains se caractérisant par leur forme en demi-lune. Certaines des empreintes révèlent les traces des cinq doigts et des griffes*, décrit le scientifique. *Les plus grandes mesurent 1,25 mètre de long, ce qui les classe parmi les plus grandes empreintes de dinosaures identifiées dans le monde, et ont été laissées par des bêtes dont la taille devait avoisiner les 30 mètres.* »

1. Unité CNRS/EPHE/Univ. de Bourgogne. 2. J.-D. Moreau *et al.*, « Middle Jurassic tracks of sauropod dinosaurs in a deep karst cave in France », *Journal of Vertebrate Paleontology*, 25 mars 2020.

► Ces empreintes du Jurassique moyen ont été trouvées lors d'une sortie spéléologique.

Cette découverte est inédite à plus d'un titre : c'est en effet la première fois que l'on retrouve des empreintes de dinosaures géants dans une grotte sur la planète. Mais c'est aussi la première fois que l'on trouve des empreintes de sauropodes dans le bassin des Causses, pourtant très riche en traces fossiles : il existe dans cette zone de plusieurs centaines de kilomètres carrés, à cheval entre l'Aveyron, la Lozère, le Gard et l'Hérault, des dizaines de sites à empreintes fossiles... mais aucune trace des géants herbivores n'y avait été découverte jusqu'à ce jour. « *Le bassin des Causses, aussi appelé golfe des Causses, a enregistré toute l'histoire géologique du Jurassique, soit 55 millions d'années, raconte le paléontologue spécialiste d'ichnologie, la science des empreintes. Durant cette période, la mer s'est retirée à trois reprises dans cette région, laissant la possibilité aux dinosaures de s'installer : il y a 200 millions d'années, il y a 168 millions d'années – c'est dans cette fenêtre que l'on enregistre les traces de Castelbouc – et il y a 145 millions d'années.* »

Des empreintes vues par en dessous

Les sédiments se sont accumulés au fil du temps, et les couches géologiques ont succédé aux couches géologiques. Des millions d'années après le passage des dinosaures, les infiltrations d'eau dans ces milieux karstiques, mêlant calcaires et argiles, ont fini par former les centaines de cavités naturelles présentes dans la région des Causses. Ce qui explique pourquoi il est possible de retrouver des traces de dinosaures sur le plafond d'une grotte – ce qui est *a priori* contre-intuitif ! « *Il n'y a pas eu de bouleversement des couches géologiques. Les traces que l'on observe sont en réalité des contre-empreintes, qui correspondent au dessous des pieds des sauropodes, élucide Jean-David Moreau. C'est comme si on regardait la piste laissée par les dinosaures par en dessous, l'eau s'étant infiltrée et ayant creusé le sol sous la couche géologique où se trouvent les empreintes.* » Spécialiste des traces mais aussi de la flore fossile, le paléontologue a pu reconstituer l'écosystème dans lequel évoluaient les sauropodes il y a 170 millions d'années. « *On a retrouvé des plantes, notamment des restes de conifères, et de petits restes de poissons d'eau marine. L'étude sédimentologique réalisée dans la grotte permet de dire que l'on se trouve à l'interface entre la terre et la mer, probablement en bord d'une lagune bordée de conifères.* »

L'enthousiasme suscité par la découverte a renforcé la passion du paléontologue pour cette région déjà très riche des Grands Causses, où il espère retrouver d'autres indices du passage des sauropodes. « *En plus de continuer à explorer les surfaces et les affleurements où l'on trouve classiquement les empreintes, on va désormais lever les yeux et s'intéresser de plus près aux plafonds des nombreuses cavités naturelles* », indique le chercheur, qui a déjà commencé à sensibiliser les spéléologues de la région. II

À voir



SUBLIMES PORTULANS

Les cartes marines anciennes, ou portulans, sont rarement exposées au public. Souvent richement décorées, mêlant précision des observations et représentations imaginaires, elles témoignent de la découverte de nouvelles terres par les Européens. Catherine Hoffmann de la Bibliothèque nationale de France et la médiéviste Emmanuelle Vagnon du CNRS décryptent 14 de ces cartes dans de courtes vidéos.

« *Au cœur des cartes* », une série de vidéos produite par l'unité CNRS « Cultures, langues, textes », en coproduction avec la BNF et CNRS Images. À voir sur la chaîne Youtube du CNRS

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

À lire



NEUROLOGIE

Là, un homme qui ne parvient plus à lire la moindre lettre mais sait encore écrire. Ici une femme qui voit des chevaliers en plein Paris... À travers l'histoire de personnes

rencontrées au cours de son parcours de neurologue, Laurent Cohen nous ouvre autant de portes « *sur les coulisses de notre vie mentale* ». Une lecture intrigante et instructive.

Le Parfum du rouge et la couleur du Z. Le cerveau en 20 histoires vraies, Laurent Cohen, Odile Jacob, février 2020, 238 p., 22,90 €.



HISTOIRE

Les cinq millions de soldats français mobilisés entre 1939 et la défaite de juin 1940 ont longtemps été les laissés pour compte de l'histoire officielle.

L'historien Rémi Dalisson livre une analyse nécessaire sur ce déniement qui a frappé les héros de la ligne Maginot, ignorés et souvent moqués, malgré leur rôle dans la reconstruction. *Les Soldats de 1940, une génération sacrifiée*, Rémi Dalisson, CNRS Éditions, mai 2020, 280 p., 24 €.



ASTRONOMIE

500 ans après Galilée, l'astrophysicien Arnaud Cassan nous invite à mettre à jour nos

connaissances sur l'Univers à travers ce livre mêlant pédagogie historique et actualité scientifique. De quoi renouveler les discussions sous les cieux étoilés de l'été...

Galilée à la plage. L'astronomie dans un transat, Arnaud Cassan, Dunod, avril 2020, 238 p., 15,90 €.



ETHNOGRAPHIE

L'œuvre et le parcours de l'ethnologue-cinéaste Jean Rouch, entré au CNRS à la fin des années 1940, continue de

passionner. Cette monographie, version française et augmentée de l'originale parue en anglais en 2009, remet en lumière l'héritage d'une figure de proue du cinéma français.

L'Aventure du réel. Jean Rouch et la pratique du cinéma ethnographique, Paul Henley, trad. Joëlle Hauzeur, préface Antoine de Baecque, Presses universitaires de Rennes, juin 2020, 520 p., 30 €.

«La justice déçoit d'autant plus qu'elle a été idéalisée»

SOCIÉTÉS



Sociologie. Quelle vision les Français ont-ils de la justice ? Quelles sont leurs critiques et attentes ? Quelles inégalités dénoncent-ils ? Analyse avec Cécile Vigour, spécialiste de l'analyse des politiques publiques et de la sociologie de la justice et du droit.

PROPOS RECUEILLIS PAR FABIEN TRÉCOURT

Vous avez publié il y a quelques mois les résultats de deux projets de recherche¹ sur la façon dont les citoyens perçoivent les institutions judiciaires. Quels sont-ils ?

Cécile Vigour² : C'est contrasté. Nos concitoyens en ont une représentation très idéalisée, ils sont attachés à l'idée de justice, comptent sur cette institution et la considèrent comme un pilier du vivre-ensemble. Mais l'expérience qu'ils en ont est souvent décevante. L'institution apparaît comme difficile à comprendre et réservée aux personnes qui ont de l'argent... Ils pensent spontanément qu'il vaut mieux maîtriser certains codes, être doté d'un capital financier, culturel ou social, pour obtenir gain de cause. Même sans avoir lu Bourdieu, beaucoup reprennent ainsi à leur compte une critique très politique et sociale de la justice : elle serait un instrument de pouvoir au service des dominants, participant notamment à un système de reproduction des inégalités.

Qui avez-vous interrogé ?

C. V. : Du point de vue quantitatif, nous avons diffusé un questionnaire³ auprès d'un panel aléatoire de 2 600 personnes. Nous avions auparavant animé 17 entretiens collectifs entre

2015 et 2017 avec des citoyens de tous horizons, dans une approche qualitative. Selon les méthodologies usuelles, nous avons constitué des groupes de catégories socioprofessionnelles homogènes, pour encourager l'expression libre et limiter l'autocensure... Nous avons veillé à la diversité des participants aux entretiens collectifs en termes d'orientation politique, de sexe, selon qu'ils ont eu ou non personnellement affaire à la justice, etc. On ne peut pas parler d'une représentativité stricte, mais nos échantillons sont suffisamment larges et diversifiés pour se faire une idée globale – mais instantanée – de l'opinion de la population française.

En quoi leur vision est-elle moins éloignée qu'on aurait pu l'imaginer de celle des spécialistes ?

C. V. : L'un des groupes était constitué presque exclusivement de praticiens (notaires, juristes, etc.). Nous pensions obtenir des réponses très différentes par rapport aux autres participants (eux aussi regroupés au maximum selon leur degré de familiarité avec la justice). Mais les points de convergence ont été plus nombreux. Au final, beaucoup dénoncent un décalage entre un idéal de justice et son fonctionnement au quotidien, ainsi que

des inégalités de traitement. Parmi les critiques assez consensuelles, on retrouve l'idée d'une justice trop lente – lorsque des procédures durent des années... –, mais aussi parfois trop rapide, dans le cas des comparutions immédiates par exemple. De manière générale, passer par la justice est souvent vécu comme une épreuve morale et psychologique, éventuellement violente. La rigidité de la procédure, ne laissant pas assez de place à l'humain aux dires des enquêtés, peut être difficile à supporter.

Comment les peines sont-elles perçues ?

C. V. : Là encore les opinions furent très contrastées. Ainsi, un discours général de principe (« les magistrats ne sont pas assez sévères, en plus les peines ne sont pas toujours exécutées », etc.) se retrouvait moins quand les citoyens devaient juger eux-mêmes une affaire. Nous l'avons observé en les faisant débattre sur le film documentaire d'un procès. Et aussi en leur proposant sur des cas fictifs d'évaluer la peine prononcée par le juge et de fixer eux-mêmes celle-ci. Nous avons été frappés de voir à quel point les sanctions les plus légères (travaux d'intérêt général, stages...) étaient plébiscitées. Surtout, une écrasante majorité tient à une dimension pédagogique. Pour eux, le condamné doit prendre conscience de la gravité des faits et se remettre en question, sans quoi la justice n'aurait pas atteint son but. Ils ne veulent pas tant punir – sauf lorsque l'intégrité physique ou psychologique de la victime a été atteinte... –, que transformer la personne.

1. Cette recherche inclut également Bartolomeo Cappellina, Laurence Dumoulin, Jacques Faget, Virginie Gautron et Pierre Vendassi. Ces projets feront l'objet d'un rapport pour la Mission de recherche Droit et Justice. L. Dumoulin et C. Vigour, « "On a soif d'idéal !" Des critiques à la hauteur des attentes des citoyens. Un éclairage à partir d'entretiens collectifs », in S. Amrani-Mekki (dir.), *Et si on parlait du justiciable du XXI^e siècle ?*, Dalloz, 2019, p. 29-81. V. Gautron et C. Vigour, « Les représentations sociales des peines en France. Une approche par entretiens collectifs », in D. Bernard



▼ Audience publique, octobre 2004.

©LUDOVIC/REA

À leurs yeux, la justice ne doit pas être l'instrument d'une vengeance...

C. V. : C'est frappant oui. Dans l'un des documentaires, un jeune homme exclu d'un club revient avec un fusil, tire un coup de feu en l'air... et écope de deux ans de prison dont un an de sursis. La majorité des personnes interrogées juge cette peine trop sévère. Il y avait bien sûr des débats sur le choc psychologique potentiel pour les clients, sur l'importance de réaffirmer des valeurs fortes – on ne revient pas avec un fusil, il y a d'autres façons de protester... Mais globalement, les Français privilégient la pédagogie. Très surprenant aussi : ils tiennent compte – avec certes moins de précision – des mêmes critères d'atténuation des peines que les magistrats, par exemple, si la personne est la seule pourvoyeuse de revenus de la famille, si ses proches (eux innocents) vont souffrir de sa condamnation, etc. Et si un petit délinquant risque de se retrouver en prison avec de grands délinquants, les Français plaident massivement contre son incarcération.

Des jugements différents ont-ils été préconisés selon le profil économique et social de l'accusé ?

C. V. : La question de l'impunité des élites revient souvent. Beaucoup de Français ont le sentiment que la délinquance en col blanc est au-dessus des lois ou du moins peu sanctionnée. À l'inverse, les plus modestes seraient systématiquement condamnés, comme en témoignerait, selon notre panel, la répression de la délinquance routière. En revanche, on retrouve un discours assez homogène sur des crimes jugés plus graves, touchant à l'intégrité physique ou psychologique : les meurtres, les viols, etc. Mais là encore, le discours général consistant à plaider pour plus de sévérité s'étirole lorsqu'on les met en position de juger eux-mêmes les affaires, beaucoup donnant même des peines moins lourdes que les juges. De manière générale, on observe une tension entre un idéal universaliste, traitant toute personne de la même façon, et l'envie de tenir compte des circonstances ou du contexte.

Qu'attendent-ils vraiment de la justice ?

C. V. : Pour beaucoup, la première qualité d'un avocat ou d'un magistrat est d'être attentif aux situations particulières, de prendre le temps de comprendre et de se mettre à la place des personnes jugées. Le cauchemar pour eux serait une justice entièrement automatisée où l'on se contenterait d'appliquer des barèmes de peine à l'aveugle. La plupart ne croient pas qu'« une machine ou un robot », sans émotion, puisse prendre des décisions plus impartiales et donc plus justes. Beaucoup font le parallèle avec les métiers de l'éducation ou de la santé dont les personnels ne peuvent pas se contenter de soigner sans un mot ni un regard. Le fait que les professionnels du droit ne le fassent pas, par manque de temps, de disponibilité ou parfois d'envie, est une source majeure de déception. On retombe toujours sur ce contraste : la justice déçoit d'autant plus que, avant que l'on y soit confronté, elle a été idéalisée. ▮

et K. Ladd (dir.), *Les Sens de la peine*, Presses de l'Université Saint-Louis, 2019, p. 61-101. 2. Chargée de recherche au Centre Émile Durkheim (CNRS/Université de Bordeaux/Sciences Po Bordeaux). 3. Grâce au soutien technique de l'équipement d'excellence Données, infrastructures et méthodes d'enquêtes en sciences humaines et sociales (Dime-SHS, Sciences Po Paris).





de Denis Guthleben,
historien au CNRS

Let IT be



Travaillent au CNRS des chercheurs et des ingénieurs, techniciens et administratifs regroupés sous l'appellation d'ITA. » On peine à imaginer phrase plus banale que celle-ci ! Extraite du rapport d'activité de notre bel établissement pour l'année 1970, elle pose néanmoins un jalon dans son histoire : il y a cinquante ans, l'appellation « ITA » faisait son apparition au CNRS...

Travailleurs scientifiques

La réalité préexistait évidemment à la désignation : des ingénieurs, des techniciens et des personnels administratifs, il y en avait bien avant 1970 au CNRS ! C'était même l'une de ses caractéristiques saillantes, soulignée par tous les observateurs dès 1939 : en même temps qu'il consacrait la nouvelle profession de « chercheur », le CNRS proposait une large palette de métiers, du verrier au juriste, du mécanicien à l'animalier, du gestionnaire au jardinier. Nos ancêtres désignaient comme les « auxiliaires de la recherche » celles et ceux qui, selon Jean Perrin, créaient autour des chercheurs un « *environnement propice au progrès des connaissances en tout domaine* ».

Dès l'origine, l'ambition a été de bâtir une communauté unie : aux yeux de Frédéric Joliot-Curie, qui a pris les commandes du CNRS lors de la libération de Paris en août 1944, chercheurs et auxiliaires formaient la collectivité des « travailleurs scientifiques ». Alors que la guerre faisait rage, le Prix Nobel de chimie ne s'encomrait d'ailleurs pas de précautions pour proclamer leur importance pour le pays : « *Si une bombe tombait [au CNRS], ce serait plus grave que si elle tombait sur un gouvernement. On retrouverait*

immédiatement des membres pour ce gouvernement, mais on ne retrouverait pas immédiatement les hommes capables de créer et de travailler ! » Sans nul doute, le grand scientifique aurait été fier de voir ses travailleuses et ses travailleurs mobilisés lors des autres épreuves que notre pays a connues, jusqu'à celle que nous traversons aujourd'hui...

Chercheurs et « ITA » n'ont pas seulement mis leurs efforts en commun au bénéfice de la science et, partant, de la société dans son ensemble, ils ont aussi lutté de concert pour la reconnaissance de leurs métiers. Les statuts actuels sont le fruit d'une construction patiente, du premier « statut des personnels contractuels techniques et administratifs du CNRS », signé par Antoine Pinay en 1952, à la « fonctionnarisation » collective des années 1980, accordée pour garantir tout à la fois l'indépendance des personnels et la pérennité de leurs emplois pour des recherches au long cours...

Les sentiers de la reconnaissance

Il en va de même pour les traitements. Dès l'aube des années 1950, le CNRS déplorait le déséquilibre criant entre ses salaires et ceux qui prévalaient dans l'industrie. Certaines archives sont éloquentes, à l'image des lettres adressées à la direction du CNRS par le géologue Nicolas Menchikoff, fondateur du Centre de recherches sahariennes : il ne se risquait plus à envoyer ses ingénieurs et techniciens sur le terrain, de peur de les voir aussitôt débauchés par les entreprises pétrolières. Pour tenter de remédier à cette situation, le CNRS a établi dès 1955 une « prime de participation à la production scientifique » promise à un bel avenir.

À défaut d'offrir la fortune – cela se saurait, depuis le temps ! –, le CNRS dispose à l'évidence d'autres solides attraits. Pour preuve, en 1970, pas moins de 10 000 « ITA » travaillaient dans ses laboratoires et ses services. Depuis cinquante ans, leurs métiers ont connu des évolutions phénoménales que l'on ne pourra pas passer en revue ici – mais songeons, entre autres, aux mutations apportées par l'apparition et l'essor de l'informatique. En 1992, elles ont débouché sur la création, certes tardive, d'une récompense symbolique : le cristal du CNRS, sur le modèle des médailles décernées aux chercheurs depuis 1954.

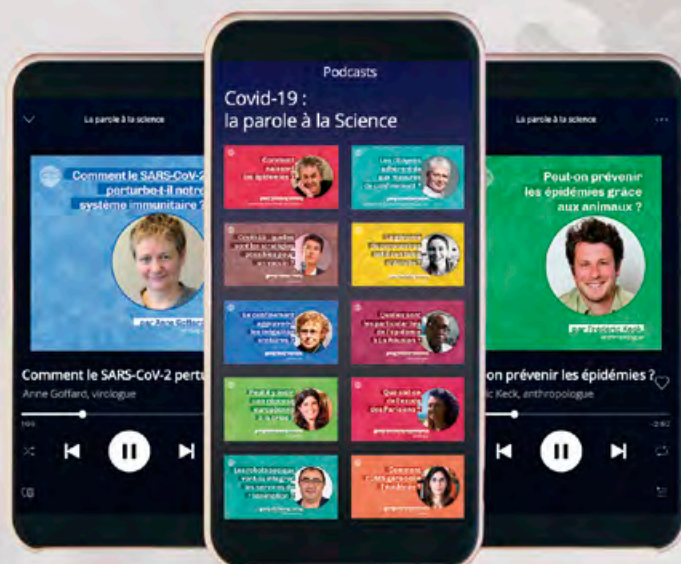
Ces évolutions se poursuivent, voire s'accroissent dans tous les domaines, y compris celui de l'administration de la recherche. Nos collègues qui s'y dévouent ne mobilisent pas moins d'ingéniosité et de technique que tous les autres. Tel un pléonasmisme, le « A » méritait donc de disparaître, pour qu'« IT » et chercheurs continuent de former ensemble la grande famille des travailleurs scientifiques... II

“En 1992, le cristal du CNRS est créé pour récompenser les ITA, sur le modèle des médailles décernées aux chercheurs depuis 1954.”

Covid 19 | La parole à la science

une série de podcasts du CNRS

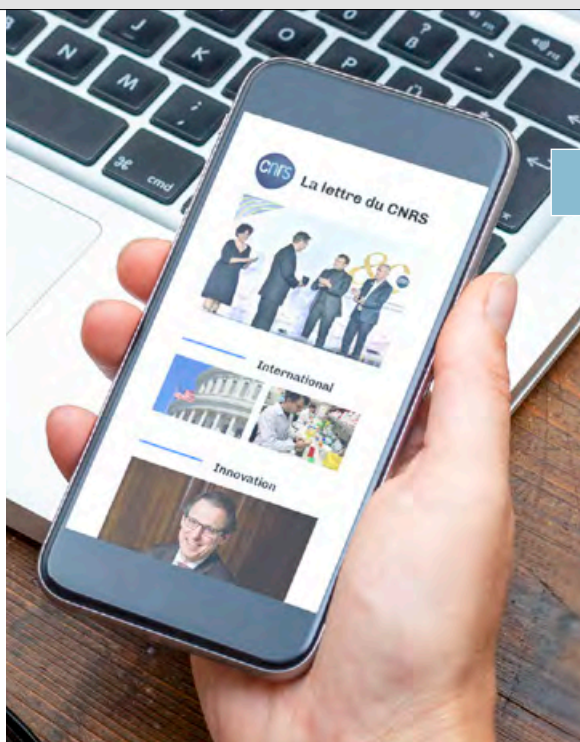
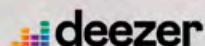
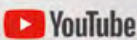
#PodcastCNRS



Écoutez sur **cnsrsljournal.fr**
l'analyse de cette crise
par des scientifiques
de toutes les disciplines



également disponible sur



NOUVEAU !

**POUR TOUT CONNAÎTRE DE
L'ACTUALITÉ DU CNRS EN FRANCE
ET À L'INTERNATIONAL : RECHERCHE,
INNOVATION, PRIX, NOMINATIONS**

ABONNEZ-VOUS À LA LETTRE DU CNRS
www.cnrs.fr/fr/les-newsletters-du-cnrs



CHAQUE MOIS SUR VOS ÉCRANS

UNE FONDATION POUR UNE RECHERCHE AMBITIEUSE ET LIBRE

En 2019, le CNRS a créé la Fondation CNRS pour accompagner et développer une recherche libre, de long terme et au meilleur niveau. Le mécénat, les dons et legs sont autant de leviers pour contribuer à l'avancée des connaissances, aux grands défis sociétaux et aux innovations de demain.

Pour soutenir la recherche :
fondation-cnrs.org

