

Trimestriel n° 316
JUN 2024

CNRS

LE JOURNAL



Des pistes pour
mettre **les acouphènes**
en sourdine

DOSSIER
80^e anniversaire de
la **Libération**

CLAIRE DE MARCH
Une chimiste qui a
du nez

JO 2024
Dans les coulisses
des records



La banque coopérative
de la Fonction publique

CASDEN Banque Populaire - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable - Siège social : 1 bis rue Jean Wigner, 77420 Champs-sur-Marne - Siren n° 784 275 778 - RCS Meaux - Immatriculation ORIAS n° 07 138 - B.P.C.E. - Société anonyme à directeur et conseil de surveillance au capital de 188 922 730 euros - Siège social : 7, promenade Germaine Sablon 75 013 Paris - RCS Paris n° 493 455 042 - Immatriculation ORIAS n° 08 045 100 - Credit photo : © Roman Jellamio - Conception : Insign'2021 - Merci à Jenny, enseignante chercheuse d'avoir prêté son visage à notre campagne de communication.

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

Jenny, Enseignante chercheuse



casden.fr



Retrouvez-nous chez



Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

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

Antoine Petit

Directeur de la rédaction :

Jérôme Guilbert

Rédacteur en chef :

Saman Musacchio

Rédacteurs en chef adjoints :

Laure Cailloce, Yaroslav Pigenet

Rédacteurs :

Sophie Félix, Mehdi Harmi, Marina Julienne,

Maxime Lerolle, Laurence Stenvot

Ont participé à ce numéro :

Kheira Bettayeb, Laure Dasinieres, Grégory Fléchet,

Denis Guthleben, Charlotte Mauger, Warda

Mohamed, Emmanuelle Picaud, Hugo Ruher,

Matthieu Stricot, Fabien Trécourt

Secrétaire de rédaction :

Émilie Silvoz

Direction artistique :

David Faure

Iconographes :

Anne-Emmanuelle Héry, Sophie Léonard

et Valérie Delchambre

Gestionnaire :

Mathieu Chatellier

Assistant de direction :

Frédéric Roman

Illustrations :

Marion Jdanoff

Impression :

Groupe Morault, Imprimerie de Compiègne

2, avenue Berthelot – Zac de Mercières

BP 60524 – 60205 Compiègne Cedex

ISSN 2261-6446

Dépôt légal : à parution



Photos CNRS disponibles à :

contact-media@cnrs.fr

<https://images.cnrs.fr>

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

En couverture :

Claire de March, chimiste à l'ICSN

© Cyril FRESILLON/ ICSN/ CNRS Images

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

Abonnez-vous gratuitement sur :

» lejournal.cnrs.fr/abojournal

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



“ Les temps des Libérations sont aujourd’hui réinterrogés au regard des mutations sociales touchant la citoyenneté des hommes et des femmes. ”

En France, la Libération s’illustre par le débarquement du 6 juin en Normandie, dont est commémoré, cette année, le 80^e anniversaire. Elle est marquée par la mémoire des héros résistants, le plus souvent combattants. Sa dimension festive alimente l’imaginaire national d’un Peuple rassemblé. Ne faudrait-il pas, toutefois, davantage parler de libérations ? Le renouvellement des recherches (archéologie des conflits, histoire contemporaine, sciences politiques, *war studies*...) y invite. De fait, l’accent est mis sur la dimension plurielle des débarquements – novembre 1942 en Afrique du Nord, 15 août 1944 en Provence, libérations locales – tout comme sur la sortie des combats. L’on rejoint ici les réflexions plus globales sur les « sorties de guerre », marquées par l’enthousiasme et la concorde mais aussi par le retour des déportations, les inquiétudes et les pénuries, les divisions et les déceptions.

La période de la Libération renvoie surtout à une séquence plus large. Allant de 1944 à 1946, elle prend en écharpe la fin des combats de la Seconde Guerre mondiale, de l’Occupation et du régime de Vichy, la réinstallation d’un régime démocratique en France au moment où se cristallisent les enjeux coloniaux et ultra-marins, le début de la guerre froide et d’un nouvel ordre mondial. Au-delà des combattants en armes et des chefs de réseaux clandestins, comment faire l’histoire des oubliés et oubliées des Libérations (engagements liés aux soins, petits gestes de résistance au quotidien...) ? Et celle aussi des multiples formes de collaboration, des « zones grises » des comportements, des

prisonniers de guerre ? Des chercheurs et chercheuses font valoir la disparité des commémorations et des contextes politiques dans lesquels elles se déroulent. Comment appréhender des cultures mémorielles plurielles ? Comment, également, alimenter les connaissances en ayant recours à l’interdisciplinarité ?

Les temps des Libérations sont aujourd’hui réinterrogés au regard des mutations sociales touchant la citoyenneté des hommes et des femmes, leur vie, leur travail, leurs loisirs, les rapports et les normes de genre, les relations entre générations. La complexité des situations est mani-

festes : entre continuité et rétablissement d’ordres anciens, d’une part, avancées économiques, juridiques, sociales et politiques, de l’autre. Le dossier proposé ici porte les traces de ces réflexions.

Enfin, le moment de la Libération est abordé dans un jeu d’échelles, à la fois local, national et mondial, autour, notamment, des systèmes de propagande comme des stratégies internationales de fin de conflit et de construction de la paix. Nul doute que de telles approches font écho aux recherches conduites et à conduire sur les crises et les troubles géopolitiques les plus récents. Celles-ci devraient d’ailleurs pouvoir bénéficier de l’appel à manifestation d’intérêt, récemment lancé par le ministère de l’Enseignement supérieur et de la Recherche, dans le cadre de France 2030, sur des programmes de recherche en Sciences humaines et sociales, et dans lequel le CNRS tient toute sa place.



Pascale Goetschel,
Directrice-adjointe scientifique
à CNRS Sciences humaines & sociales



© JULIA PROTTE - COLLECTION LA CONTEMPORAINE - © DROITS RÉSERVÉS

GRAND FORMAT

11

80^e anniversaire de la Libération. Avec les oubliées de l'Histoire... 12
 Dans les coulisses des records 26
 L'archéologie devient galactique 32



© CIRIL FRESILLON / ICN / CNRS IMAGES

06

Claire de March, une chercheuse qui a du nez

EN PERSONNE

5

Claire de March, une chercheuse qui a du nez 6
 Trois questions à Elsa Cortijo 9
 Brèves 10



© GREGOIRE PICOUTY / IFR

Les Jeux paralympiques inspirent les recherches sur le handicap

40

EN ACTION

37

La recherche en chantiers 38
 Les Jeux paralympiques inspirent les recherches sur le handicap 40
 Mettre les acouphènes en sourdine 42
 Un pan de voile se lève sur le quotidien au Néolithique ... 46
 Mécanobiologie : la pression créatrice 48
 Entrez dans les matrices ! 51
 La reine fourmi n'est pas qu'une machine à pondre 54
 Le CNRS à VivaTech 2024 56



© NONG GUANBIN / ZHANGJIA / IFR

Pharmacognosie, de la nature à l'armoire à pharmacie

60

LES IDÉES

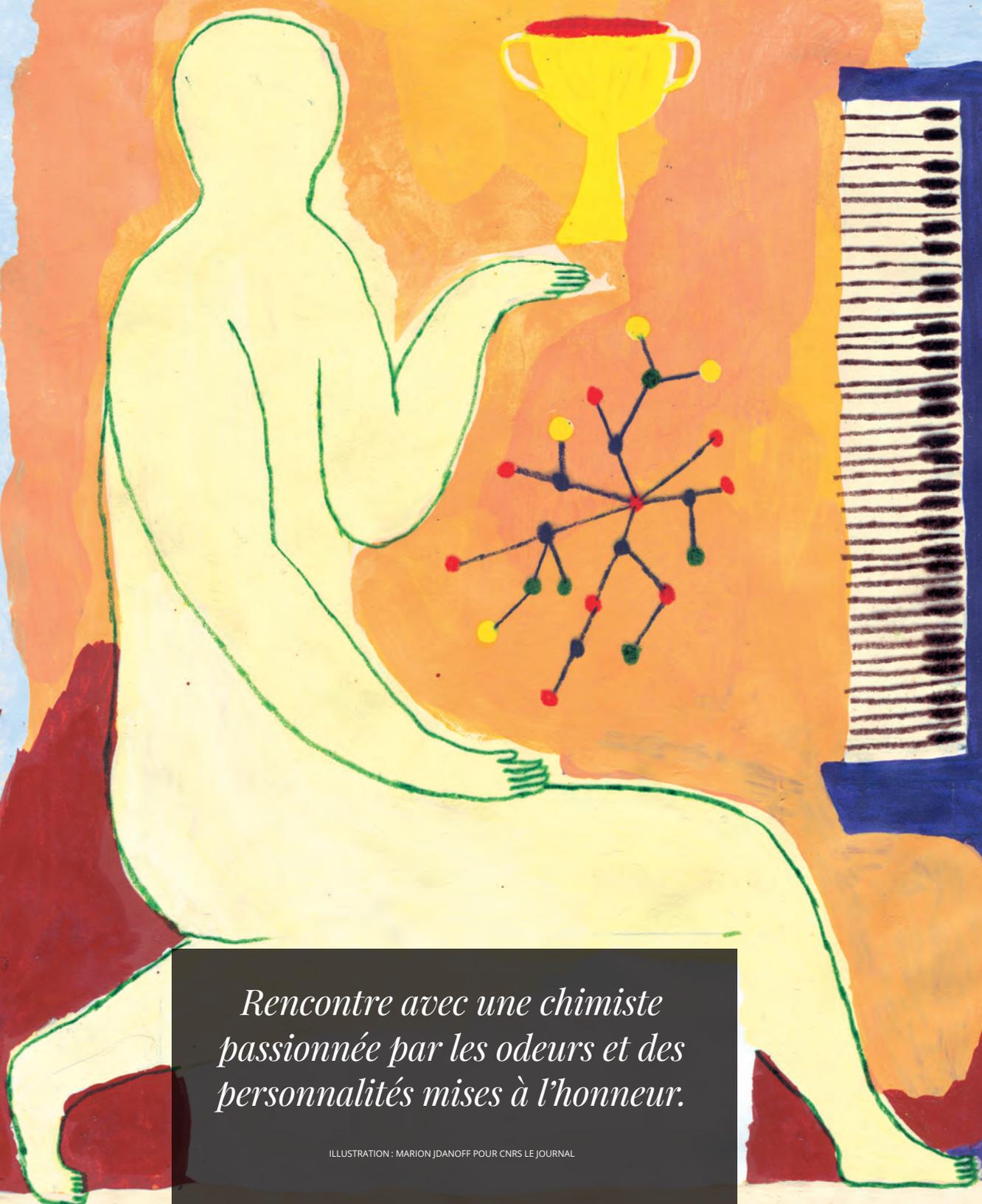
59

Pharmacognosie, de la nature à l'armoire à pharmacie 60
 Brèves À lire 62
 Une nouvelle monnaie pour détrôner le dollar ? 64

LA CHRONIQUE

Les médailles sous toutes les faces 66

EN PERSONNE



*Rencontre avec une chimiste
passionnée par les odeurs et des
personnalités mises à l'honneur.*

Claire de March, une chercheuse qui a du nez

VIVANT

MATIÈRE

PORTRAIT Lauréate du prix Irène Joliot-Curie 2023 dans la catégorie « Jeune femme scientifique », cette chimiste est parvenue à reproduire la toute première structure expérimentale d'un récepteur olfactif humain.

PAR EMMANUELLE PICAUD

Claire de March est une scientifique qui a de l'intuition. En novembre dernier, elle a reçu avec quatre autres lauréates le prix Irène Joliot-Curie de l'Académie des sciences en tant que « Jeune femme scientifique de l'année ». Quelques mois auparavant, avec une équipe internationale, elle était parvenue à obtenir la toute première structure expérimentale d'un récepteur olfactif humain. Les travaux des scientifiques s'appuyaient jusque-là sur des structures obtenues à partir de récepteurs de la vue. Une hypothèse certes utile, mais insuffisante pour capter la complexité des interactions entre notre système neuronal et les innombrables odeurs qui peuplent notre planète. « Avant cette découverte, nous ignorions tout de ces récepteurs. C'était un rêve de chercheuse de pouvoir la publier », se réjouit-elle.

Une récompense qui arrive à un moment charnière, trois ans seulement après l'épidémie mondiale de Covid-19 qui a mis en lumière les troubles du goût et de l'odorat, et alors que nous ne sommes toujours pas parvenus à résoudre certaines des questions les plus fondamentales sur les mécanismes de l'olfaction. Elle survient aussi après des années de travail acharné, même si Claire de March a du mal à identifier un moment particulier où serait née sa passion pour son sujet d'étude. « Rien ne me destinait à aimer les sciences et à embrasser cette carrière, se souvient-elle. J'ai eu une enfance très artistique, ma mère a fait les Beaux-Arts, mon père de l'électronique et ma grand-mère

était caissière. Je n'étais pas spécialement attirée par l'image du scientifique, pourtant la chimie m'a tout de suite parlé à l'école. Ce qui m'intéresse, c'est la complexité des mélanges et les combinaisons. »

Elle se souvient encore des moments, où, enfant, elle cuisinait avec sa grand-mère et où elle piochait dans les ingrédients pour composer des recettes. « Il y avait des odeurs de vanille et de gâteaux qui s'échappaient des fourneaux. Les odeurs ne sont pas des souvenirs que nous partageons souvent avec les autres. Pourtant, elles restent importantes. » La chercheuse est parfois encore transportée par les effluves de patchouli, qui lui rappellent le parfum que sa mère portait lorsqu'elle était enfant, ou par celles « qu'on peut percevoir une fois qu'une personne a quitté une pièce » en guise de signature olfactive.

Jouer avec les senteurs, effluves et saveurs

Ce goût prononcé pour les compositions la fait se diriger naturellement vers une carrière de chimiste dès le lycée. Claire de March s'oriente vers un bac technologique mais elle veut aller plus loin dans les études. Après un long chemin où elle a essayé de « réescalader la pyramide universitaire », elle passe le concours de l'école de parfumeur aromaticien de Versailles : « Je n'avais pas le diplôme requis pour postuler au concours. Il a fallu que je raccroche les wagons. Mais j'ai eu la chance de tomber sur des professeurs très bienveillants qui m'ont permis de rapidement progresser pour me mettre au niveau », reconnaît-elle.

Une fois le concours en poche, elle intègre un apprentissage chez l'industriel Bel, en section alimentaire. Intégrer cette filière était un choix assumé à un âge où les élèves planchent plutôt sur des cursus en parfumerie. « Je n'ai jamais voulu que mes mélanges sentent bon. Je leur préférerais la complexité des goûts et des saveurs », assure celle



► Claire de March à l'Institut de chimie des substances naturelles, à Gif-sur-Yvette, en mars 2024.

Hiroaki Matsunami, à l'université de Duke en Caroline du Nord, qui a réalisé les premiers tests *in vivo* de récepteurs olfactifs chez la souris. Une rencontre structurante dans sa carrière : une fois sa thèse obtenue, elle part aux États-Unis rejoindre l'équipe du biologiste. Elle restera sept ans Outre-Atlantique.

Après de ce mentor, Claire de March apprend à canaliser son énergie débordante mais aussi ses angoisses de jeune chercheuse. Elle prend progressivement de l'assurance. « J'ai appris que je ne pouvais pas tout savoir sans pour autant me remettre en question personnellement et qu'en tant que scientifique, j'avais aussi le droit à l'erreur ». Un apprentissage qui lui sera utile : « Lorsqu'elle est arrivée en décembre 2022, Claire intégrait une équipe ancienne et déjà constituée. Elle a très bien relevé ce pari », salue Carine Van Heijenoort, directrice adjointe de l'Institut de chimie des substances naturelles (ICSN) du CNRS, à Gif-sur-Yvette, qui la décrit comme « une collaboratrice bienveillante, directe et ouverte à la discussion ». « C'est quelqu'un d'inspirant dans la façon dont elle aborde les choses. Elle montre un tel enthousiasme que cela donne de l'élan », ajoute Boris Vauzeilles, le directeur de l'institut.

“ Ce qui m'intéresse, c'est la complexité des mélanges et les combinaisons. ”

qui prend pour exemple la truffe, que nous n'imaginerions pas porter comme un parfum mais dont nous chérissons pourtant la saveur.

Claire de March valide son master, puis poursuit son chemin avec une thèse en chimie computationnelle, à l'université de Nice. Elle espère alors recréer virtuellement un nez humain mais se heurte à un défi de taille : « Si nous savons que les êtres humains possèdent près de 400 récepteurs olfactifs dans leur nez, nous étions incapables de reproduire la structure d'un de ces récepteurs à l'échelle atomique. Je ne pouvais m'appuyer que sur des hypothèses pour mes travaux ». Elle se rapproche alors de biologistes et prend contact avec

Composer la symphonie des odeurs

C'est aussi cette détermination qui lui a permis de réaliser la découverte de la structure du tout premier récepteur olfactif humain. De façon similaire aux cellules photosensibles de nos yeux qui réagissent aux longueurs d'onde correspondant à des couleurs distinctes, un récepteur olfactif pourra en effet être sensible à un panel de propriétés chimiques et reconnaître plusieurs molécules odorantes ; mais les combinaisons sont bien plus nombreuses pour les odeurs que pour les longueurs d'onde. En effet, une molécule odorante peut à son tour activer plusieurs récepteurs, ce qui permet de distinguer une multitude d'odeurs, mais rend d'autant plus compliqué l'exercice de Claire de March. « C'est un peu comme un grand piano : une odeur est comme un accord musical. Cet accord peut être obtenu à l'aide de plusieurs récepteurs qui pourraient être les touches de l'instrument. Une touche peut à son tour être impliquée dans différents accords musicaux », décrit-elle.

Pour parvenir à composer cette partition, la chercheuse a observé comment le récepteur olfactif OR51E2 réagissait au contact de différents composés chimiques, puis elle a reproduit son comportement sur ordinateur, au niveau

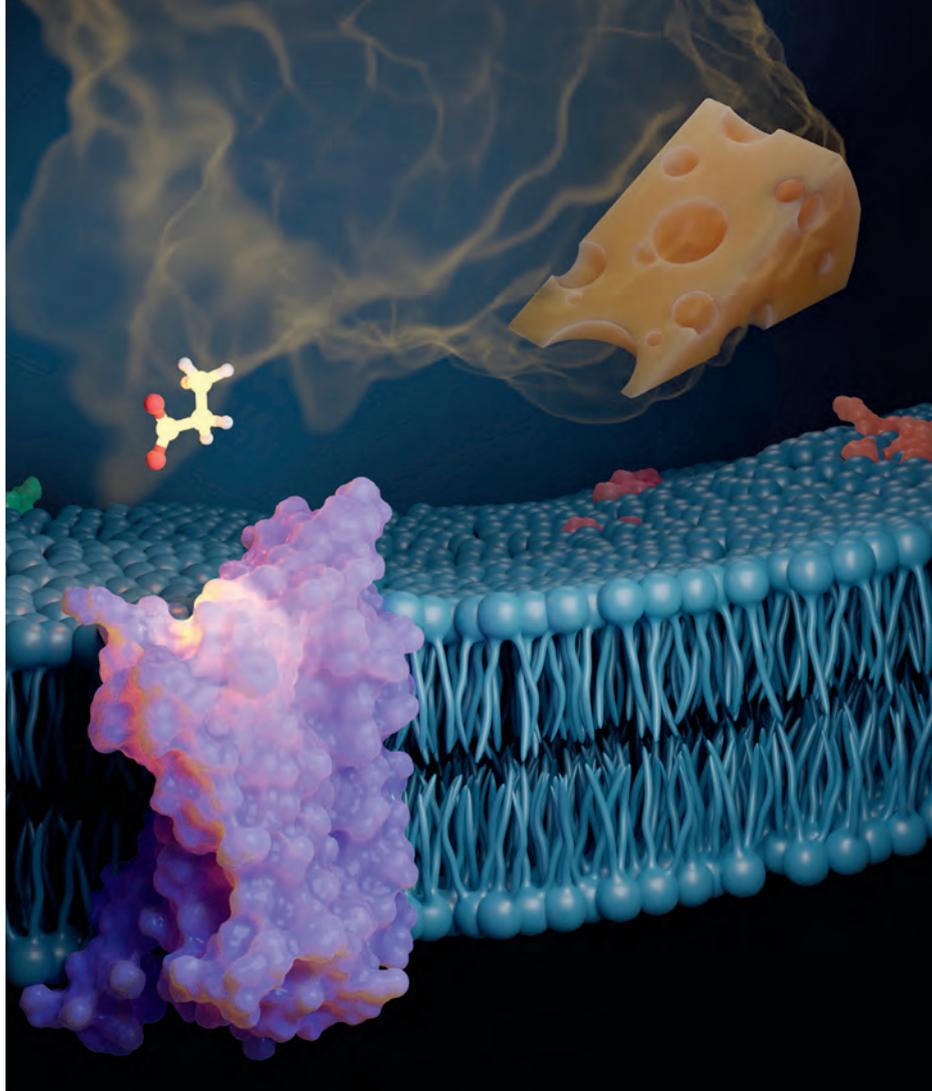
▲ Première structure d'un récepteur olfactif humain. La protéine réceptrice de l'odeur, OR51E2 (violet), qu'a identifiée la chercheuse, est activée par l'odeur de l'acide propionique (blanc et rouge), l'un des composés qui donnent au fromage son odeur particulière.

moléculaire. Ce procédé pourrait expliquer pourquoi certaines personnes trouvent une odeur agréable alors que d'autres y sont parfaitement indifférentes. Il ouvre également la voie à la création de nouvelles odeurs dans des domaines tels que la parfumerie et l'industrie alimentaire. De plus, certains récepteurs olfactifs sont également impliqués dans d'autres processus biologiques comme la libération de sérotonine dans l'intestin ou encore le cancer de la prostate. « Les récepteurs aux odorants deviennent de nouvelles cibles thérapeutiques potentielles, notamment dans les traitements anti-cancéreux. On ne se dit pas que l'on sauvera le monde en faisant de la recherche sur l'olfaction, mais cela pourrait finalement arriver ! », se prend à rêver la chercheuse.

Activer des récepteurs ancestraux

Une autre de ses prouesses scientifiques est d'être parvenue à recréer virtuellement un des récepteurs olfactifs de l'Homme de Denisova – espèce éteinte du genre *Homo* qui a vécu sur Terre il y a plus de 30 000 ans – à partir de son ADN. « J'aime beaucoup l'histoire et l'archéologie, alors cette recherche était inespérée. Quand j'ai vu sur ma machine ce récepteur s'activer, c'était un petit miracle. Je me rappelle m'être dit que ce récepteur n'avait pas été activé par une molécule odorante depuis des dizaines de milliers d'années ! », s'émerveille Claire de March. La chimiste a aussi réussi à recréer virtuellement les récepteurs ancestraux des tout premiers organismes capables de détecter les odeurs dans le but, encore une fois, de faciliter les recherches futures dans le domaine de l'olfaction.

“Les récepteurs aux odorants deviennent de nouvelles cibles thérapeutiques potentielles, notamment dans les traitements anti-cancéreux.”



© CLAIRE DE MARCH

Les travaux d'autres collègues l'ont récemment inspirée : ceux de Vanessa Ruta, une neuroscientifique américaine qui travaille sur les mécanismes de reconnaissance des odeurs chez l'insecte. « Des travaux impressionnants, auxquels je peux facilement m'identifier », explique-t-elle, ou encore ceux de Noam Sobel, de l'Institut des sciences de Weizmann en Israël, qui cherche à éclaircir les mécanismes cérébraux du système olfactif humain et leur rôle clé dans nos interactions sociales et nos émotions.

En plus d'être une scientifique accomplie, Claire de March milite aussi pour une meilleure intégration des femmes dans le monde de la recherche. À son arrivée, elle a rejoint la cellule égalité-parité-inclusion de l'ICSN. « Nous ne sommes qu'au début du changement et cela reste difficile encore aujourd'hui pour les femmes de poursuivre une carrière en sciences », regrette la chimiste. Elle déplore que les femmes scientifiques aient également peu de modèles sur lesquels s'appuyer. « Dans le milieu des recherches sur l'olfaction, heureusement, nous avons une lauréate du prix Nobel, Linda Buck !¹ », salue-t-elle. Les talents de Claire de March pourront peut-être, un jour, à leur tour inspirer une nouvelle génération de chercheuses. ||

1. Linda Brown Buck est une biologiste américaine, Prix Nobel de physiologie ou médecine en 2004 avec Richard Axel pour leurs travaux sur le système olfactif, et membre de la National Academy of Sciences (États-Unis).

3 questions à... Elsa Cortijo

En décembre dernier, le président Emmanuel Macron annonçait le lancement de sept agences de programmes dont l'une est confiée au CNRS : Climat, biodiversité et sociétés durables. Elsa Cortijo, sa nouvelle directrice exécutive, nous en explique les ambitions.

PROPOS RECUEILLIS PAR MAXIME LEROLLE

Quelles sont les missions des agences de programmes¹, et en particulier de celle que vous allez diriger ?

Elsa Cortijo². Les agences ont pour vocation de mieux coordonner les actions des acteurs scientifiques et d'optimiser l'écosystème de la recherche et de l'innovation pour le rendre plus à même de répondre aux grands enjeux de société. Elles auront donc pour but de structurer et animer des communautés, prospecter autour de grands enjeux sociaux, analyser des équipements et infrastructures indispensables à la communauté scientifique, cartographier la présence française dans les programmes européens et, enfin, coordonner des programmes nationaux dont les programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR).

De plus, chaque agence pilotera des programmes de recherche stratégiques, relevant souvent d'un intérêt souverain. Elle seront également à même de répondre aux sollicitations de l'État. J'envisage en outre une



© CYRIL FRÉLILLON / CNRS IMAGES

“Je souhaite positionner l'agence Climat, biodiversité et sociétés durables comme un lieu où faire dialoguer société civile et recherches.”

autre mission pour l'agence Climat, biodiversité et sociétés durables : entendre, à travers celle-ci, les enjeux des acteurs de la société civile et en inspirer des projets de recherche susceptibles d'intéresser plusieurs partenaires. Je souhaite ainsi positionner l'agence comme un lieu où faire dialoguer société civile et recherche.

Quelles seront vos premières actions ?

E. C. D'ici la fin de l'année, nous allons construire la gouvernance de l'agence selon trois niveaux. En premier lieu, un comité de liaison avec l'État va mandater les programmes et actions nécessaires. En second lieu, un comité avec l'ensemble des partenaires de l'agence définira la stratégie et les orientations programmatiques. Enfin, un comité opérationnel, composé de représentants des partenaires concernés, assurera son bon fonctionnement. Cette dimension collégiale permettra, à mon sens, de répondre à la fois aux commandes de l'État et aux questions et propositions des partenaires. Enfin, sous six mois, l'agence devra définir et proposer à l'État d'une à trois thématiques de recherche sur des questions scientifiques prioritaires.

Qui sont ces partenaires ? Quelle place tiendra l'agence au sein du paysage scientifique français ?

E. C. Des partenaires, il y en a déjà trente et un, et d'autres vont peut-être nous rejoindre ! Nous avons sollicité l'ensemble des membres de l'ancienne Alliance pour l'environnement, qui regroupe les principaux organismes nationaux de recherche et établissements d'enseignement supérieur et de recherche. Parmi eux, l'Ifremer est évidemment très présent comme acteur majeur dans les problématiques de changement climatique et de biodiversité marine. Nous y avons ensuite ajouté d'autres organismes ou agences de recherche, des représentants industriels, les collectivités territoriales et des associations citoyennes.

Cette organisation collégiale permet de fédérer nos partenaires et de construire l'agence ensemble, de manière à saisir des sujets qui ne sont pas les missions habituelles des organismes et transcender ainsi leurs frontières. Ensemble, nous pourrions accomplir ce qui ne peut pas être fait seul ou en bilatéral. **||**

1. Énergie décarbonée (CEA) ; Du composant aux systèmes et infrastructures numériques (CEA) ; Spatial (Cnes) ; Alimentation, agriculture, forêts et ressources naturelles associées (Inrae) ; Numérique, logiciels et algorithmes (Inria) ; Santé (Inserm). 2. Directrice de recherche CNRS au sein du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CNRS/CEA/UVSQ).



Michel Talagrand, Prix Abel 2024

Le 21 mai, l'Académie norvégienne des sciences et des lettres a remis le prix Abel 2024 au mathématicien français Michel Talagrand, ancien directeur de recherche CNRS au sein de l'Institut de mathématiques de Jussieu - Paris Rive Gauche (CNRS/Sorbonne Université/ Université Paris Cité). L'équivalent du prix Nobel de mathématique lui a été décerné « pour ses contributions révolutionnaires à la théorie des probabilités et à l'analyse fonctionnelle, avec des applications remarquables en physique mathématique et en statistique ».



Olga Paris-Romaskevich, Prix spécial de l'engagement

Chercheuse à l'Institut de mathématiques de Marseille (CNRS/Aix Marseille Université), Olga Paris-Romaskevich est lauréate du Prix spécial de l'engagement - Irène Joliot-Curie 2023, qui récompense une scientifique particulièrement investie dans la sensibilisation et l'orientation des filles et des jeunes vers les sciences. Spécialiste des mathématiques fondamentales, elle a participé à l'organisation des « Cigales », des stages destinés exclusivement aux lycéennes. Elle est également co-auteur de l'ouvrage *Matheuses : les filles, ouvrir des mathématiques* (CNRS Éditions, 2024).



Jean-Stéphane Dhersin nommé à Bruxelles

Ancien directeur-adjoint scientifique de CNRS Mathématiques, en charge de l'Europe et des relations internationales, Jean-Stéphane Dhersin prend la tête du Bureau de représentation du CNRS à Bruxelles. Professeur à l'université Sorbonne Paris-Nord (USPN), spécialiste en théorie des probabilités, il a été entre autres président du département de mathématiques de l'USPN, directeur du Laboratoire international associé Formath Vietnam, et responsable de la plateforme MODCOV19 de coordination des actions de modélisation autour de la pandémie, qu'il a initiée en 2020. Il est également chevalier de l'ordre national du mérite.



Éric Collet élu à l'Academia Europaea

Médaille d'argent du CNRS 2020, enseignant-chercheur à l'Institut de physique de Rennes (CNRS/ Université de Rennes) et directeur-adjoint du laboratoire international associé France-Japon Dynacom, Éric Collet est élu membre de l'Academia Europaea, qui a pour objectif de promouvoir l'éducation et la recherche partout dans le monde. Cette distinction est décernée aux scientifiques ayant fait preuve d'une excellence académique soutenue.

Geneviève Almouzni Prix international L'Oréal-Unesco pour les Femmes et la Science



Directrice de recherche au Laboratoire Dynamique du noyau (CNRS/Institut Curie/Sorbonne Université), Geneviève Almouzni est l'une des cinq lauréates 2024 du prix international L'Oréal-Unesco pour les Femmes et la Science. Ce prix lui est décerné pour son travail pionnier en épigénétique, qui a largement fait progresser notre

compréhension de l'identité cellulaire au cours du développement normal ou perturbée par le cancer. Elle est également récompensée pour son rôle unique dans la structuration de la recherche en épigénétique, dans la formation des futurs scientifiques et dans la promotion des femmes en science.

Human Frontier Science Program : Trois lauréats CNRS

Le Human Frontier Science Program, programme international de financement de la recherche exploratoire dans le domaine des sciences de la vie, a récompensé Chiara Sinigaglia, chercheuse au laboratoire de Biologie intégrative des organismes marins (CNRS/Sorbonne Université), Raphaël Gaudin, directeur de recherche à l'Institut de recherche en infectiologie de Montpellier (CNRS/Université de Montpellier) et Éric Marechal, directeur de recherche au Laboratoire de physiologie cellulaire et végétale (CEA/CNRS/ Inrae/Université Grenoble-Alpes).

GRAND FORMAT



*Les scientifiques mettent
en lumière des héroïnes
méconnues de l'Histoire et
sondent le passé de notre galaxie.*



Avec les oubliées de l'Histoire

© JULIA PIROTTE, « COLLECTION LA CONTEMPORAINE » © DROITS RÉSERVÉS

SOCIÉTÉS

80^e anniversaire de la Libération



Marseille, 29 août 1944.
Manifestation de la liberté, après
la libération de la ville.

La France commémore cette année et jusqu'en 2025 le 80^e anniversaire de la Libération. Pour célébrer cette période, notre mémoire collective met généralement en avant des hommes en uniforme débarquant sur les plages de Normandie, des chars Leclerc entrant dans Paris, des résistants la fleur au fusil. Pas question de nier le rôle capital de ces épisodes et de ces personnages. Mais rien dans le cliché que nous avons choisi pour ouvrir ce dossier ne cadre avec cette image d'Épinal. Au premier plan de cette photo, prise le 29 août 1944 à Marseille, des femmes brandissent une banderole des Forces françaises de l'intérieur. Derrière l'objectif, Julia Pirotte, Juive, polonaise, communiste et résistante, incarne à elle seule ce brassage d'individus embarqués dans un même tourbillon de l'Histoire.

Nous avons souhaité dans ces pages éclairer des zones généralement laissées dans l'ombre, et donner toute leur place aux femmes qui, dans la guerre comme à la Libération, qu'elles aient été résistantes, intégrées dans l'armée ou même collaboratrices, ont comme les hommes payé cher leur engagement au combat. L'événement que fut la panthéonisation cette année de Missak Manouchian et de son épouse Mélinée, étrangers et résistants, nous rappelle à quel point il faut parfois du temps pour réconcilier les mémoires et redonner leur place aux oubliés de l'Histoire.

Nous démarrons avec un entretien sur le rôle joué par les femmes et par les étrangers dans la résistance ; puis nous commentons la libération de Marseille, épisode essentiel mais généralement effacé derrière la libération de Paris, en l'illustrant avec les images de la photo-reporter Julia Pirotte, qui prit part aux combats. Enfin, des chercheurs nous rappellent que certaines femmes participèrent aussi à la collaboration. Lors de l'épuration, une société masculine reprend les commandes ; mais dans un même élan, forcée de reconnaître aux femmes leur rôle dans la guerre, elle finit par leur concéder le droit de vote.

DOSSIER RÉALISÉ PAR MARINA JULIENNE

Résistantes et étrangères: les invisibles



© G. COSSA/LE PARISIEN/PHOTODISC/MAPIPI

L'historien Denis Peschanski revient sur le rôle longtemps méconnu mais ô combien important des femmes, notamment étrangères, dans la Résistance.



On parle peu des femmes dans la Résistance, pourquoi sont-elles à ce point rendues invisibles ?

Denis Peschanski ¹. Pour trois raisons au moins. D'abord et avant tout à cause de leur statut dans la société. À l'époque plus encore qu'aujourd'hui bien entendu. Ensuite, dans le cas de la lutte armée, elles se servent rarement des armes à feu et, comme elles passent inaperçues, elles transportent les armes sur les lieux des attentats, cachées dans un cabas ou une poussette. Mais ce sont les hommes qui tirent. Enfin, avant la guerre, elles n'ont toujours pas le droit de vote ; elles s'impliquent donc moins que les hommes dans la vie politique, sont peu présentes dans les partis. L'engagement reste une affaire d'hommes.

À partir de quand commence-t-on à parler de leur rôle dans la Résistance ?

D. P. Il n'y a pas un moment particulier où une histoire émerge, mais je dirais que plusieurs mémoires collectives



À lire :

Missak Manouchian. Une vie héroïque, Didier Daenincks, Mako, Dominique Osuch, Les Arènes, janvier 2024, 120 p. (Bande dessinée. Cet album est complété par un dossier réalisé par Denis Peschanski sur le rôle décisif des étrangers dans la Résistance.)

« fortes » et « faibles » coexistent. Dans le cas de ce conflit, on a vu apparaître alternativement la figure du Résistant, celle du Français veule ou collabo, celle de la victime juive ou encore le régime de Vichy, sans que jamais l'une ou l'autre de ces figures ne soit totalement effacée. Pour ce qui est des femmes, il a fallu attendre que la communauté scientifique se penche sur la résistance dite « de sauvetage », en dehors des luttes armées, pour que l'importance de leur rôle soit pleinement prise en compte. Elles intervenaient par exemple dans les camps pour mener clandestinement des actions illégales visant à sauver des enfants.

L'historienne Claire Andrieu, dans *Tombés du ciel* (Tallandier, 2021), a montré aussi l'importance d'actions de sauvetage auprès d'aviateurs alliés qui

avaient pu survivre au crash de leur avion, mais devaient être conduits jusqu'à la frontière espagnole pour rejoindre ensuite l'Angleterre. Elle estime à quelque 34 000 *helpers* (aidants), dont un tiers de femmes, le nombre de ces combattants. Mais leur rôle a été oublié, la mémoire mettant toujours en haut de la hiérarchie la lutte armée.

Le rôle des FTP-MOI (francs-tireurs et partisans - main-d'œuvre immigrée) a également été tardivement célébré ?

D. P. Missak Manouchian était déjà entré dans la mémoire collective. Mais il est le premier résistant étranger et le premier résistant communiste à entrer au Panthéon, accompagné de sa femme Mélinée. Chef des FTP-MOI parisiens, il a été fusillé avec vingt-et-

1. Directeur de recherche émérite au CNRS, au Centre européen de sociologie et de science politique de la Sorbonne (CNRS/EHESS/Université Panthéon-Sorbonne), il préside également le Conseil scientifique et d'orientation (CSO) de la Mission Libération, qui prépare les commémorations des 80 ans du débarquement et de la Libération.



Le 16 juillet 1944, la milice française arrête un groupe important de résistantes et résistants lors d'une action militaire en Bretagne.



À écouter :

M.O.I, la main-d'œuvre immigrée en lutte,
série documentaire
en quatre épisodes sur
France Culture



l'État français de Pétain et Laval. Cette police se montra autrement plus efficace que ne l'aurait été la Gestapo. La propagande allemande, en faisant placarder sur les murs de France une affiche rouge où figurait dix portraits de ces étrangers résistants, dont celui de Missak Manouchian, en a fait des héros.

Les femmes étaient-elles présentes au sein des FTP-MOI ?

D. P. Oui, y compris parmi les cadres : la Juive bessarabienne Golda Bancic était responsable de l'intendance militaire. Née en 1912 en Moldavie, elle travaille en usine dès l'âge de 12 ans, milite au parti communiste et se marie avec Alexander Jar, Juif et communiste comme elle. Emprisonnée pour ses actions politiques pendant deux ans, elle se réfugie ensuite en France et, plus tard, rejoint les FTP-MOI. C'est elle qui organise le stockage des armes et des explosifs, leur transport sur les lieux des attentats et leur récupération pour que les soldats de l'ombre ne soient pas arrêtés en leur possession.

Deuxième cadre des FTP-MOI, Cristina Boïco, dite « Monique », est responsable du service de renseigne-

ments. Comme Golda, c'est une Juive roumaine, née en 1916 sous le nom de Bianca Marcusohn. Exclue de la faculté de médecine de Bucarest parce qu'elle est juive et communiste, elle arrive en France en 1938 puis aux FTP-MOI en 1942. Son service identifie des objectifs et prépare les actions. Elle est à l'origine d'une des actions les plus retentissantes des FTP-MOI à Paris : elle repère un haut gradé dont elle ignore la fonction, mais qui se trouvera être le colonel SS Julius Ritter, responsable des réquisitions d'ouvriers pour l'industrie allemande par le biais du Service du travail obligatoire (STO). Elle entreprend sa filature et permet ainsi son exécution par des FTP-MOI le 28 septembre 1943. Échappant aux arrestations de novembre 1943, elle devient la responsable des effectifs des FTP-MOI ...

un de ses camarades le 21 février 1944. Les FTP-MOI sont les unités intérieures de résistance française communiste fondées en avril 1942 pour conduire la guérilla urbaine. Celui qui organisa cette structure parisienne, le Juif roumain Boris Holban, mit en place plusieurs détachements en fonction des langues parlées par ces étrangers : italien, roumain, etc. Il y adjoint un groupe de dérailleurs et une « équipe spéciale » en charge des exécutions de hauts responsables allemands, un service de renseignements, un service médical et le groupe des agents de liaison.

Les effectifs ont varié mais, pour prendre l'exemple de l'été 1943, il y aurait eu moins de 70 personnes pour toute la région parisienne, les FTP-MOI étant de très loin les plus nombreux dans Paris intra-muros. Ils furent tous arrêtés et torturés par la police parisienne, au nom du choix de la collaboration voulue, dès après la défaite, par



À lire :

Manouchian,
Astrig Atamian, Claire Mouradian et Denis Peschanski, *Textuel*, coll. « textuel archives », novembre 2023, 192 p., 250 images.

Tombés du ciel. Le sort des pilotes abattus en Europe, 1939-1945,
Claire Andrieu, Tallandier, avril 2021, 512 p.

“Il a fallu attendre que la communauté scientifique se penche sur la résistance dite « de sauvetage », en dehors des luttes armées, pour que l'importance du rôle des femmes soit pleinement prise en compte.”

... pour l'ensemble de la zone nord. Ces deux femmes ne travaillaient pas les armes à la main, mais elles risquaient leur peau tous les jours, exactement comme les hommes.

Et que faisaient les agents « simples » ?

D. P. Les autres femmes étaient souvent engagées comme agents de liaison. Elles transmettaient les messages, fixaient des rendez-vous et devaient parfois, en cas d'alerte, stopper à temps le déroulement d'une action. Comme dans d'autres réseaux, ce sont les femmes qui cachent, hébergent, nourrissent les résistants. Et prennent des risques considérables, qu'elles soient ou non porteuses d'armes.

La MOI avait organisé un autre service tout à fait particulier, le Travail allemand (TA) ?

D. P. Oui, la section du Travail allemand était un détachement intermédiaire entre l'action politique et militaire,

constitué en 1941 par Artur London (Juif, tchécoslovaque, il a fait partie des Brigades internationales). Il avait pour objectif d'infiltrer les troupes allemandes et de les démoraliser en menant des actions de propagande contre la guerre et contre Hitler. Une Roumaine, Irma Mico, a ainsi organisé à Paris un groupe d'une quinzaine de jeunes femmes d'origine tchèque, hongroise, roumaine ou autrichienne, quasiment toutes juives et parlant couramment allemand. Elles se baladaient dans les rues, dans les cafés et accostaient ainsi les soldats allemands pour repérer les antinazis, convaincre les autres et obtenir qu'ils distribuent des tracts et des journaux en allemand.

Militant en province, Dora Schaul, Juive allemande, communiste, résistante en France sous le nom de Renée

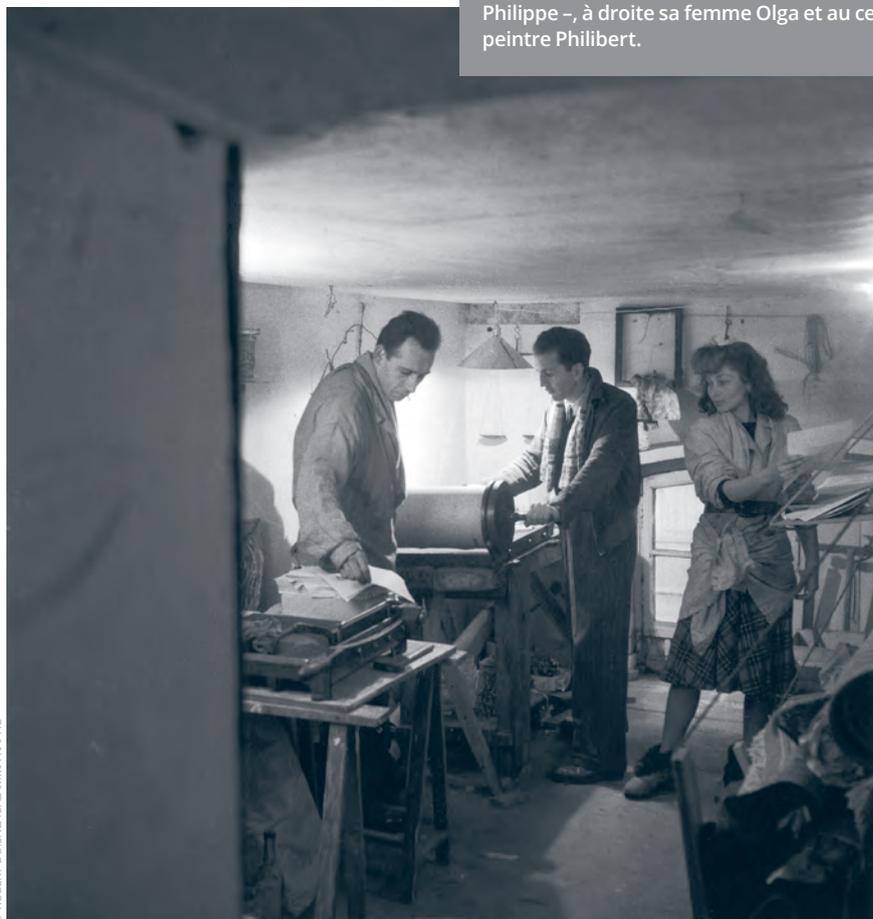
Fabre, a raconté bien plus tard comment elles avaient eu aussi pour consigne de se faire embaucher directement dans les services allemands, sur les bases aériennes, au tri postal militaire ou aux foyers des soldats. Dora s'est ainsi retrouvée au bureau de postes des armées à Lyon, au même endroit que les bureaux de la Gestapo. Elle put ainsi apprendre par cœur les adresses de cinq militaires allemands par jour et les transmettre à l'organisation pour toute action de déstabilisation. Toutes ces femmes en se mettant ainsi dans la gueule du loup, étaient d'un courage incroyable.

Que sont-elles devenues ?

D. P. Sur les 69 personnes membres des FTP-MOI arrêtées en novembre 1943, 22 hommes seront fusillés, la plupart des autres déportés ; Golda Bancic, condamnée à mort, sera exécutée en Allemagne. La plupart des autres membres ont été déportés dans les camps, dont la moitié de femmes³. Certaines furent envoyées en Allemagne pour y être guillotines ; ce fut le cas d'Irène Wosikowski, militante communiste d'origine allemande, qui faisait partie de la section TA à Marseille. Mise en accusation pour haute trahison, elle fut guillotinée en octobre 1944 à Berlin. Comme Golda, guillotinée à Stuttgart. Imaginez que Golda n'a été reconnue « Morte pour la France » qu'en 2011, près de 70 ans après !

Lorsqu'on lit les lettres que toutes ces femmes et tous ces hommes condamnés ont laissé avant de mourir et qui mentionnent quasiment toutes leur attachement à la France, c'est incroyable... Nombreux sont les résistants et otages étrangers qui n'avaient pas obtenu cette mention. Elle fut attribuée par décision du président de la République en juin 2023. ||

Reconstitution d'un atelier de presse clandestine de la Résistance à Paris, 1945. À gauche, le peintre italien Enrico Pontremoli – nom de code Monsieur Philippe –, à droite sa femme Olga et au centre, le peintre Philibert.



3. Voir Dimitri Manassis et Jean Vigreux, *Avec tous tes frères étrangers. De la MOE aux FTP-MOI, Libertalia*, février 2024.

Marseille, 9 mai 1945.
Liesse populaire à l'annonce
de la capitulation de
l'Allemagne.

Marseille libérée !



© JULIA PIROTTE, « COLLECTION LA CONTEMPORAINE » © DROITS RÉSERVÉS

Photo-reporter et résistante, Julia Pirotte documente en images la première journée de l'insurrection marseillaise, aux côtés des combattants. À travers ces clichés, l'historienne Claire Miot raconte l'épisode peu connu de la libération de la ville.

La Libération de la France ne se résume pas au « D-Day », ce fameux 6 juin 1944 qui vit près de 156 000 soldats (américains, anglais, canadiens essentiellement) prendre d'assaut cinq plages de la côte Normande pour chasser les Allemands de l'Europe de l'Ouest. Cette période démarre en fait dès novembre 1942, avec le débarquement des Alliés en Algérie, puis la libération de la Corse en 1943, et se poursuit avec le débarquement de l'armée française (la « Première Armée »), en Provence le 15 août 1944. Il faudra ensuite presque un an de combats pour que tout le territoire français soit libéré, avant la capitulation allemande le 8 mai 1945.

Tandis que ce qui était encore « l'empire français » envoie des bataillons de milliers de soldats pour débarquer en Provence puis libérer les villes de Toulon, Marseille et Lyon, l'armée française ne fournit qu'une mince contribution au débarquement de Normandie. Mais notre mémoire

collective retient surtout l'image, il est vrai spectaculaire, du débarquement allié. « En fait, jusqu'aux guerres de décolonisation, le débarquement de Provence n'est pas complètement oublié, remarque Claire Miot, historienne au Centre méditerranéen de sociologie, de science politique et d'histoire¹ et autrice de *La Première Armée française, de la Provence à l'Allemagne (1944-1945)* paru aux éditions Perrin. On célèbre la France libérée par son empire, les troupes coloniales défilent sur les Champs Élysées... Cela change avec la guerre d'Algérie, car à partir de là deux mémoires se télescopent. Il devient difficile de célébrer le général Salan, qui fut à la tête du 6^e régiment de tirailleurs sénégalais lors du débarquement en Provence, et libéra notamment Toulon, mais participe ensuite au putsch des généraux à Alger (1961) et devint chef de l'Organisation armée secrète (OAS), luttant pour le maintien du statu quo de l'Algérie française ! »

De plus, seuls une minorité des soldats de la première armée sont des métropolitains. L'immense majorité vient de l'empire, notamment d'Afrique du Nord. Comment mettre à l'honneur des hommes qui ont sauvé le pays mais contre une partie desquels on vient de se battre pour conserver nos colonies ? « Enfin, le symbole de la libération



À lire :

La Première Armée française, de la Provence à l'Allemagne (1944-1945),
Claire Miot, Perrin,
2021, 454 p.

Catalogue de l'exposition « Julia Pirotte, photographe et résistante »,
Caroline François
et Bruna Lo Biundo,
édité par le Mémorial
de la Shoah,
mars 2023, 52 p.

de la capitale, Paris, est plus fort que celui de la libération d'une ville de province », poursuit Claire Miot. Le film *Indigènes*, réalisé par Rachid Bouchareb en 2006, redonne leur juste place aux combattants coloniaux, et incite le président Jacques Chirac à accélérer le règlement de la question du niveau de leurs pensions, d'un montant nettement inférieur à celles des soldats nationaux. Mais il faudra attendre le 70^e anniversaire de la Libération pour que le président François Hollande place au cœur de ses discours le débarquement de Provence et les soldats colonisés.

Dix jours de combats intenses

Hitler a ordonné à ses troupes de « se battre jusqu'à la mort » pour tenir Toulon et Marseille, ces ports essentiels par lesquels passe le ravitaillement en hommes et en matériel des alliés. Il faudra dix jours de combats très rudes pour libérer la ville ¹. Mais Julia Pirotte ne documente que la première journée, celle du 21 août, durant laquelle seuls les résistants sont à l'œuvre, appuyés par une partie de la population civile insurgée. D'où l'absence des soldats de la première armée sur ces photos.



¹ Marseille, insurrection du 21 août 1944.

...

Des barricades sont dressées dans toute la ville ², et une grande partie de la population, notamment les femmes s’y relaient pour aider et ravitailler les combattants. Devant ces images trop évocatrices du soulèvement révolutionnaire de la Commune (1871), le général de Lattre de Tassigny, commandant de la première armée, aurait ordonné au général Monsabert, qui a débarqué en Provence à la tête de la 3^e division d’infanterie algérienne (DIA), de stopper sa progression sur Marseille. Il aurait préféré attendre que les résistants, en difficulté, demandent l’aide de l’armée régulière, ce qu’ils feront effectivement dès le 22 août. Les troupes de Monsabert entrent alors dans Marseille le 23 août et combattent avec les soldats de la Résistance.

“Il faut bien se rendre compte que durant ces journées, les femmes étaient dehors, dans les rues, sur les barricades, aux côtés des combattants, contribuant à incarner aux yeux de certains le “péril rouge” d’une population en insurrection.”

² Le 21 août 1944, la population érige des barricades.



© JULIA PIROTTE, « COLLECTION LA CONTEMPORAINE » © DROITS RÉSERVÉS



3 Transport d'un blessé dans le quartier d'Endoume, le 21 août 1944.



4 Combattante et résistante, cette femme participe à l'évacuation d'un blessé, sur la photo de gauche.

Publiée dans le journal *Rouge Midi*, le 3 septembre 1944, sous le titre « Les femmes dans la bataille », la photo ci-dessous **5** renvoie à l'image traditionnelle des femmes dans une tâche d'aide et de soin aux enfants. Mais dans l'article qu'elle illustre, Julia Pirotte rappelle, presque avec lyrisme, qu'elles ont activement participé à la Résistance, hors de la sphère domestique. « *Je les ai vues au travail, dans l'illégalité, ces centaines de femmes, dans les transports d'armes, dans les renseignements, fabriquant des pièces*

Sur la photo ci-dessus **3**, publiée dans le journal *Combattre* à l'occasion du premier anniversaire de l'insurrection en 1945, et titrée « Transport d'un blessé dans le quartier d'Endoume », une femme au premier plan porte un drapeau blanc, et entre les deux hommes, on distingue une femme casquée, qui sera photographiée dans un autre moment, en gros plan **4**. Cette même « femme au casque » figure dans une autre image prise par Julia Pirotte, quelques jours plus tard, alors qu'elle reçoit des mains du général Monsabert une décoration pour son engagement dans la Résistance. Nombre de ces femmes qui travaillaient pour la Résistance trouveront ensuite leur place dans l'armée régulière.

En avril 1944 est constitué, dans la continuité du corps des volontaires françaises créé par De Gaulle à Londres, le corps des AFAT, les « Auxiliaires féminins de l'armée de terre ». « *Mais vous remarquerez qu'on les qualifie d'"auxiliaires" et, de plus on les recrute toujours explicitement "pour libérer les hommes des fonctions non combattantes"* », commente Claire Miot. Elles seront jusqu'à 10 000 dans la première armée, affectées à des emplois administratifs et logistiques : téléphonistes, ambulancières, infirmières, recrutées pour partie dans les rangs de la Résistance, au fur et à mesure de la libération du territoire.



5 « Les femmes de toutes origines sociales organisent lingerie, nurseries, ravitaillement pour la population affamée », commente Julia Pirotte.

© JULIA PIROTTE, « COLLECTION LA CONTEMPORAINE » © DROITS RÉSERVÉS



6 Défilé des goumiers, soldats volontaires de l'armée marocaine, le 29 août 1944.

d'identité. Et puis je les ai vues dans la bataille insurrectionnelle [...] dans des casernes, usines, permanences, distribuant la nourriture aux combattants sous les rafales des balles et des bombes [...] je les ai vues des milliers et des milliers, femmes de toutes couches et opinions politiques : ouvrières, institutrices, sœurs qui dans un effort commun organisaient hôpitaux et cliniques, lingerie et nurseries, ravitaillement pour la population affamée [...].

Par ailleurs, comme le souligne Claire Miot, « il faut bien se rendre compte que durant ces journées, les femmes étaient dehors, dans les rues, sur les barricades, aux côtés des combattants, contribuant à incarner aux yeux de certains le "péril rouge" d'une population en insurrection ».



À lire :

Une Histoire du Débarquement et de la Bataille de Provence, Passés composés, à paraître en août 2024.

Après s'être retranchées sur la colline de Notre-Dame-de-la-Garde et dans une partie du Vieux-Port, les dernières forces ennemies présentes à Marseille ne capitulent que le 28 août 1944. L'armée française perd 1 825 hommes dans la bataille, mais capture près de 11 000 prisonniers. Les 200 tués et 500 blessés parmi la population témoignent aussi de la violence des combats.

Un immense défilé est organisé, qui célèbre l'unité de la population face à l'ennemi. Le « péril rouge » s'est éloigné. Résistants, soldats de l'armée régulière, européens, maghrébins, hommes et femmes, tous ont leur place. Ici défilent notamment les « goumiers » 6, soldats volontaires recrutés dans des tribus marocaines considérées par le pouvoir colonial comme naturellement « guerrières ».

Julia Pirotte braque encore une fois son objectif sur les femmes, en tête du défilé du 29 août 1944 7, brandissant des slogans liés à l'actualité et à la politique : « À mort Pétain », « Vive l'école de la liberté ». Peut-être parce que les femmes françaises (de Métropole seulement) viennent d'obtenir le droit de vote, par une ordonnance du 21 avril 1944 ? Comme le souligne l'historien Fabrice Virgili (lire p. 23), « on a présenté le droit de vote des femmes comme une "récompense" de leur action pendant la guerre, façon de ne pas reconnaître le long combat qu'elles ont mené pour obtenir ce droit élémentaire à la citoyenneté », notamment via le mouvement suffragiste, dont le premier groupe en France fut fondé en... 1876 ! II



7 Les femmes qui défilent ici, le 29 août 1944, viennent d'obtenir le droit de vote, le 21 avril 1944.

© JULIA PIROTTE, « COLLECTION LA CONTEMPORAINE » © DROITS RÉSERVÉS

Femme tondue pour
« collaboration horizontale »
lors de l'épuration
(Montélimar, 29 août 1944).

Les historiens Fabrice Virgili et Fabien Lostec se sont intéressés aux châtiments infligés aux femmes soupçonnées d'avoir collaboré avec l'ennemi. Ils montrent que les jugements moraux ne sont jamais bien loin des arguments juridiques quand il s'agit de les punir, voire de les exécuter.

Femmes collaboratrices: morale et châtiments

Àvec la fin de la guerre vient le temps de l'épuration. Avant que la justice ne reprenne son cours, une période trouble s'installe où se mêlent désir de vengeance et règlements de comptes. Résistants, citoyens lambda, ils s'en prennent aux collaborateurs réels ou supposés. Pour les femmes accusées de collaboration « horizontale » avec l'ennemi, c'est-à-dire soupçonnées d'avoir eu des relations sexuelles avec des Allemands, le premier châtiment consiste à leur tondre les cheveux. Vingt mille femmes seront ainsi tondues en France à la Libération ! Loin d'être anecdotiques, les tontes se pratiquent surtout à l'été 1944 (elles ont démarré un peu avant et se poursuivent jusque début 1946) dans tous les départements, dans les villages comme dans les grandes villes, et même dans tous les pays européens : de l'Italie au Danemark en passant par la Suède, la Belgique, les Pays-Bas, jusque sur les îles de Jersey et Guernesey, partout, avec la participation active de la population, les

coiffeurs aiguisent leurs ciseaux pour raser les têtes de celles qu'on surnomme « les putes à Boches ».

Comment expliquer un tel engouement pour un châtiment corporel qui, comme tous les autres (le carcan, la roue et le fouet), a été aboli avec la Révolution, et est donc illégal ? « Loin d'être honteuse, la violence est alors libératrice en ce qu'elle permet au plus grand nombre d'agir collectivement, explique Fabrice Virgili¹, auteur d'une thèse sur le sujet. Les tontes font largement consensus et même les enfants y assistent. Estrades, kiosques à musique, places, balcons, fontaines de village : le "spectacle" est public et permet de se réapproprié un espace collectif qui avait été confisqué par les affiches et les drapeaux, les couvre-feux, et surtout la présence de l'ennemi. Le "spectacle" est aussi annoncé, car souvent précédé d'une décision prise, par exemple, par un comité local ou départemental de Libération. » La tonte a donc cette particularité d'être un châtiment corporel faussement spontané, suivant parfois un simulacre de procès – même si le droit

“Alors qu’une relation sexuelle est sans aucun effet sur le cours de la guerre, elle est associée à la trahison chez les femmes, tandis qu’on ne reproche jamais aux hommes d’avoir couché avec une ennemie.”

ne prévoit absolument pas une telle peine pour des présumées « coupables » – qui se limite le plus souvent à prendre acte de la notoriété du soupçon de collaboration. Elle permet aussi aux résistants, souvent craints car décriés comme bandits ou terroristes par la propagande de Vichy et des Allemands, d’être à la fois reconnus et acclamés également pour leur pouvoir d’organiser cette punition.

« Mais la tonte n’est pas seulement la punition d’une collaboration sexuelle dite “horizontale”, raconte l’historien. Elle est aussi le châtement genré et sexué de la collaboration. Parce qu’elles sont femmes, les collaboratrices encourent une punition supplémentaire. Attribut de la séduction féminine, la chevelure, symbole de la trahison, doit disparaître. Métaphore du territoire national, le corps de ces femmes, symboliquement souillé par l’ennemi, ne leur appartient plus et devient celui de la Nation. »

Un nombre record de femmes exécutées

En plus d’être tondues, les femmes sont parfois dénudées, marquées sur le corps par des signes infamants, ce qui sexualise encore plus le châtement. Et alors qu’une relation sexuelle est sans aucun effet sur le cours de la guerre, elle est associée à la trahison chez les femmes, tandis qu’on ne reproche jamais aux hommes d’avoir couché avec une ennemie et que leur sexualité n’intéresse personne d’autre qu’eux-mêmes. « L’examen attentif des motifs de la tonte des femmes montre que si la moitié d’entre elles a eu des rapports sexuels avec l’ennemi, les autres sont punies pour des actes identiques aux hommes : dénonciation, engagement dans une organisation collaborationniste, travail pour les Allemands, etc. Mais l’accusation “sexuelle” prend le pas sur tout le reste ! », souligne Fabrice Virgili.

Fabien Lostec², de son côté, relève exactement le même phénomène lorsqu’il étudie la violence – légale cette fois – qui s’est exercée à l’égard des femmes condamnées à mort. L’historien rappelle d’abord que jamais,



À lire :

Condamnées à mort. L'épuration des femmes collaboratrices, 1944-1951, Fabien Lostec, CNRS Éditions, mars 2024, 400 p.

La France « virile ». Des femmes tondues à la Libération, Fabrice Virgili, Ed. Payot Rivages, 2019, 432 p.

Les Françaises, les Français et l'Épuration. De 1940 à nos jours, François Rouquet et Fabrice Virgili, Gallimard/Folio, coll. « Folio histoire », 2018, 832 p.

depuis la Révolution française, on aura condamné et exécuté autant de femmes en si peu de temps (en 1944 essentiellement). Elles sont 651 à être frappées par la peine capitale en 1944, et 46 d’entre elles seront fusillées. « Ce moment souligne un rétablissement de l’ordre masculin particulièrement répressif à l’égard du sexe féminin », note Fabien Lostec.

Le très grand nombre de femmes condamnées à mort s’explique avant tout par la gravité des faits qui leur sont reprochés. La plupart ont collaboré avec la police, française ou allemande, employant parfois les méthodes de torture psychologique ou physique aussi cruelles que celles des soldats. Certaines, les délatrices, ont trahi un membre de leur famille, une personne de leur quartier ou de leur village. D’autres ont adhéré à des partis collaborationnistes et revendiquent leur adhésion à des idées autoritaires ou nazies. Dans tous les cas, leur engagement avec l’ennemi a pu provoquer tortures, déportations, assassinats. Mais au moment des procès, les accusateurs insisteront également sur leurs fautes morales, trouvant toujours moyen de relativiser leur engagement politique lorsqu’elles l’affirment. Tout donne l’impression qu’il s’agit pour les diffé-

1. Directeur de recherche CNRS au laboratoire Sorbonne-Identités, relations internationales et civilisations de l’Europe (Sirice - CNRS/Sorbonne Université/Université Panthéon-Sorbonne). 2. Docteur en histoire contemporaine, chargé d’enseignement à l’université Rennes 2, laboratoire Tempora.



Marie-Louise Biard, condamnée à mort par la cour de justice de Quimper le 24 mai 1945, sera finalement graciée et sa peine commuée en vingt ans de travaux forcés.

© ARCHIVES DÉPARTEMENTALES D'ILLE-ET-VILAINE, Z78/W

possédée au sens médiéval du terme. Il semble qu'elle ait été la proie d'une sorte de perversion sexuelle poussée à un paroxysme démentiel [...] Une image qui permet d'occulter les motivations politiques des femmes, renvoyées à la sauvagerie de leur sexe », commente Fabien Lostec. Juliette Jamain sera condamnée à mort et exécutée en 1948, à 23 ans.

Traîtres et mauvaises mères

Autre exemple, Hélène Fresneau, mariée à un capitaine d'infanterie dont elle a neuf enfants. Tandis que son mari adhère à la Légion des volontaires français contre le bolchevisme (LVF), elle devient la maîtresse du responsable du service de sécurité de Tours, puis agente de renseignement en 1942, et travaille ensuite sous les ordres d'un chef de la Gestapo locale. Elle procède à des arrestations, armée d'un revolver, fuit en Allemagne puis en Autriche en 1944 avant de revenir en France et d'y être arrêtée en 1946. Ni elle ni son mari n'ont assumé leur rôle de parents, mais on lui en fait à elle seule le reproche lors de leur procès. Le procureur général estime qu'en tant que « mère dénaturée et épouse indigne, elle est le type même de la trahison », relate Fabien Lostec. « Le fait d'être mère de famille nombreuse ne la protège pas de l'exécution, alors que son mari étant décédé peu après son procès, elle était la seule à pouvoir s'occuper de leurs enfants, commente l'historien. Elle sera exécutée en juin 1947 pour avoir été agent de renseignement, et aussi une mauvaise mère. » Devant le peloton d'exécution des douze soldats, elle se présentera avec une photo de ses neuf enfants sur la poitrine...

Mauvaises épouses, mauvaises mères, les inculpées sont aussi dangereuses en raison de leur intelligence, ou plutôt de leur « ruse », un mot plus ambigu qui permet d'insister sur la menace pour la société que représentent ces femmes ayant agi de façon autonome. D'autant qu'elles ne sont arrêtées et jugées que par des hommes : à l'époque, pas de femmes ni chez les policiers ni dans la magistrature. La question du genre est donc centrale, soit comme facteur aggravant pour les juges, soit comme argument de défense pour les femmes : certaines d'entre elles, pour se dédouaner de leurs actions, se présentent comme des femmes naïves, dépolitisées et soumises aux hommes.

Le temps de la guerre a profondément perturbé les identités respectives des femmes et des hommes, constatent les deux historiens. « Les défaites subies par de nombreux pays européens et les occupations qui ont suivi ont été aussi des faillites du masculin, d'hommes incapables d'empêcher que les ennemis "ne viennent jusque dans nos bras égorger nos fils et nos compagnes" », estime Fabrice Virgili. Partout en Europe, la reconquête du corps des femmes par la violence permet aux hommes de reprendre leur pouvoir sur leur sexualité et de s'assurer le contrôle d'une filiation perturbée par la présence d'hommes étrangers. « Alors qu'en France, les femmes deviennent des citoyennes à part entière (le droit de vote leur est accordé en avril 1944), ce temps court de la Libération est aussi celui de la réaffirmation d'une France "virile", du rétablissement d'un ordre masculin », conclut Fabien Lostec. II

rents acteurs du processus judiciaire d'expliquer l'inexplicable : comment une femme peut-elle faire preuve d'autant de cruauté qu'un homme ? Et comment pourrait-elle, comme un homme, témoigner d'un véritable activisme politique ? « Les magistrats font parfois appel aux médecins pour savoir si elles ne sont pas folles, raconte Fabien Lostec. Ou ils expliquent leur collaboration avec l'ennemi par des traits de caractères intimes, comme une vie sexuelle hyperactive. Car il ne suffit pas qu'elles aient trahi, il faut aussi qu'elles soient hors norme et/ou que leur morale soit défaillante ! »

C'est ainsi que Juliette Jamain, née en 1925, adhérente du parti franciste (un des principaux partis collaborationnistes pendant la guerre), est présentée comme une sorcière. Partie travailler en Allemagne en raison de ses convictions politiques, elle devient la compagne d'un SS gardien de camp à Dachau, détaché dans une usine, portant elle-même uniforme et insignes nazis. L'aidant dans son travail, elle dénonce les infractions des déportés et des travailleurs, provoquant la torture et la mort de plusieurs d'entre eux. Mais alors que le psychiatre, lors du procès, estime, qu'« elle a réalisé l'abomination de ses crimes », le commissaire du gouvernement lui, juge que « son attitude, ses sentiments, ses crimes même sont ceux d'une

Autoportrait de Julia Pirotte, vers 1942-1943, et une partie de l'atelier dans lequel elle fabriquait des faux documents, dans son logement à Marseille.



Julia Pirotte, photographe et résistante

Julia Pirotte (née Golda Perla Diament) naît en 1907 en Pologne, dans une famille juive modeste. Elle milite très jeune au parti communiste, ce qui lui vaudra quatre années de prison entre 17 et 20 ans. Pour éviter une nouvelle arrestation, elle s'exile en Belgique en 1934 où elle rencontre Suzanne Spaak, militante et future grande résistante belge, qui sauvera de nombreux enfants juifs et sera fusillée en 1944.

« Suzanne encourage Julia à entreprendre une carrière de photo-journaliste et lui offre l'appareil photo, un Leica, avec lequel elle réalisera tous ses reportages, explique Bruna Lo Biundo, commissaire de l'exposition « Julia Pirotte, photographe et résistante » qui s'est tenue en 2023 au Mémorial de la Shoah. À la suite de l'invasion de la Belgique, Julia s'exile à Marseille, où elle rejoint la MOI qui constitue, au printemps 1942, le détachement Marat des FTP-MOI (mouvement de résistance

regroupant les militants communistes étrangers, lire p. 14). Dans la clandestinité, elle est agent de liaison et fabrique chez elle des faux papiers. À découvert, elle travaille pour la presse locale (*La Marseillaise*, *Rouge Midi*, etc.). Le 21 août 1944, elle participe aux combats et photographie son groupe de partisans durant l'insurrection.

« Les plus grands jours de ma vie furent l'insurrection de Marseille, écrit-elle en septembre 1944. Comme tant d'autres, j'avais des comptes à régler avec les nazis ; mes parents et toute ma famille étaient morts dans les camps en Pologne et dans les ghettos. J'étais sans nouvelles de ma sœur, prisonnière politique, je ne savais pas encore qu'elle était morte guillotinée. »

Dans le regard qu'elle porte sur les combats pour libérer la ville, les femmes et les résistants se trouvent délibérément placés au premier plan. Elle poursuivra après la guerre son travail de photo-reporter engagée, notamment en Pologne, où elle documente le pogrom de Kielce, massacre de survivants de l'Holocauste en juillet 1946.

Car au-delà de l'enjeu militaire, la libération de Marseille représente un fort enjeu politique. Depuis la fin du mois de mai, les grèves se multiplient. La SFIO (parti socialiste) est majoritaire dans la région et les alliés, tout comme De Gaulle, se méfient d'une insurrection qui pourrait porter au pouvoir les communistes, très engagés dans la Résistance. L'armée n'est pas encore entrée dans Marseille qu'à l'appel de la CGT, une grève générale est déclenchée le 19 août, et le 21 août 1944, les résistants prennent d'assaut la préfecture. « Le Comité départemental de libération est divisé entre les "politiques", représentés surtout par les syndicalistes ouvriers, qui plaident pour le déclenchement immédiat de l'insurrection, et les "militaires" de l'état-major FTP (Francs-tireurs partisans) qui se montrent réticents, arguant du faible nombre d'hommes et d'armes (300 partisans et 280 mitraillettes), loin des 1 600 combattants estimés par les alliés, et en tout cas dérisoires au regard des 35 000 FFI (Forces françaises intérieures) de la région parisienne », commente Claire Miot.

...

1. Unité CNRS/Aix-Marseille Université/Sciences Po Aix en Provence.

VIVANT  SOCIÉTÉS 

Postures, comportements, anticipation... aucun des faits et gestes des sportifs n'échappe à la science. Pour les Jeux olympiques de Paris 2024, le CNRS met les bouchées doubles pour accompagner les athlètes tricolores. Objectif : améliorer leurs performances et les aider à glaner les médailles tant convoitées, mais aussi leur éviter des blessures. Top départ !

TEXTE PAR MEHDI HARMİ

Dans les coulisses des records

1. En plein effort sur ce mur prototype et épiée par des caméras disposées autour d'elle, toutes les positions prises par cette grimpeuse sont enregistrées. Les capteurs de force reliés aux prises d'escalade et les marqueurs placés sur son corps permettront aux scientifiques du Gipsa-lab, à Grenoble, de bâtir un modèle 3D qui contribuera à l'analyse de la motricité et du comportement musculaire des grimpeurs et des grimpeuses.



© CYRIL FRÉSILLON / ISM / CNRS IMAGES

2. Avant de s'élancer dans le vélodrome olympique, les cyclistes passent des tests biomécaniques en temps réel. Pour cela, les scientifiques de l'Institut des sciences du mouvement - Étienne-Jules Marey, à Marseille, les soumettent à trois types de captation : le mouvement, l'activité musculaire et la vitesse de pédalage. Le tout permet de saisir la finesse de la coordination musculaire orchestrée par le système nerveux central pour réaliser le mouvement de pédalage.

© CYRIL FRÉSILLON / PPRIME / CNRS IMAGES



3. Tracter, pousser, se plier... En aviron, les corps sont très sollicités. Mouvements des athlètes et forces générées par l'aviron sont enregistrés grâce à des capteurs positionnés sur les corps. Les données collectées permettront certes d'optimiser la performance des athlètes, mais surtout de prévenir d'éventuelles blessures. En effet, ces dispositifs, mis en place par l'Institut Pprime, à Poitiers, démontrent que chaque rameur exploite son propre système de coordination musculaire avec, pour conséquence, des contraintes différentes sur le plan musculo-squelettique.

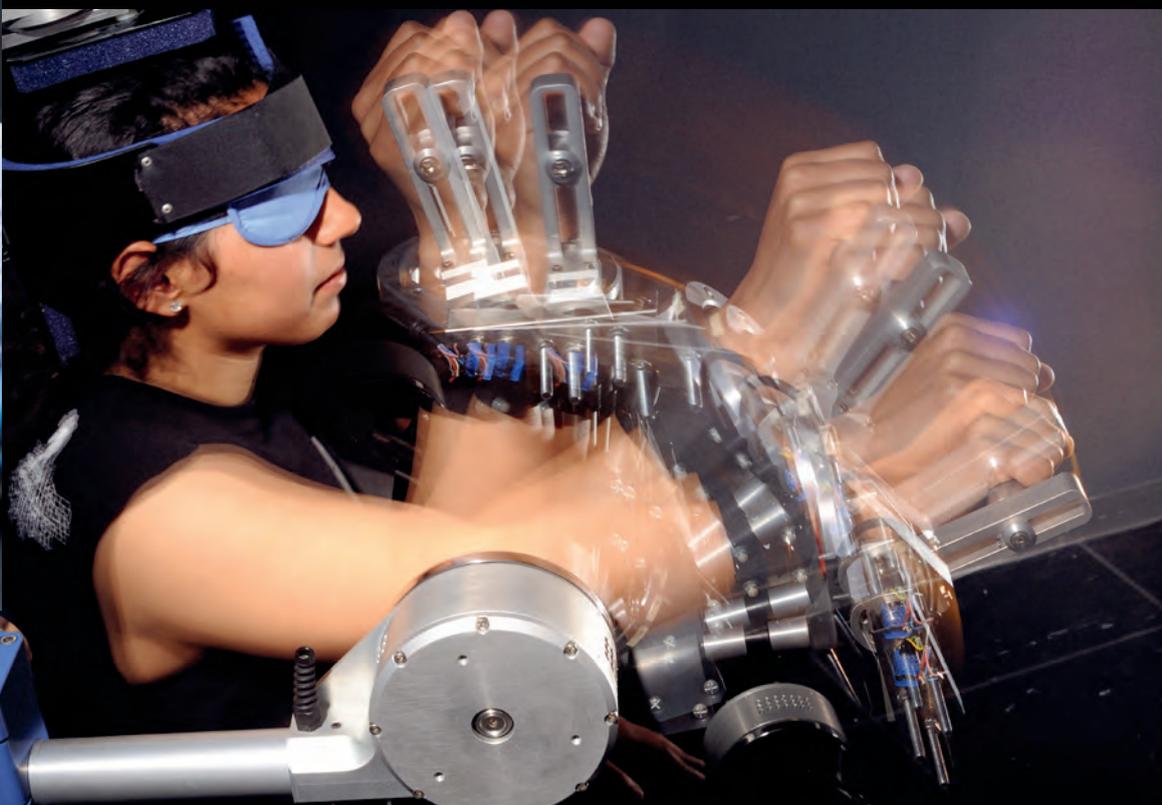
© CYRIL FRÉSILLON / PPRIME / CNRS IMAGES



4. Pour savoir si le port d'une combinaison joue un rôle sur les performances des surfeurs et surfeuses, les athlètes se plient à des expériences hors de l'eau. Plaquettes reliées aux mains pour simuler la résistance de l'eau, marqueurs réfléchissants pour la capture optique des mouvements : tout est mis en œuvre dans le but de comparer les résultats des séances d'effort avec ou sans combinaison. Les scientifiques de l'Institut Pprime, à Poitiers, pourront ensuite déterminer quelle combinaison est la plus appropriée à la pratique du surf.



5. Yeux bandés et membres sanglés dans un ergomètre permettant la mesure des angles articulaires, cette athlète travaille la proprioception, sorte de sixième sens qui permet à chacun de connaître la position et le mouvement de ses segments dans l'espace grâce à des récepteurs sensoriels présents notamment dans les muscles et les articulations. À l'Institut des sciences du mouvement - Étienne-Jules Marey, à Marseille, les scientifiques étudient le lien entre niveau de performance et précision dans la reproduction de la position angulaire optimale sans l'aide de la vision.



© EMMANUEL FERRIN / CNRS IMAGES

6. D'étranges lunettes cadrent le visage des volleyeuses de l'équipe de France. Appelé "eye trackers", pour « lunettes de suivi oculaire », ce dispositif, mis au point par le Centre de recherche cerveau et cognition, à Toulouse, enregistre les zones visuelles fixées par les joueuses. Le but ? Évaluer les effets d'un entraînement perceptif dans l'optique d'améliorer la qualité des réceptions des services.

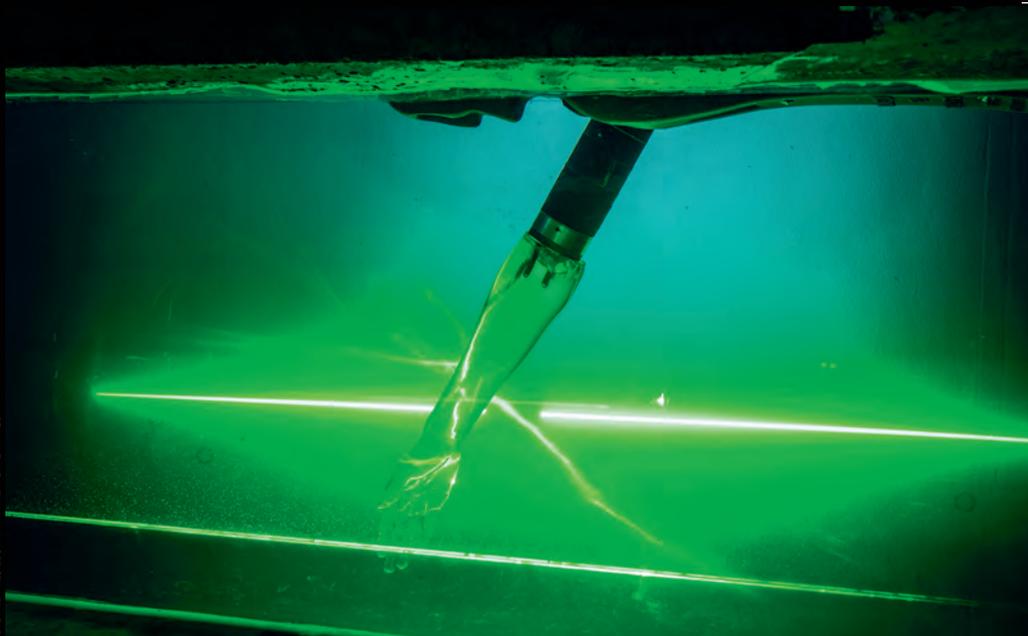


© DAVID VILLA / SCIENCEIMAGE, CBI / CERCO / CNRS IMAGES



© FRÉDÉRIQUE PLAS / UMRS672 / CNRS IMAGES

7. Vance Bergeron (à gauche) et Amine Metani (à droite), tous deux chercheurs, se préparent pour le Cybathlon, les JO pour athlètes améliorés. À l'origine physicien au Laboratoire de physique de l'ENS, à Lyon, Vance Bergeron s'est réorienté, après un grave accident, vers la rééducation neurologique et la stimulation électrique fonctionnelle, qui remobilisent les membres paralysés grâce à de faibles impulsions électriques. En 2020, leurs travaux les mènent à la création de la start-up Kurage qui, grâce à l'intelligence artificielle, développe des dispositifs de rééducation neurologique destinés aux centres de réadaptation fonctionnelle et aux particuliers.



© CYRIL FRÉSILLON / PPRIME / CNRS IMAGE

8. Moulé sur un athlète de haut niveau, ce bras est fait d'une résine époxy transparente. D'une densité identique à celle du corps humain, et plongé dans un bassin d'eau et de particules éclairées par laser, il est utilisé par une équipe de recherche de l'université de Poitiers, à l'Institut Pprime, pour simuler la nage et plus particulièrement pour mesurer la vitesse du fluide qui s'écoule autour de lui. Une manière pour les scientifiques de mieux comprendre le comportement de l'eau, source de la propulsion des nageurs.

9. La réalité virtuelle est aussi mise à contribution pour améliorer les performances et l'apprentissage du geste juste. Ici, l'expérience se déroule dans le simulateur de lancer Virtushoot qui reproduit un terrain de basket. En modifiant certains paramètres de la simulation, les scientifiques de l'Institut des sciences du mouvement - Étienne-Jules Marey, à Marseille, sont capables de déterminer les mécanismes à l'origine du geste et ainsi permettre à l'athlète de développer une stratégie de prise d'information menant au geste parfait.

© CYRIL FRÉSILLON / ISM / CNRS IMAGES



L'archéologie devient galactique

UNIVERS

ASTRONOMIE Depuis son lancement en 2013, en inventoriant la dynamique de milliers d'étoiles de la Voie lactée, le satellite Gaia a permis de révéler son passé agité, rendant possible l'émergence d'une véritable archéologie galactique, mais aussi la détection du trou noir stellaire le plus massif jamais observé.

DOSSIER RÉALISÉ PAR HUGO RUHER

“

Une nouvelle page de l'astronomie s'ouvre. » C'est ainsi qu'en 2016, l'astronome François Mignard, responsable scientifique de la mission Gaia, commentait la publication de son premier catalogue de résultats. À l'époque, le télescope spatial Gaia avait déjà permis d'établir avec une précision inégalée la luminosité, la distance et la vitesse relative d'environ 1 milliard d'étoiles. Dans l'avant-dernier catalogue, publié en juin 2022, l'inventaire ne comprenait pas moins de 1,8 milliard d'étoiles.

Mais à quoi servent toutes ces données ? À se repérer dans la Voie lactée, certes, mais aussi à comprendre pourquoi ces étoiles sont là. « *Notre galaxie, telle qu'elle est aujourd'hui, a commencé à se former il y a environ 13 milliards d'années*, raconte Alejandra Recio-Blanco¹, astronome à l'Observatoire de la Côte d'Azur. *Ce que nous voulons savoir avec Gaia, c'est ce qu'il s'est passé au cours de son histoire,*

La Voie lactée va entrer en collision avec Andromède, sa plus proche voisine, d'ici 4 milliards d'années. Sur cette illustration, qui représente le ciel nocturne de la Terre dans 3,75 milliards d'années, Andromède (à gauche) commence à déformer la Voie lactée sous l'effet des marées.

l'effet de sa propre gravité, finissant par former étoiles et galaxies. Mais ce tableau général ne permet pas d'expliquer comment on en est arrivé à des galaxies spirales semblables à la nôtre. « *Ces modèles ne sont pas suffisamment précis, et l'archéologie galactique, notamment via les découvertes de Gaia, a ajouté de la complexité à cette image simpliste*, précise Alejandra Recio-Blanco. *Dorénavant, nous pouvons étudier l'évolution d'une galaxie, la Voie lactée, avec une grande précision.* »

“Le satellite Gaia a un tel degré de précision que nous pouvons retracer les mouvements des étoiles.”

Et Gaia a quelque peu chamboulé ce que l'on pensait savoir. « *Le satellite a un tel degré de précision que nous pouvons retracer les mouvements des étoiles*, explique Nicolas Martin, de l'Observatoire astronomique de Strasbourg². *Nous pouvons ainsi identifier des groupes d'étoiles qui vont dans la même direction, ce sont des courants stellaires. Ensuite, il faut tout un travail d'orpaillage, de modélisation, pour savoir d'où viennent ces courants et retracer la formation de la Voie lactée.* »

Reconstituer l'écheveau des courants stellaires

Les résultats de ces travaux ont montré qu'il n'y a pas eu une bouillie post-Big Bang suivie de quelques milliards d'années de calme, mais une évolution constante qui s'est poursuivie jusqu'à aujourd'hui. Bref, la Voie lactée connaît encore des transformations subtiles au gré des courants stellaires. Pour réussir à reconstituer cette histoire galactique, il faut étudier un nombre considérable d'étoiles. « *On ne pourrait pas retracer l'histoire de France en ne s'intéressant qu'à une dizaine de personnes !* », plaisante Alejandra Recio-Blanco. Gaia, qui a déjà pu observer 2 % des étoiles de la Voie lactée, est ainsi capable de révéler des événements et des structures du passé qui avaient jusqu'à présent échappé aux astronomes.

comment nous en sommes arrivés là. » À l'instar de l'archéologie terrestre, l'archéologie galactique se fixe ainsi pour but de remonter le temps pour comprendre l'évolution de la Voie lactée et reconstituer l'apparence qu'elle avait il y a des milliards d'années.

De la cosmologie à l'archéologie galactique

Les grands télescopes comme l'observatoire W. M. Keck, Hubble, ou plus récemment le James-Webb, qui parviennent à observer des galaxies très lointaines, ont commencé à donner un aperçu de ce à quoi ressemblait l'Univers peu de temps après le Big Bang. Le modèle cosmologique standard propose quant à lui le scénario d'un Univers à l'origine très dense, en expansion et à l'intérieur duquel la matière se serait condensée sous

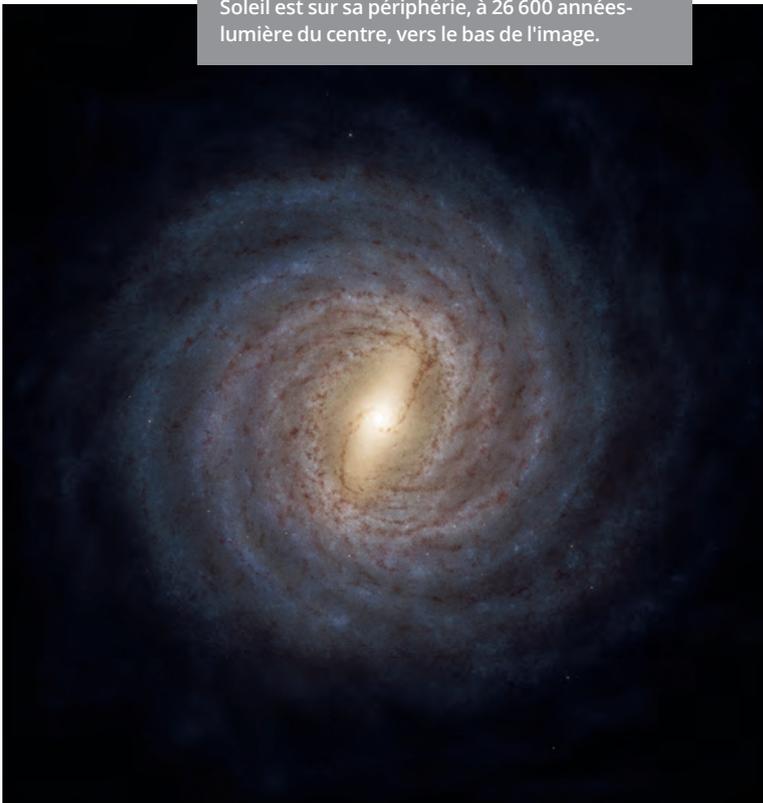
1. Laboratoire Joseph-Louis Lagrange (CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Côte d'Azur). 2. Unité CNRS/Université de Strasbourg.

Parmi eux, la découverte en 2018 de la galaxie Gaia-Enceladus. D'une masse similaire à celle du Petit Nuage de Magellan, elle s'est mélangée à la Voie lactée il y a une dizaine de milliards d'années, ce qui a bouleversé l'architecture et l'évolution de notre galaxie. « *Cela a constitué un événement majeur dans l'histoire de la Voie lactée*, affirme Alejandra Recio-Blanco. *Sans savoir ça, nous ne pouvons pas comprendre notre propre galaxie.* » Plus de dix ans après la mise en orbite de Gaia, le nouveau portrait biographique de notre galaxie demeure imprécis, mais on y discerne de mieux en mieux les différents courants stellaires qui s'y sont amalgamés pour former la Voie lactée telle que nous la connaissons.

À la poursuite des étoiles reliques

Les astronomes-archéologues ne s'intéressent pas qu'aux mouvements des étoiles, ils en traquent également les reliques les plus anciennes. Une quête que Nicolas Martin mène avec le projet Pristine. « *Nous cherchons les plus vieilles étoiles de notre galaxie. Elles sont difficiles à trouver car très rares, mais elles ont quelques caractéristiques intéressantes.* » Pour repérer ces astres, Pristine s'appuie depuis une dizaine d'années sur le télescope Canada-France-Hawaï à Mauna Kea. En effet, celui-ci dispose d'un filtre bien particulier qui lui permet de connaître la métal-

Vue d'artiste de la structure en spirale de la Voie lactée, avec sa barre lumineuse centrale. Le Soleil est sur sa périphérie, à 26 600 années-lumière du centre, vers le bas de l'image.



ESA/GAIA/DPAC, STEFANI PAINÈ/WARDENBURG, CC BY-SA 4.0 IGO

“*Peu après le Big Bang, il n’y avait aucun atome plus lourd que l’hélium dans l’Univers.*”

licité des étoiles observées (soit leur teneur en éléments plus lourds que l'hélium), une donnée cruciale pour déterminer leur ancienneté. « *Peu après le Big Bang, il n’y avait aucun atome plus lourd que l’hélium dans l’Univers. Les autres éléments ont été apportés plus tard, avec l’explosion des premières étoiles qui ont répandu ces matériaux formés dans leur cœur*, détaille Nicolas Martin. *Ce qui veut dire qu’une étoile apparue plus récemment aura un peu plus de métaux dans sa composition qu’une plus ancienne. C’est ainsi qu’on arrive, à peu près, à définir l’ancienneté d’une étoile.* »

En dix ans d'activité, le programme Pristine a pu observer des millions d'étoiles parmi lesquelles plusieurs centaines affichent un taux de métallicité si faible qu'elles semblent être nées dans les deux premiers milliards d'années de l'Univers, ce qui en fait des reliques exceptionnelles. Le but est de coupler ces trouvailles avec les données de Gaia pour retracer leur parcours et comment ces premiers ensembles ont fini par capturer d'autres courants stellaires. « *Grâce à ces “fossiles”, nous avons une fenêtre sur ce lointain passé*, ajoute Nicolas Martin. *Nous commençons à dessiner les débuts de la Voie lactée, même s’il nous reste encore beaucoup de chemin à parcourir.* »

Collision en cours et formation d'étoiles

Retracer toute l'histoire de notre galaxie, des premières étoiles jusqu'à son architecture actuelle, reste en effet un horizon encore lointain en dépit des progrès impressionnants accomplis depuis le lancement de Gaia. « *Ce que nous savons désormais*, résume Alejandra Recio-Blanco, *c'est que la Voie lactée n'est pas un espace fermé. Nous sommes en permanence influencés par notre environnement, même à l'échelle galactique.* »

Dernière illustration de ce phénomène : le disque galactique qui oscille légèrement de haut en bas, comme une mare sur laquelle on a jeté un caillou. Cette oscillation, mise en lumière grâce aux données de Gaia, serait due au passage de la galaxie naine du Sagittaire, un ensemble large de 10 000 années-lumière qui est en train de « tomber » dans la Voie lactée. Chaque passage de cette galaxie satellite, découverte il y a à peine trente ans, perturbe le disque galactique et provoque des vagues de formation d'étoiles. Gaia est loin d'avoir fini sa mission, et un catalogue partiel de données paru en octobre dernier ne comprend que les 34 premiers mois de sa mission. Les archéologues galactiques ont encore des années d'observation d'étoiles à analyser, et la Voie lactée n'a pas fini de livrer les secrets de son histoire mouvementée. ||



Vue d'artiste d'un système binaire constitué d'un trou noir et d'une étoile.

Gaia BH3, le trou noir qui ne devrait pas exister

Le satellite Gaia nous avait jusqu'ici permis d'observer la position et le mouvement des étoiles, percer à jour les sous-structures de la galaxie ou encore trouver de nouvelles exoplanètes... Mais il permet aussi, plus rarement, de détecter des trous noirs. Seuls deux de ces astres compacts avaient été découverts grâce aux données d'astrométrie en 2022, et c'est désormais un troisième qui a fait l'objet d'une publication dans la revue *Astronomy & Astrophysics*. Ce système binaire composé d'un trou noir (baptisé Gaia BH3) et d'une étoile très pauvre en métal (donc très ancienne) est situé à 2 000 années-lumière de la Terre, dans le halo galactique. Gaia BH3 affiche une masse 33 fois supérieure à celle du Soleil. « C'est le trou noir stellaire le plus massif jamais découvert dans notre Voie lactée, affirme Pasquale Panuzzo¹, responsable adjoint des données spectroscopiques au sein de la collaboration Gaia. Jamais un trou noir de cette taille n'avait été détecté, si ce n'est dans des galaxies lointaines, à l'aide des observatoires gravitationnels Ligo-Virgo. »

Gaia ne peut pas détecter directement les trous noirs qui n'émettent pas de lumière. En revanche, il parvient à mesurer la distance des astres et leur trajectoire dans l'espace. Il lui est donc possible de repérer de petites perturbations dans les trajectoires des étoiles. « Nous sommes

Un système binaire contenant le trou noir le plus massif de la Voie lactée après SgrA* vient d'être découvert. Un objet extrêmement rare qui questionne les modèles de formation de ces astres.

capables de déterminer si une étoile est simple ou si elle a un compagnon à partir de ces perturbations, détaille Frédéric Arenou², de la collaboration Gaia, en charge du traitement des étoiles binaires. Nous pensons que la moitié des étoiles de notre galaxie réside dans un système binaire ou multiple. »

Habituellement, toute cette collecte de données est publiée en une seule fois, à l'occasion du dévoilement du catalogue Gaia. Le dernier en date, DR3, a été rendu public en juin 2022, et il faudra attendre fin 2025 pour le suivant. Mais cette fois, les scientifiques ont fait une exception devant l'importance de la découverte. Les variations de position et de vitesse radiale d'une étoile située dans la constellation de l'Aigle ont permis de démontrer la présence d'un objet extrêmement massif qui n'émet pas de lumière : le trou noir Gaia BH3. Les deux astres dessinent un ballet où chaque révolution dure un peu plus de onze années. Durant ce parcours, l'orbite excentrique de l'étoile la fait passer, au plus près, à environ 4,5 unités astronomiques du trou noir, soit la distance entre Jupiter et le Soleil. Et au plus loin, elle part à 29 unités astronomiques, ce qui équivaut à l'orbite de Neptune.

Un trou noir beaucoup trop massif

Gaia BH3 présente une particularité : il s'agit d'un trou noir dormant. C'est-à-dire qu'il est trop loin de son étoile pour pouvoir lui arracher de la matière, ce qui se traduirait par une émission de rayons X qui aurait permis de le détecter directement auparavant. Ensuite, grâce aux mesures de Gaia, il est possible de déterminer sa masse avec une grande pré-

1. et 2. Laboratoire Galaxies, étoiles, physique, instrumentation (Gepi), unité CNRS/Observatoire de Paris-PSL.

cision. Et c'est là que les surprises commencent : « *Nous pensions que des trous noirs stellaires de cette taille ne pouvaient pas exister, raconte Pasquale Panuzzo. Les modèles établissent qu'ils ne peuvent pas dépasser les 20 masses solaires environ.* » En effet, à la différence des trous noirs supermassifs comme SgrA*, situés au centre des galaxies, dont on ne connaît toujours pas l'origine, un trou noir de ce type est censé naître de l'effondrement d'une étoile massive. On sait néanmoins que durant leur évolution, ces étoiles, dites « progénitrices », expulsent une grande partie de leur matière via des vents stellaires, ce qui normalement devrait limiter la masse maximale finale des

trous noirs issus de leur effondrement. Avec l'équivalent de la masse de 33 soleils, BH3 bat largement le précédent record détenu par Cyg X-1 qui ne pesait « que » 20 masses solaires. Dès lors, comment celui-ci a-t-il pu voir le jour ?

Une explication tiendrait à la composition de l'étoile progénitrice de BH3. Les chercheurs pensent que les étoiles pauvres en métaux, formées bien plus tôt dans l'histoire de l'Univers que les étoiles comme le Soleil, auraient tendance à former des trous noirs bien plus massifs que les étoiles nées plus récemment et enrichies en éléments plus lourds que l'hélium ou l'hydrogène. Or, Gaia BH3 a pour compagnon une étoile elle-même très pauvre en métaux, probablement semblable à celle qui a donné naissance au trou noir. « *Toute une série d'indices mène à cette conclusion, résume Pasquale Panuzzo. Pour la première fois, nous avons une confirmation que ces trous noirs massifs, déjà observés par les ondes gravitationnelles, proviennent d'étoiles pauvres en métaux.* »

Une licorne cosmique ?

Peut-on toutefois exclure totalement l'hypothèse que Gaia BH3 soit en fait le résultat d'une fusion entre deux trous noirs plus petits ? Les observatoires gravitationnels Ligo-Virgo-Karga ont en effet permis de détecter plusieurs événements de ce genre depuis 2015, impliquant des fusions de trous noirs bien plus massifs dans des galaxies bien plus lointaines. « *C'est une possibilité, mais dont la probabilité est faible, reconnaît Pasquale Panuzzo. Nous ne pouvons pas trancher définitivement, mais plusieurs indices indiquent que c'est bien un trou noir formé par l'effondrement d'une seule étoile massive.* » Parmi ces indices, le principal est la présence de ce compagnon très pauvre en éléments plus lourds que l'hélium. Ces étoiles, d'une génération antérieure à notre Soleil, ne représentent qu'environ 1 % des étoiles de notre Voie lactée.

Et comme si cela ne suffisait pas, les mesures de Gaia ont aussi mis en lumière un autre phénomène : ce couple se déplace à contre-sens ! Gaia BH3 et l'étoile qui l'accompagne orbitent dans une direction inverse au courant des étoiles du disque galactique. En fait, le couple appartient à une structure nommée ED-2, récemment découverte par Gaia,

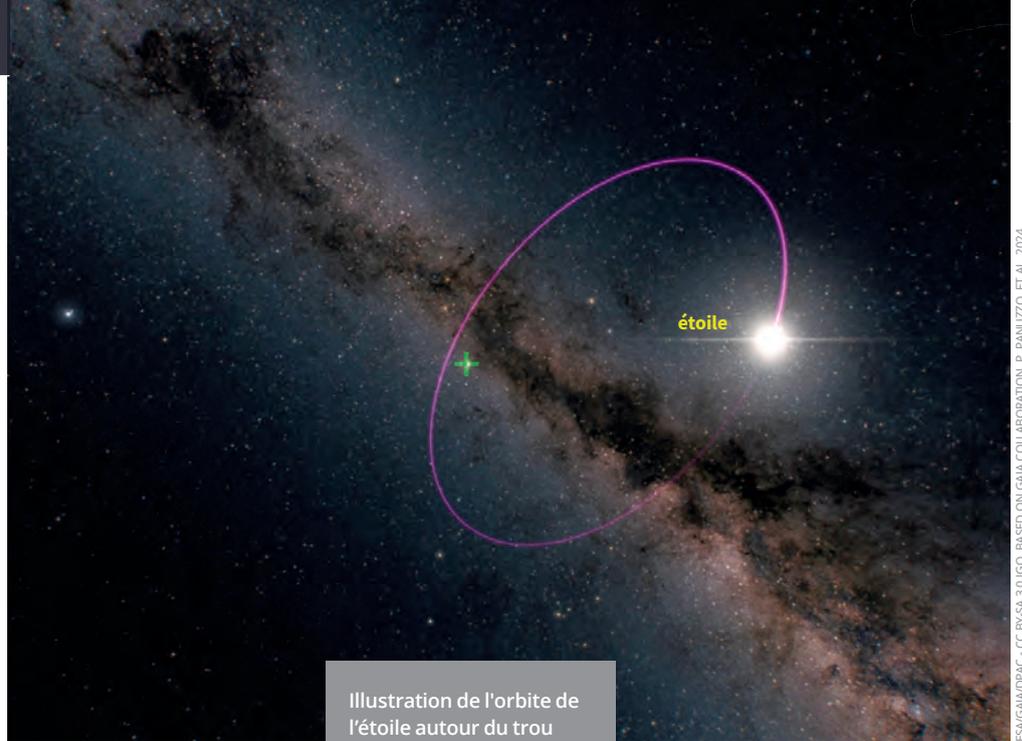
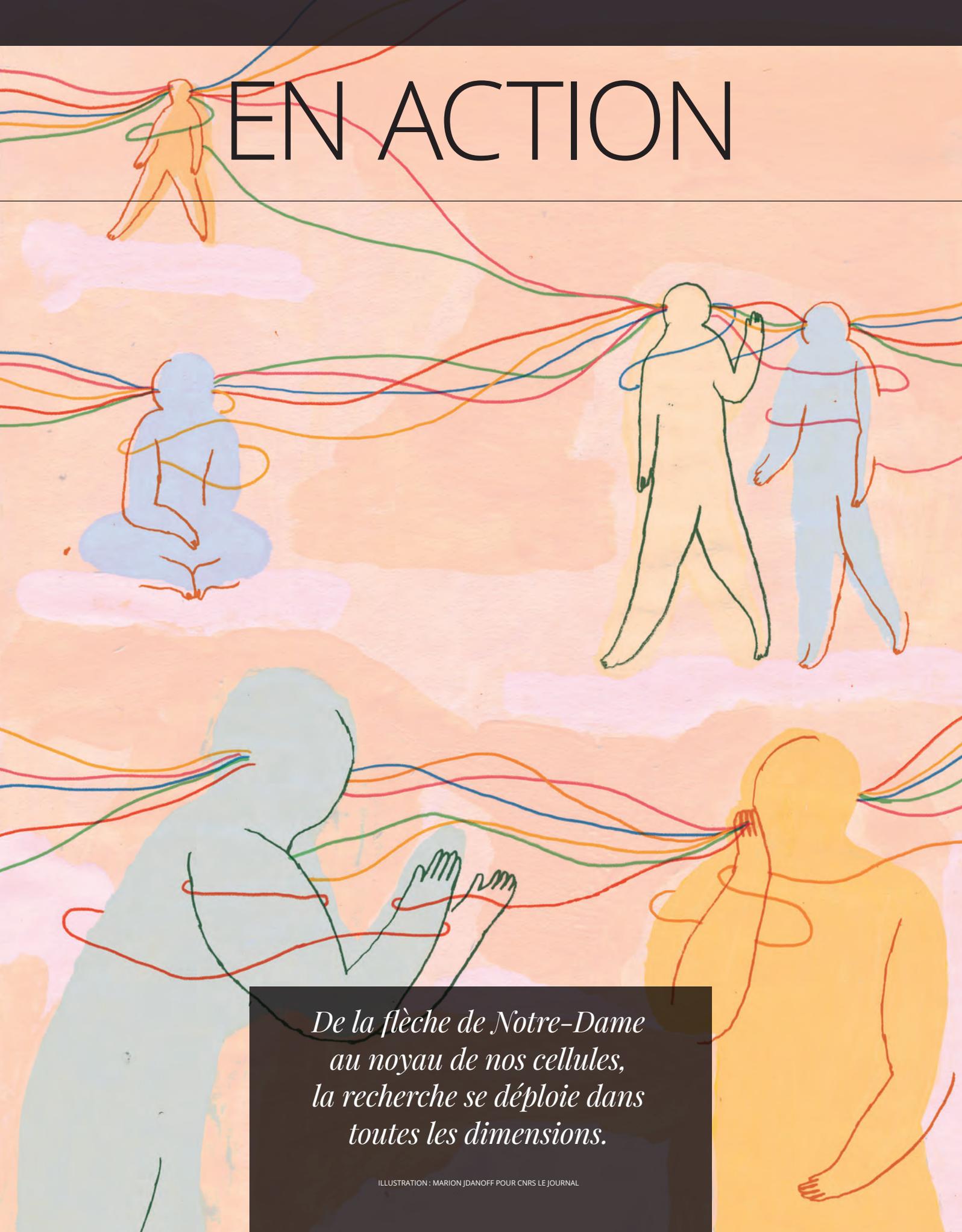


Illustration de l'orbite de l'étoile autour du trou noir BH3 (croix verte).

qui semble issue des restes d'un amas globulaire capturé puis déchiré par notre galaxie. « *C'est véritablement une licorne ! Ça ne ressemble à rien de ce que nous connaissons, assure Pasquale Panuzzo. Nous avons eu de la chance de la trouver.* » Gaia donne ainsi l'occasion d'étudier ces trous noirs si difficiles à trouver dans notre galaxie. « *L'avantage, c'est que ce sont des données solides, affirme Frédéric Arenou. Nous avons voulu les publier rapidement pour que la communauté puisse s'en emparer car nous sommes sûrs de cette orbite !* »

“ Pour la première fois, nous avons une confirmation que ces trous noirs massifs, déjà observés par les ondes gravitationnelles, proviennent d'étoiles pauvres en métaux. ”

Par ailleurs, Gaia BH3 étant relativement proche de nous, ses bouffées ponctuelles d'activité devrait pouvoir être observées directement via les télescopes à rayons X ou à ondes radio. « *L'autre avantage, poursuit Frédéric Arenou, c'est que contrairement aux trous noirs coalescents détectés via les ondes gravitationnelles, nous avons un objet que nous pouvons suivre sur le long terme pour comprendre son origine. C'est une grande chance d'avoir accès à ce trou noir.* » La balle est donc désormais dans le camp des théoriciens, qui vont pouvoir comparer cette découverte à leurs modèles et ainsi mieux comprendre la manière dont se forment des trous noirs stellaires aussi massifs. ▮

An artistic illustration featuring several human silhouettes in various colors (orange, blue, yellow, green) against a light, textured background. Each silhouette is connected to a network of vibrant, multi-colored lines (red, orange, yellow, green, blue, purple) that represent neural pathways or data connections. The lines flow from the heads and some from the hands, creating a sense of dynamic activity and interconnectedness. The overall style is reminiscent of a hand-drawn or painted scientific visualization.

EN ACTION

*De la flèche de Notre-Dame
au noyau de nos cellules,
la recherche se déploie dans
toutes les dimensions.*

NUMÉRIQUE

MATIÈRE

PATRIMOINE À quelques mois de sa réouverture, cinq ans après l'incendie qui l'a ravagée, focus sur neuf projets scientifiques qui ont accompagné la reconstruction et la restauration de la cathédrale.

PAR LAURENCE STENVOT

UNE FLÈCHE À L'IDENTIQUE

La reconstruction à l'identique de la charpente a imposé de recourir, voire redécouvrir des techniques traditionnelles, dont le tracé d'une épure (trait de charpente). Cette technique, très importante pour la reconstruction de la flèche, s'est retrouvée au cœur des discussions entre charpentiers, architectes et ingénieurs des bureaux d'études, mettant en évidence les difficultés et les paradoxes d'une reconstruction à l'identique mais respectueuse des normes (de sécurité par exemple) des sociétés contemporaines.

LA CONQUÊTE DE LA HAUTEUR

Notre-Dame est un monument marquant dans l'architecture gothique (XII^e-XIII^e siècle) par la hauteur de ses voûtes : 32 mètres, soit les plus hautes de son époque ! Après les effondrements liés à l'incendie, les scientifiques ont découvert qu'elles étaient extraordinairement minces : 12 cm. C'est l'un des éléments qui pourraient expliquer des hauteurs si exceptionnelles. Pour s'en assurer, ils ont inventé une méthode pour mesurer, grâce à un géoradar, l'épaisseur des voûtes des autres grandes cathédrales de cette époque.

DES PIGMENTS AU CŒUR DE L'HISTOIRE

L'analyse des polychromies des décors des portails a montré que s'il existe une unité stylistique, les datations de synthèse de certains pigments utilisés sont légèrement décalées. L'explication ? Les sculptures ont peut-être d'abord été installées puis peintes ultérieurement, à des temps différents. Une hypothèse à confirmer, qui donnerait une nouvelle vision de l'organisation du chantier à l'époque médiévale.

D'OÙ VIENT LE PLOMB ?

Des plombs provenant de différentes phases de construction ont été analysés pour établir un référentiel chronologique. Les résultats ont démontré que le recyclage avait un impact relativement limité sur les signatures isotopiques du plomb et que ces dernières traduisent une provenance espagnole, notamment de gisements de Carthagène et de la Sierra Morena, exploités au XIX^e siècle.

LA CONSTRUCTION D'UNE CATHÉDRALE DES SAVOIRS

Les scientifiques ont œuvré à construire un écosystème numérique. Parmi les objectifs : faciliter le transfert des connaissances antérieures, en se concentrant particulièrement sur les données matérielles pour comprendre comment reconstruire à l'identique et faciliter les échanges entre le chantier de restauration et le chantier scientifique, mais également pour cartographier les connaissances pluridisciplinaires réunies autour de la cathédrale.

LA STABILISATION DES VOÛTES

Pour estimer la stabilité des voûtes hautes touchées par l'incendie – dont certaines se sont effondrées – les scientifiques ont utilisé une combinaison de différentes techniques de modélisation mécanique. Cela a permis, avant d'appliquer une solution de confortement, d'en évaluer le rapport bénéfice/risque et d'identifier les améliorations nécessaires pour en maximiser l'efficacité.

Notre-Dame, la recherche en chantiers

UNE CHARPENTE VENUE DE LOIN ?

La structure de la charpente est remarquable pour ses bois relativement fins et élancés. Chaque grande pièce est issue d'un seul tronc de chêne (sessile ou pédonculé). Les chercheurs se sont interrogés sur une possible gestion spécifique pour obtenir ces arbres telle que les rejets de souche, mais aucune preuve tangible n'a été trouvée. De plus, l'étude de l'origine géographique des arbres montre qu'ils proviennent de diverses régions, ce qui suggère une sélection sur mesure.

► Nuage de points 3D de l'extérieur de la cathédrale Notre-Dame de Paris avant incendie, issu des campagnes de relevé lasergrammétrique menées par Andrew Tallon (Vassar College) entre 2006 et 2012.

L'IA POUR ANALYSER LES VITRAUX

D'épaisses croûtes noires ont été retrouvées à la surface des vitraux. Comment se sont-elles formées ? Pour le savoir, les scientifiques ont cherché à reconstituer la chronologie de déposition des particules à l'aide de techniques d'analyse chimique associées à l'intelligence artificielle. Ils ont ainsi pu déterminer l'évolution de l'environnement de la cathédrale depuis le XIX^e siècle, à travers les couches de pollution et de particules fines.

LE SON À TRAVERS LES ÂGES

La restauration de l'orgue de chœur et l'histoire des orgues médiévaux ont pu s'appuyer sur la modélisation de l'acoustique de la cathédrale. Alors que l'orgue de tribune est restauré à l'identique, l'orgue de chœur sera modifié en tenant compte de l'évolution récente de la liturgie. Ces restaurations resémantisent les pôles symboliques qu'ils incarnent dans l'espace sonore de la cathédrale, matérialisant sacralités religieuses et patrimoniales.

LES 9 GROUPES DE TRAVAIL ET LES PROJETS CITÉS : Groupe Emobi, projet « Des charpentiers à l'œuvre ». Groupe Structure, projet « Comportement des voûtes sexpartites de Notre-Dame ». Groupe Pierre, projet « Les voûtes de Notre-Dame et la conquête de la hauteur dans l'architecture gothique en France XII^e-XIII^e ». Groupe Décor monumental, projet « Études des polychromies gothiques – approche des sciences analytiques à l'histoire des techniques artistiques ». Groupe Métal, projet « Comprendre l'approvisionnement en plomb du chantier de Notre-Dame d'hier à aujourd'hui ». Groupe Numérique, projet « La construction d'une cathédrale des savoirs ». Groupe Verre, projet « Analyse de la stratigraphie des dépôts et des peintures présents sur les vitraux de Notre-Dame ». Groupe Acoustique, projet : « Les orgues et la géographie sonore de ND entre 1403 et 2023 ». Groupe Bois, projet ANR Casimodo : "Medieval Climatic optimum and socio-economic development: study of Notre-Dame de Paris wood frame and forestry consequences".



© GRÉGORI PICOUTI/FFH

Les Jeux paralympiques inspirent les recherches sur le handicap

VIVANT



SOCIÉTÉS



SPORT Les parathlètes français ont pu bénéficier de l'appui des scientifiques. Avec un double objectif : améliorer les performances aux JO de Paris, et le quotidien des personnes en situation de handicap.

PAR MAXIME LEROLLE

« En handisport comme en Formule 1, la question est de savoir comment faire redescendre les innovations qu'on a produites pour le haut niveau. » Arnaud Hays sait de quoi il parle.

Cet ancien entraîneur sportif et préparateur physique de diverses équipes de France, désormais ingénieur de recherche à Aix-Marseille Université, collabore depuis quelques années avec la Fédération française de handisport (FFH) pour améliorer les performances des parathlètes français en fauteuil roulant.

Un exemple concret ? « *Initialement créés pour les parathlètes amputés de haut niveau, les manchons siliconés, conçus pour gagner du confort au niveau de l'emboîture et limiter les pertes de prothèse, sont désormais prescrits par la Sécurité sociale pour toute personne amputée* », cite son

confrère Thierry Weissland, maître de conférences à l'université de Bordeaux au Laboratoire de l'intégration du matériau au système¹. Un transfert d'innovation a donc bien eu lieu du terrain sportif vers la société, via les laboratoires de recherche. Il s'est accéléré avec les Jeux olympiques de Paris, notamment à travers le programme Paraperf² (pour Optimisation de la performance paralympique : de l'identification à l'obtention de la médaille), piloté par l'Institut national du sport, de l'expertise et de la performance (Insep) et dans lequel les deux chercheurs sont impliqués.

Optimiser les performances des fauteuils

Présent dans treize des vingt-deux disciplines au programme, le fauteuil roulant figurait parmi les priorités de Paraperf. Arnaud Hays a relevé le défi d'améliorer le matériel utilisé par les parathlètes français en développant quatre innovations pour les sports en parafauteuil : un dérapomètre, qui améliore l'adhérence des pneus au sol, des capteurs de puissance dans les roues, pour mieux suivre l'athlète, une veste, qui facilite la régulation de la température des athlètes tétraplégiques, ou encore un ergomètre, qui mesure la puissance des bras. De son côté,

► Match entre Hyères et Lannion lors de la Coupe de France de basket fauteuil, à Antibes (Alpes-Maritimes), en 2023.

après une vingtaine d'années à travailler entre parasport, recherche et rééducation fonctionnelle, Thierry Weissland a saisi l'occasion de Paraperf pour déterminer les profils physiologiques des parathlètes en fauteuil, tant en fonction des disciplines auxquelles ils concourent que des pathologies dont ils souffrent, et combler ainsi un vide dans le suivi des parasportifs. Pour ce faire, il a mis au point une batterie d'outils de mesure de l'effort exercé sur le fauteuil roulant, en particulier des roues instrumentées et des capteurs inertiels. Des innovations qui pourraient, à terme, se décliner pour le fauteuil de la vie quotidienne : « *En mesurant la quantité d'énergie dépensée selon le relief, la distance ou encore le type de terrain, on pourrait mener des actions de prévention autour de la sédentarité et de la fatigue des personnes à mobilité réduite et, pourquoi pas, leur concevoir des circuits touristiques faciles d'accès sur le plan de l'intensité énergétique* », imagine Thierry Weissland.

Améliorer le confort des prothèses

D'autres disciplines ont fait l'objet de recherches en amont des Jeux, comme le saut en longueur. Fabien Szmytka, professeur à l'École nationale supérieure des techniques avancées, à l'Institut des sciences de la mécanique et applications industrielles³, s'est intéressé à l'interface entre la prothèse – une lame de carbone –, le membre résiduel (ici, la jambe) et la piste. « *De manière empirique, les athlètes rajoutaient des couches à leur semelle au bout de la lame en carbone, raconte Fabien Szmytka. Celles-ci nous posaient un vrai problème scientifique : en choisissant le bon matériau pour cette semelle, pouvait-on mieux amortir le choc et donc réduire les blessures ?* » Au terme d'une thèse qu'il a codirigée, le mécanicien a pu répondre positivement à son interrogation : « *Pour améliorer le matériau des semelles, nous avons testé des nuances à base de polyéthylène et de polyuréthane thermoplastique (deux types de polymères, Ndlr). En fonction de leur dureté et de la géométrie proposée, nous sommes désormais capables de filtrer certaines ondes de choc et de préserver ainsi les membres résiduels des athlètes* ».

Au-delà du stade, l'optimisation du matériel handisport pourrait améliorer le confort des personnes amputées : « *Cette difficulté, exagérée pour les athlètes, vaut aussi pour des personnes handicapées dans leur quotidien, souligne Fabien Szmytka. Il existe un taux non négligeable de personnes qui renoncent à porter une prothèse en raison de difficultés d'adaptation et de douleurs à la jonction entre la prothèse et leur membre résiduel* ».

Mieux (re)connaître les parathlètes

Plutôt que de s'intéresser aux ressorts de la performance stricto sensu, d'autres recherches ont privilégié la caractérisation des parasportifs, dont la méconnaissance peut engendrer des inégalités de traitement vis-à-vis des spor-

► Modélisation du profil force-vitesse en mouvement cyclique d'un joueur de rugby fauteuil, grâce à un ergomètre instrumenté qui mesure la puissance des bras, dans le cadre du projet Paraperf.



tifs valides. Mai-Anh Ngo, ingénieure de recherche au sein du Groupe de recherche en droit, économie et gestion⁴ et ancienne nageuse handisport, s'est penchée sur des « *acteurs inconnus du monde juridique : les guides, pilotes, assistants et loaders, c'est-à-dire les sportifs valides qui aident les sportifs en situation de handicap dans la pratique de leurs performances* », à l'instar des binômes de coureurs de fond voyant/non-voyant.

À la différence des parathlètes, leurs partenaires valides ne bénéficient pas systématiquement d'une inscription sur la liste des sportifs français de haut niveau. Les recherches de Mai-Anh Ngo ont de fait offert à la FFH « *un outil objectif, stable, fixé sur des critères, qui sécurise le binôme sportif* » qui pourrait déboucher sur une modification du Code du sport et, comme en rêve l'ancienne nageuse, mettre un terme à l'inégal traitement entre sportifs valides et parasportifs : « *Il existe une aspiration à ne pas tenir compte du handicap dans la performance, mais il faut pourtant prendre en considération les contraintes qui s'appliquent aux parasportifs et leur éviter ainsi des contre-performances* ».

Si aujourd'hui tous les regards convergent vers Paris 2024, ces collaborations entre laboratoires de recherche et fédérations sportives en appellent déjà d'autres. Selon Arnaud Hays, « *la recherche s'effectuant sur le temps long et l'entraînement sportif sur un temps très court, tous les projets développés en 2024 seront encore plus rentables aux JO de 2028 à Los Angeles* ». Sans oublier que ces recherches ont aussi pour objectif de mettre les handicaps en lumière, en promouvant l'inclusion sociale par le sport. C'est aussi le souhait de Mai-Anh Ngo, que « *Paraperf permette de faire évoluer la prise en compte du handicap et qu'il soit le début de quelque chose d'autre, et pas seulement le final du feu d'artifice que seront les Jeux de Paris 2024* ». ||



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

1. Unité CNRS/Bordeaux INP/Université de Bordeaux. 2. Paraperf réunit le plus important consortium scientifique français autour du parasport : 13 laboratoires de recherche et 38 scientifiques bénéficient d'un budget de plus de 2 millions d'euros au titre de France 2030 dans le cadre du Plan prioritaire de recherche « Sport de très haute performance ». 3. Unité CNRS/CEA/EDF/Ensta Paris. 4. Unité CNRS/Université Côte d'Azur.

Mettre les acouphènes en sourdine

© ANDY ILMBERGER / STOCK.ADOBE.COM

Bourdonnements, sifflements, grincements, sonneries, cliquetis, vrombissements... Si selon le baromètre « Acouphènes 2024¹ » 23 millions de Françaises et de Français de plus de 15 ans ont déjà fait l'expérience de l'acouphène une fois dans leur vie, ils seraient entre 4 et 7 millions à l'éprouver de manière permanente. Parmi eux, 30 % souffrent d'une gêne importante à très importante qui impacte leur vie personnelle, familiale, sociale ou professionnelle. En effet, selon l'étude PESA² sur le coût des acouphènes en France entre 2021 et 2022, 16 % des personnes ont eu au moins un jour d'arrêt de travail à cause de leurs acouphènes et 11,4 % ont changé d'emploi ou de poste de travail.

Si l'acouphène est un fardeau individuel aux conséquences psychologiques souvent lourdes et allant jusqu'à des formes sévères de dépression, il est aussi un fardeau social et économique. Ainsi, pour la Sécurité sociale, le coût total moyen par patient concerné et par an s'élève à 296,75 €, avec un reste à charge moyen par patient et par an évalué à 1 079,85 €. Handicaps invisibles longtemps négligés sinon déniés, les acouphènes sont aujourd'hui

VIVANT 

MÉDECINE Champ d'investigation récent, la recherche sur les acouphènes permet de mieux appréhender les effets et les causes de ce symptôme qui concerne près de 8 millions de personnes en France.

PAR LAURE DASINIERES

l'objet de recherches visant à mieux les comprendre et les caractériser pour, *in fine*, offrir une meilleure prise en charge et une meilleure reconnaissance aux personnes qui en souffrent.

Une nouvelle définition des acouphènes

Mieux comprendre, c'est d'abord mieux expliquer et se méfier des définitions incomplètes. Il était d'usage de définir les acouphènes comme des perceptions auditives en l'absence de stimulation sonore dans l'environnement (en d'autres termes comme des perceptions fantômes). Or des médecins et chercheurs, dont Arnaud Norena, responsable de l'équipe Dynamique neuronale et audition

au Laboratoire de neurosciences cognitives³, en ont proposé une nouvelle définition⁴ : « *L'acouphène est une sensation auditive sans stimulation sonore extérieure ni signification, mais identifiable par ses caractères sensoriels : localisation, intensité, fréquence et timbre. Il traduit un dysfonctionnement du système auditif et/ou d'autres structures pouvant interférer avec lui. Sous l'effet de processus cognitifs ou émotionnels, l'acouphène peut être vécu comme une expérience désagréable pouvant impacter la qualité de vie. La prise en charge peut faire appel à des compétences pluridisciplinaires.* » Ce que cette définition pointe en premier lieu, et ce de manière originale, c'est que l'on ne saurait pleinement caractériser l'acouphène sans prendre en compte ses effets sur la personne qui l'expérimente, tant sur le plan sensoriel que cognitif ou émotionnel. Et cette expérience varie beaucoup d'un individu à l'autre.

Le professeur Alain Londero, chirurgien au service d'otorhinolaryngologie (ORL) et de chirurgie cervico-faciale de l'Hôpital européen Georges Pompidou AP-HP, distingue le fait d'avoir un acouphène et le fait d'être invalidé par cet acouphène : « *L'acouphène ne gêne pas forcément la personne qui en est atteinte et la présence d'une intolérance ou non pose de vraies questions. Notamment, quels sont les facteurs qui font que certaines personnes sont impactées par leurs acouphènes alors que d'autres ne le sont pas ?* ».

Acouphènes objectifs et subjectifs

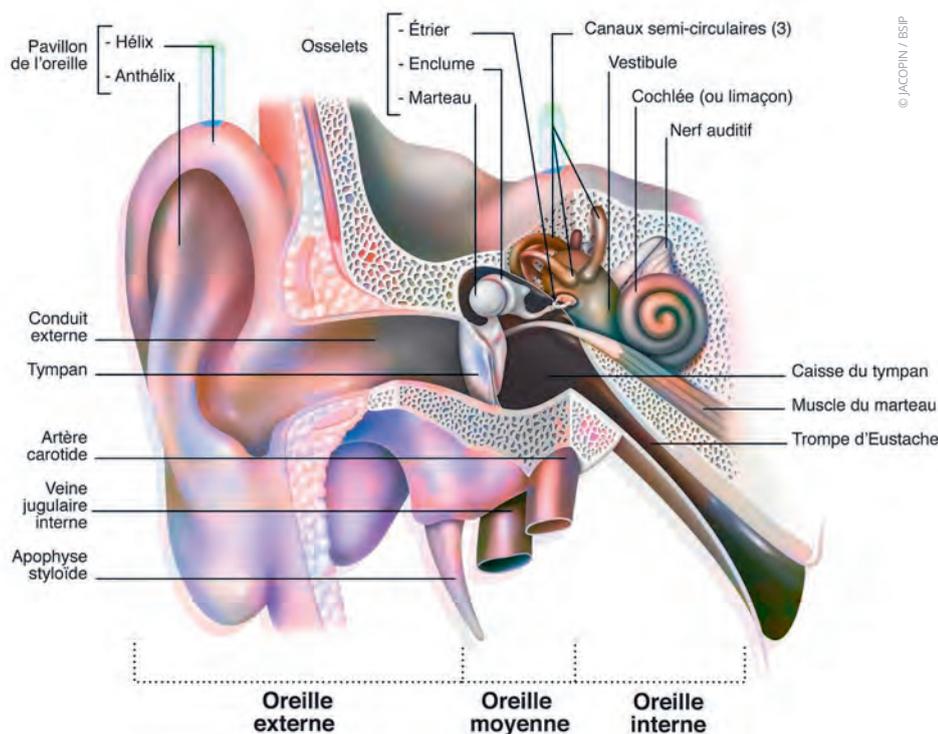
« *Nous sommes tous traversés par des sensations, comme des douleurs légères ou modérées, ou des acouphènes, qui sont autant de "bruits de fond",* commente Arnaud Norena. La question est : *Comment chacun expérimente ce "bruit de fond" ? Cette sensation, relativement faible en intensité subjective, pose la question de pourquoi elle peut être si dévastatrice pour les sujets. Quand on travaille sur l'impact clinique qu'a l'acouphène sur la personne, on rentre dans un domaine qui ne relève plus uniquement des neurosciences (qui s'intéressent essentiellement au message neuronal qui produit cette sensation) mais aussi de la psychologie, sinon de la philosophie.* »

Revenons sur notre définition. Celle-ci dit aussi la diversité des acouphènes et de leurs causes : « *Il existe deux grands types d'acouphènes, objectifs et subjectifs,* précise Arnaud Norena. *Il peut en effet y avoir une source acoustique dans le corps : on parle alors d'acouphène objectif, notamment lorsque les vaisseaux proches de la cochlée génèrent un son, des vibrations qui sont captées par la cochlée*

comme n'importe quel son. Ce type d'acouphènes est relativement rare, il concerne entre 5 et 10 % des cas. » Alain Londero signale, lui, que ces acouphènes, parfois dits « pulsatiles », sont « *curables par des traitements neurovasculaires (embolisations, stents) ou chirurgicaux* ». Le deuxième grand type regroupe les acouphènes dits « subjectifs ». « *Dans ce cas, il n'y a pas de source sonore,* explique Arnaud Norena. *La sensation sonore est soutenue par un signal neuronal. C'est le système auditif qui génère lui-même un "bruit neuronal", c'est-à-dire une activité neuronale spontanée (non évoquée par un son) qui est à l'origine de cette sensation.* » Dans plus de 50 % des cas, l'acouphène est lié à une perte auditive et donc à une lésion cochléaire⁵.

De très nombreuses pathologies, atteignant différents niveaux du système nerveux, peuvent conduire à une perte auditive et donc à un acouphène subjectif⁶. Au niveau de l'oreille externe : bouchon de cérumen, corps étranger, etc. Au niveau de l'oreille moyenne : perforation du tympan, otite sérumuqueuse (présence d'un épanchement sans symptôme d'inflammation aiguë), cholestéatome (tumeur), otospongiose (maladie d'origine génétique qui atteint le tissu osseux) et lésions ossiculaires (atteinte des osselets). Au niveau de l'oreille interne :

▲ Anatomie de l'oreille interne.



© JACOPIN/ESP

1. <https://tinyurl.com/52m5vvk5> 2. <https://tinyurl.com/matmxhu8> 3. Unité CNRS/Aix-Marseille Université. 4. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2021.01.029> 5. Notons qu'une étude de 2023 suggère que ce pourcentage pourrait être bien plus élevé car même si aucun déficit n'est retrouvé à l'audiogramme, il peut exister des lésions indétectables des fibres nerveuses auditives : <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46741-5> 6. <https://www.larevueudupraticien.fr/article/acouphenes-subjectifs>

vieillesse, traumatismes (mécanique, pressional, sonore, émotionnel), fistule, labyrinthite (inflammation), substances ototoxiques (qui peuvent rendre sourd). Au niveau du nerf auditif : tumeurs, boucle vasculaire, neuropathie, maladie de Lyme. Enfin, au niveau central : traumatisme crânien, maladie neurodégénérative, problèmes de tension intracrânienne.

À cette perte auditive, le cerveau répond par un acouphène qui est en quelque sorte une sensation « aberrante », un peu comme une illusion. Arnaud Norena en détaille le mécanisme : « *Le système auditif est un système "bruyant", au moins au niveau périphérique, c'est-à-dire que l'activité spontanée y est relativement importante. Ce "bruit" est lié à l'extrême sensibilité de ce système.* » Il poursuit : « *Une lésion cochléaire induit une réduction de ce bruit au niveau périphérique dès que les cellules ciliées sont atteintes. Il y a alors moins d'activité à l'état spontané, dans le silence. Ce qui est paradoxal : il y a moins de bruit et pour autant, on entend quelque chose !* »

L'explication : en réponse à cette réduction des entrées sensorielles, le cerveau cherche à s'adapter. Cette adaptation de la sensibilité se fait au prix de l'augmentation de l'activité spontanée. « *C'est cette augmentation d'activité spontanée dans les centres auditifs qui serait à l'origine de l'acouphène, effet collatéral d'un mécanisme adaptatif visant à conserver une activité neuronale moyenne constante. Ainsi,*

“ Dans plus de 50 % des cas, l'acouphène est lié à une perte auditive et donc à une lésion cochléaire. ”

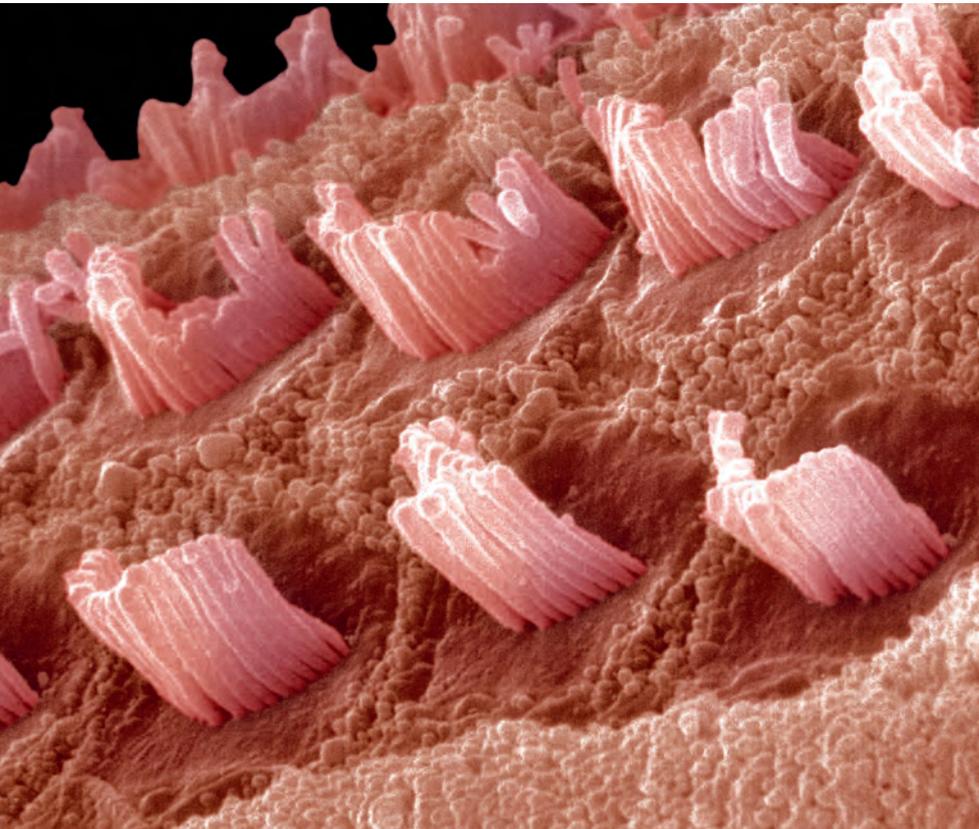
l'acouphène peut être pensé comme le résultat d'un mécanisme compensatoire », conclut le chercheur. L'acouphène serait ainsi une sorte de bug cérébral résultant d'une tentative d'adaptation. Aux mécanismes qui conditionnent l'apparition de l'acouphène s'ajoutent des facteurs qui peuvent favoriser sa survenue (il n'est pas forcément permanent) et le renforcement de sa perception, « *stress, sensation de peur et d'hypervigilance, fatigue, troubles du sommeil, exposition au bruit, etc.* », détaille Alain Londero.

Des traitements avant tout palliatifs

Récemment, une autre cause a été mise en évidence : « *Il existe aussi des acouphènes d'origine somato-sensorielle,* dévoile Arnaud Norena. *Par exemple, lorsqu'une personne serre les mâchoires, ou tourne la tête, l'acouphène peut augmenter en intensité. Le système auditif intègre alors des informations sensorielles qui ne sont pas auditives mais intéro- ou proprioceptives (provenant des muscles, par exemple). Ainsi, ces entrées non auditives, éventuellement augmentées du fait de la plasticité liée à une perte auditive, peuvent être "détournées" vers les voies auditives et être interprétées comme des sensations auditives.* »

Ce mécanisme peut notamment expliquer pourquoi certaines personnes souffrant de bruxisme (grincement involontaire des dents) ont des acouphènes. Si ces acouphènes d'origine somato-sensorielle peuvent être soulagés par des myorelaxants, de la toxine botulique, voire de la chirurgie, la majorité des personnes touchées ne peut être soulagée

© DR FRED HOSSLER / BSIP



► Cellules ciliées dans la cochlée. Les poils sont entourés de liquide endolymphique. Lorsque le son pénètre dans l'oreille, la formation d'ondes dans l'endolymphe provoque le déplacement de ces poils qui transmettent le signal aux fibres nerveuses auditives.

En bref

par traitement spécifique. « *Il n'existe pas, aujourd'hui, de technique thérapeutique, entre autres médicamenteuse, pour éradiquer les acouphènes subjectifs*, regrette Alain Londero. *Mais toutes sortes de thérapeutiques palliatives traitent l'intolérance à l'acouphène.* »

« *Il est possible d'utiliser des médicaments destinés à réduire l'anxiété, la dépression ou les troubles du sommeil, ou qui visent à traiter des pathologies causales comme la maladie de Ménière*, détaille le chirurgien. *Des thérapies sonores sont également proposées. Elles consistent soit à compenser la perte auditive, soit à utiliser des méthodes d'enrichissement sonore pour masquer l'acouphène. C'est dans ce cadre qu'il est parfois conseillé au patient de s'endormir avec un bruiteur. Il est aussi possible d'avoir recours à des techniques de neuromodulation par stimulation magnétique, électrique⁷, avec des résultats inconstants.* »

Alain Londero expose enfin : « *Ce sont les prises en charge dérivées des psychothérapies comportementales et cognitives (TCC) qui ont reçu la meilleure validation pour permettre aux patients de mieux tolérer l'acouphène.* » C'est dans ce cadre qu'une méthode d'immersion en réalité virtuelle a également été développée dans son unité : « *Elle permet au patient d'interagir avec un son qui ressemble à son acouphène afin d'améliorer la tolérance.* »

Vers des traitements médicamenteux ?

Si Alain Londero compte beaucoup sur l'amélioration des prothèses auditives, Arnaud Norena indique pour sa part une piste de traitement médicamenteuse : « *En étudiant la plasticité du système auditif chez l'animal, nous nous sommes intéressés au neurotransmetteur inhibiteur appelé "GABA" et nous nous sommes aperçus que son activité inhibitrice était modulée par un autre type de molécules appelées "KCC2". Or, nous avons montré que les KCC2 étaient sous régulées après une perte auditive. Ce résultat est très intéressant car il suggère que le GABA, un neurotransmetteur habituellement inhibiteur, peut devenir moins inhibiteur, voire même excitateur. Ce résultat ouvre des pistes pharmacologiques pour restaurer le niveau d'inhibition à travers une augmentation de l'activité des KCC2.* »

Même si, pour l'heure, les traitements de l'acouphène ne sont pas pleinement satisfaisants, Alain Londero invite les personnes concernées à consulter, « *d'abord parce que l'étiologie est parfois curable, ensuite pour faire de la prévention secondaire et éviter ainsi que l'acouphène ne s'installe et s'intensifie.* » Et le chirurgien de conclure : « *La recherche sur les acouphènes est une science relativement récente comparée, par exemple, à l'algologie (qui prend charge les douleurs chroniques, Ndlr). Il faut aujourd'hui qu'elle se structure.* » **II**

7. Par exemple, un casque émet des sons qui permettent de réduire la perception des acouphènes, et en même temps, un dispositif délivre des petites impulsions électriques indolores sur la langue ou sur les muscles de la mâchoire.

LE CNRS DANS LE TOP 100 DE L'INNOVATION MONDIALE

Le CNRS figure parmi les 100 premiers du classement mondial des innovateurs 2024 établi par Clarivate, occupant la 90^e position. Il est l'un des rares organismes de recherche à être distingué dans ce classement international. Son PDG Antoine Petit a reçu un prix des mains de Jonathan Gear, PDG de Clarivate, lors du salon Vivatech le 23 mai, à Paris.

LE COMETS FÊTE SES 30 ANS

Le 13 mai dernier, le comité d'éthique du CNRS a célébré ses 30 ans lors d'une conférence spéciale organisée au siège de l'organisme. Plusieurs thématiques ont été abordées autour de la responsabilité des scientifiques et l'engagement public, notamment face à la crise écologique, et la création d'un réseau européen d'éthique de la recherche a été annoncée.

UN PREMIER IRC AU CANADA

À l'occasion de la 21^e rencontre alternée entre les Premiers ministres français et québécois, le 12 avril dernier, la création du nouveau centre de recherche international (IRC) « Innovation pour une planète durable », entre le CNRS et l'université québécoise de Sherbrooke, a été officiellement annoncée. Ce sixième IRC sera le premier au Canada et le premier entièrement dédié à l'innovation.

LE CNRS, PRIX EUROPÉEN DE L'ÉGALITÉ

L'organisme a reçu en mai le prix européen de l'égalité entre les hommes et les femmes, dans la catégorie « avancée », pour son engagement depuis plus de vingt ans en faveur de l'égalité des sexes. Cette distinction, dotée de 100 000 € et remise par Iliana Ivanova, commissaire européenne à l'Innovation, la Recherche, la Culture, l'Éducation et la Jeunesse, souligne les résultats d'actions significatives mises en place par le CNRS.

SECONDE PROMOTION DES FELLOWS-AMBASSADEURS

Le 8 mars dernier, huit nouveaux chercheurs mondialement reconnus ont été nommés fellows-ambassadeurs du CNRS. Ancré dans la tradition des éminents "visiting professors" au sein du milieu académique, ce dispositif inédit pour l'organisme vise aussi bien à démontrer son attractivité qu'à dynamiser la recherche française.



Un pan de voile se lève sur le quotidien au Néolithique

© RÉMI MARTINEAU

SOCIÉTÉS

ARCHÉOLOGIE La découverte exceptionnelle d'un habitat daté de 3 000 ans avant notre ère, en bordure du bassin parisien, va permettre d'éclairer le fonctionnement encore méconnu des sociétés néolithiques.

PAR FABIEN TRÉCOURT

Comment vivaient nos ancêtres 3 000 ans avant notre ère, sur le territoire de l'actuel nord de la France ? Si les nombreux monuments funéraires déjà mis au jour pour cette période avaient livré des objets, ils ne donnaient qu'une vision parcellaire du quotidien des sociétés du Néolithique récent. « *Le mobilier funéraire que l'on trouve dans les tombes collectives de cette période induit un biais de compréhension* », explique l'archéologue Rémi Martineau, chercheur CNRS au laboratoire Archéologie, terre, histoire, société¹.

Les sites d'habitation manquaient pour compléter le tableau. Jusqu'à la découverte par l'archéologue et son équipe, durant l'été 2023, des premières traces d'habitations néolithiques dans la région des marais de Saint-Gond, entre Reims et Troyes.

Une « *découverte majeure, que j'attendais depuis plus de dix ans que je fouille dans cette région* », s'enthousiasme le chercheur.

Toutes premières traces d'un habitat

Un sondage archéologique, mené sur la commune de Val-des-Marais à grand renfort de pelle mécanique, a permis d'identifier ce que les archéologues désespéraient de trouver : les traces d'un d'habitat, assorti qui plus est d'un système défensif. « *À l'intérieur d'une enceinte palissadée, on a*

identifié un premier bâtiment, un puits et deux grandes dépressions naturelles utilisées comme dépotoirs, le tout daté entre 3 600 et 2 900 ans avant notre ère, décrit Rémi Martineau. *Le site, d'une surface de 5 000 m², pourrait s'étendre sur plusieurs hectares.* »

Le bâtiment identifié semble être une maison d'une quinzaine de mètres de long sur trois de large à peine, terminée par une abside à l'une de ses extrémités. « *C'est un type d'architecture qu'on va beaucoup retrouver dans la période suivante, au Néolithique final* », raconte Rémi Martineau. Les

► Vue de l'enceinte palissadée (au centre) à l'intérieur de laquelle un premier bâtiment, un puits et deux fosses dépotoirs ont été identifiés par les archéologues.

fosses dépotoirs sont collectives – une surprise, qui donne une première indication sur le fonctionnement du village. Elles regorgent d'objets de la vie quotidienne : des céramiques qui seront utiles pour dater plus précisément le site, des meules pour broyer le grain, ou encore des éléments de parure, probablement cousus sur les vêtements. « On a retrouvé un bouton en nacre d'Unio (une moule d'eau douce) jamais porté, une pièce de musée unique », témoigne Rémi Martineau, qui s'attend à mettre au jour « encore beaucoup de mobilier archéologique, des bois de cerf, des outils en os et en silex, du matériel de mouture... »

Un site fouillé depuis 150 ans

Dans les années 1870, le baron Joseph de Baye, passionné d'archéologie, menait déjà des fouilles en amateur dans la région des marais de Saint-Gond. La découverte d'importantes quantités de silex taillés le convainc que des populations préhistoriques ont habité là. Sa fortune lui permet de lancer d'ambitieuses recherches et de mettre au jour de nombreux hypogées : des sépultures collectives souterraines creusées dans la craie, l'équivalent pour ce territoire calcaire des dolmens édifiés ailleurs dans l'Hexagone. Il ne trouve malheureusement aucune trace des habitats recherchés.

Il faut attendre 1924 pour que l'archéologue champenois André Brisson repère par sondage manuel le site prometteur de Val-des-Marais, le « Pré à Vaches », dans la partie orientale des marais, où les fouilles sont depuis concentrées. Au total, depuis la fin du XIX^e siècle, 135 hypogées, 15 minières servant à l'extraction souterraine du silex, 5 allées

couvertes mégalithiques, 8 polissoirs pour polir les haches en silex, ainsi que des champs cultivés, ont été mis au jour dans cette région. « L'habitat était la pièce manquante du puzzle, raconte Rémi Martineau. Grâce à cette découverte exceptionnelle, on va pouvoir mieux comprendre comme s'organisait cette société, sur le plan sociétal comme territorial. »

Est-ce que les habitats se situaient tous à côté des minières de silex, ou bien existait-il des habitats qui relayaient les productions pour leur diffusion ? Dans un autre registre, pourquoi les minières sont-elles toujours situées à côté des hypogées ? « Il existe des modèles théoriques d'organisation territoriale, mais ce site va nous permettre pour la première fois de les confronter à des données archéologiques de terrain », se réjouit le chercheur.

Une méthode de travail originale

C'est l'aboutissement d'un projet et d'une méthode de travail originale. « Une difficulté des recherches sur la Préhistoire est que les chercheurs travaillent à partir de peu de données sur des aires immenses, et des périodes de temps tout aussi vastes. De plus, chacun est spécialiste d'un domaine restreint – les hypogées par exemple, ou bien les pratiques agricoles, explique l'archéologue. J'ai décidé de prendre le contre-pied de l'hyper spécialisation en me focalisant sur une région restreinte qui comporte des centaines de sites archéologiques, et en élargissant nos recherches pour tenter de comprendre le fonctionnement des sociétés néolithiques dans leur ensemble. »

Un pari qui porte aujourd'hui ses fruits : avec ses minières, ses tombes, ses vestiges agricoles et désormais son habitat, les sites des marais de Saint-Gond n'ont pas d'équivalent en Europe occidentale pour la période du Néolithique récent. Reste maintenant à s'atteler à la fouille minutieuse des milliers de mètres carrés décapés l'été dernier. Pour Rémi Martineau, « l'enjeu reste de comprendre comment vivaient nos ancêtres il y a plus de 5 000 ans ». II

En bref

UNE NOUVELLE MAISON POUR LE CNRS

Lors de la visite du président Emmanuel Macron à São Paulo, au Brésil, le 27 mars dernier, la Maison du CNRS a été inaugurée au sein du campus de l'université pauliste. L'espace de 400 m², consacré aux programmes du nouveau centre international de recherche, accueillera le Bureau du CNRS en Amérique du Sud à partir de septembre.

DE NOUVEAUX PEPR EN 2024

Quatre programmes nationaux de recherche, pilotés ou copilotés par le CNRS, ont été officiellement lancés depuis le mois de janvier : Spintronique (SPIN) avec le CEA, Robotique organique (O2R) avec le CEA et Inria, Intelligence artificielle (IA) avec le CEA et Inria, et Solutions fondées sur la Nature (SOLU-BIOD) avec Inrae.

COLLABORATION AVEC L'AFRIQUE

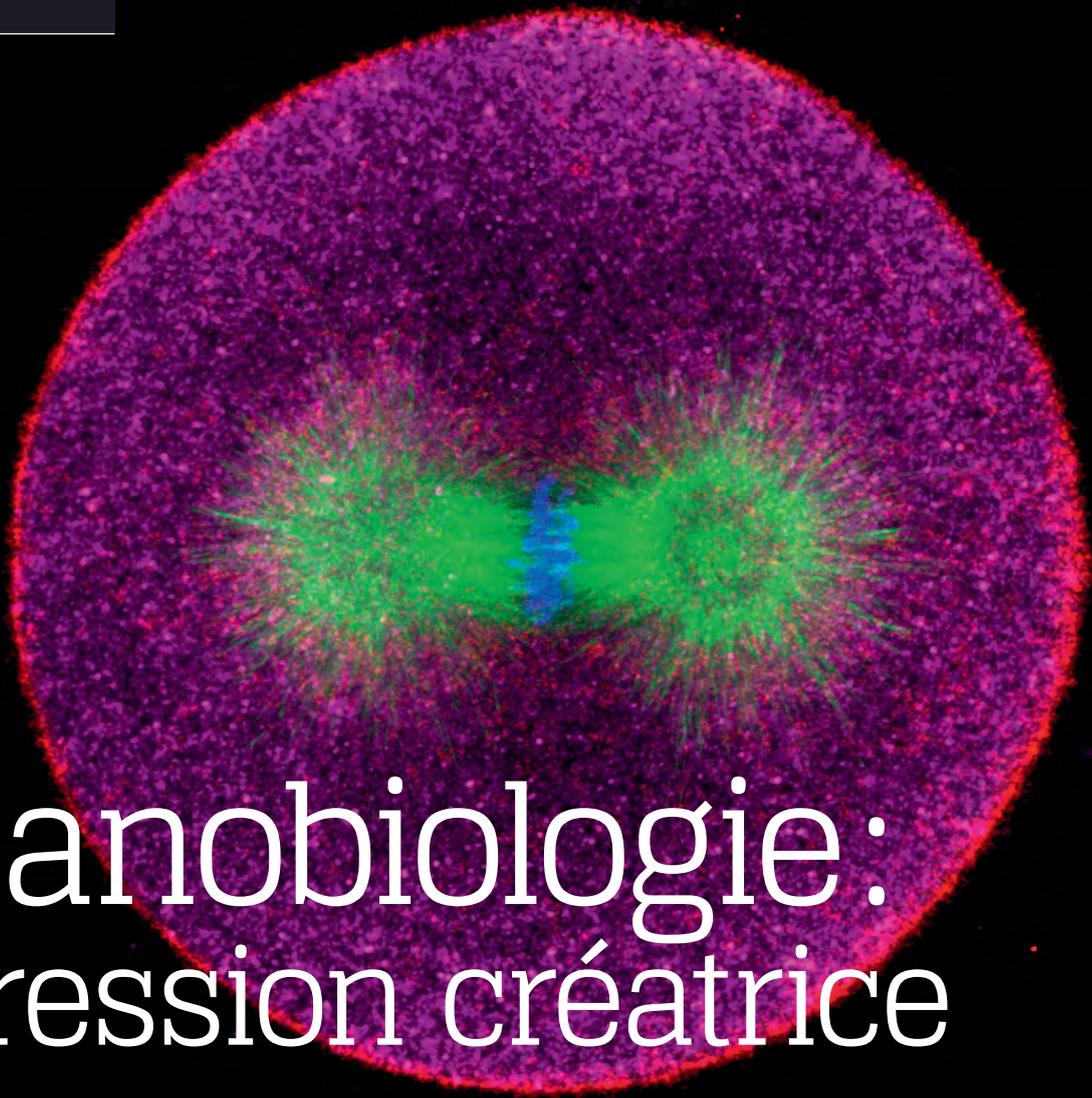
Dans le cadre du plan de coopération du CNRS avec l'Afrique, 8 nouveaux projets « Joint Research Programmes » ont été sélectionnés en mars, venant s'ajouter aux 32 projets (Joint research programmes, Residential Research Schools et Visiting Fellowship) déjà sélectionnés en 2023 à l'occasion d'une 1^{ère} campagne d'appels. De nouveaux appels sont prévus pour 2024.

UNE FEUILLE DE ROUTE POUR LA SANTÉ

Le CNRS affirme son engagement pour la santé publique en publiant une feuille de route Santé. Mobilisant les dix instituts du CNRS, cette dernière se structure autour de deux défis majeurs : la compréhension des déterminants de santé (« bonne » ou « mauvaise ») et le développement de nouvelles approches susceptibles de transformer le parcours de soins.

ERC ADVANCED GRANT 2023

Le 11 avril, le Conseil européen de la recherche (ERC) a annoncé les résultats de l'appel "ERC Advanced Grant" 2023 qui vise des chercheurs confirmés. Le CNRS est l'institution hôte pour 15 bourses.



© JING XIE / JIM

Mécanobiologie : la pression créatrice

VIVANT

Après une coupure ou une égratignure, l'intégrité de la peau est rompue et notre organisme doit mettre en branle toute une batterie de processus pour amorcer la cicatrisation. Pour ce faire, des cellules doivent migrer, se faufler, se toucher, proliférer, jusqu'à combler les endroits où la peau fait défaut. Ces mouvements cellulaires impliquent l'intervention de processus mécaniques essentiels. Restés un temps dans l'ombre des millions de réactions chimiques qui font tourner la grande machinerie de notre organisme, ces phénomènes mécaniques jouent pourtant un rôle essentiel dans le monde du vivant. Leur étude, la mécanobiologie, bénéficie aujourd'hui de nombreuses avancées technologiques, notamment en microscopie.

« Quand les chercheurs ont commencé à faire de l'imagerie cellulaire et de l'embryologie au début du XX^e siècle, ils pensaient déjà que la géométrie et la mécanique jouaient un rôle important dans la physiologie, la division et la migration des cellules, explique Nicolas Minc, directeur de recherche au CNRS, à l'Institut Jacques Monod¹. Mais avec la découverte de l'ADN en 1953 et la popularisation

BIOLOGIE Développement d'un embryon, métastases... de nombreux phénomènes cellulaires sont guidés par des forces mécaniques. Ces dernières font l'objet d'intenses recherches pour comprendre comment elles se traduisent en processus biologiques. En ligne de mire, de nouvelles pistes pour traiter des cancers ou des fibroses.

PAR KHEIRA BETTAYEB

des approches génétiques, ces idées ont été mises de côté pendant plusieurs décennies. Il faudra attendre la fin des années 1990, et de multiples avancées dans le domaine de la microscopie, pour que les signaux mécaniques perçus par les cellules soient à nouveau pris en compte. »

En effet, toujours plus précis, les microscopes ont évolué pour désormais « voir » au sein d'un tissu sur plusieurs micromètres d'épaisseur. Certains, comme les microscopes à force atomique (AFM), peuvent même mesurer, grâce à des sondes, la rigidité de la membrane d'une cellule ou de l'un de ses constituants. La microscopie des forces de traction (TFM) évalue quant à elle

► Première division d'un ovocyte d'oursin après fécondation, vue en immunofluorescence. Au centre, l'ADN (bleu) et le fuseau mitotique (vert).

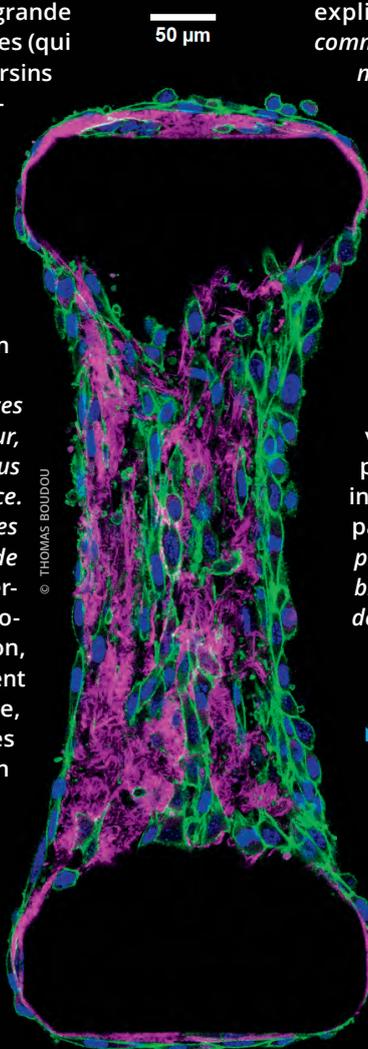
les forces qu'exerce une cellule, lorsqu'elle se déplace, sur son environnement immédiat. Tous ces outils ont permis d'étudier les mouvements et les forces jusqu'à l'intérieur des cellules, révélant que ces dernières parviennent, contre toute attente, à détecter des signaux mécaniques, mais aussi à en émettre. C'est donc tout un pan du fonctionnement du vivant qui reste à explorer.

De la division à la migration

Depuis une dizaine d'années, Nicolas Minc étudie l'impact des forces mécaniques sur la géométrie et la division des cellules embryonnaires chez l'oursin, un animal qui présente l'avantage de produire des gamètes (les cellules reproductrices mâles ou femelles) en grande quantité. Comme toutes les cellules eucaryotes (qui possèdent un noyau), celles des embryons d'oursins possèdent de nombreuses fibres, les microtubules, qui s'assemblent en un réseau en forme de fuseau : le fuseau mitotique. C'est grâce à la mise en place de ce réseau que le matériel génétique est réparti équitablement entre cellule mère et cellule fille. Nicolas Minc et son équipe ont développé un système original où ils attachent de minuscules billes magnétiques aux fuseaux mitotiques afin de contrôler leur position dans les cellules et de mesurer les forces en jeu.

« Nous savions que les fibres exerçaient des forces au sein de la cellule, mais sans connaître leur valeur, explique Nicolas Minc. Grâce à notre invention, nous avons pu pour la première fois mesurer cette force. Ces chiffres ont ensuite servi à construire des modèles de génération de forces à l'échelle de centaines de milliers de microtubules. » Ce système breveté permet en effet différentes explorations en mécanobiologie, comme celle de la mécanotransduction, le phénomène selon lequel les cellules, notamment grâce à des récepteurs présents à leur surface, détectent les forces et contraintes mécaniques extérieures, pour éventuellement les traduire en signaux biochimiques et génétiques. Ces forces peuvent aussi bien provenir de l'environnement que des cellules à proximité.

« Cela permet de transmettre des messages de manière linéaire, détaille le chercheur. Ces cascades de signaux guident par exemple la migration cellulaire et d'autres comportements collectifs. » Les scientifiques de l'Institut Jacques Monod appliquent également leur sys-



© THOMAS BOUDOU

tème magnétique à l'étude des organoïdes, des organes artificiels miniatures développés pour l'étude in vitro de différentes pathologies. Ces travaux permettent par exemple de mieux comprendre comment les cancers intestinaux affectent la division et la migration cellulaire. Une migration qui se déroule notamment dans, sur et à travers la matrice extracellulaire (MEC), un échafaudage de macromolécules principalement constitué de collagène synthétisé et structuré par des cellules spécialisées, les fibroblastes.

La matrice extracellulaire en toile de fond

Siège de nombreuses allées et venues cellulaires, la MEC fait l'objet d'une attention particulière de la part de chercheurs comme Thomas Boudou, du Laboratoire interdisciplinaire de physique² qui explore la mécanobiologie des tissus. « Ces cellules exercent en continu des forces sur leur environnement et sur leurs voisines, explique-t-il. On peut voir la matrice extracellulaire comme une toile d'araignée, laissant les signaux mécaniques se propager le long de ses fibres. Ces informations peuvent pousser des cellules à migrer ou à se différencier. »

Pour étudier les forces mécaniques impliquées dans la migration ou la différenciation des cellules, le chercheur utilise l'optogénétique : une méthode qui permet, après modification génétique, d'activer une protéine spécifique grâce à la lumière. Telle une cascade, cette activation découle en une autre qui, à terme, induit un processus biologique d'intérêt. Thomas Boudou transforme ainsi des cellules en véritables actionneurs, qu'il contracte à volonté pour regarder comment ces mouvements influencent le tissu et jusqu'où le signal peut se propager. « Notre approche est basée sur une réponse physiologique, précise le chercheur. Comme ce sont bien des cellules qui tirent, le signal reste dans les clous de la réalité physiologique. »

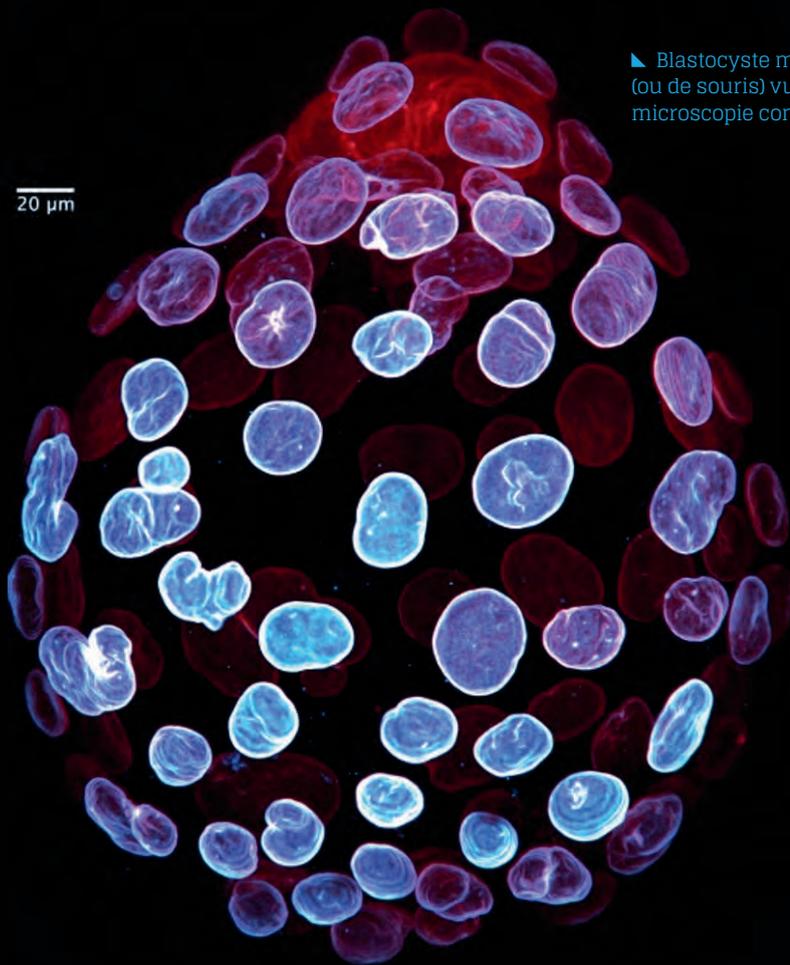
► Vue en microscopie confocale d'un tissu cellulaire en 3D, créé en laboratoire. Il est composé de fibroblastes photoactivables (en vert et bleu) dans une matrice de collagène (fuscia), et il s'étend entre deux micropiliers sensibles aux forces de traction (les deux masses noires).

1. Unité CNRS/Université Paris Cité. 2. Unité CNRS/Université Grenoble Alpes. 3. Unité CNRS/Institut Curie/Inserm.

► Blastocyste murin (ou de souris) vu en microscopie confocale.

20 µm

© E. H. DELGADO ET J.-L. MAÎTRE



Ces travaux ont notamment porté sur la fibrose, un durcissement et une perte d'élasticité d'un tissu, le plus souvent à la suite d'une lésion ou d'une inflammation. Lors de cette modification du tissu, les fibroblastes sont en quelque sorte réactivés et produisent un excès de collagène. Or cette réactivation pousse les cellules à tirer davantage sur leur environnement, un signal qui induit l'activation de leurs voisins directs, engendrant un cercle vicieux et propageant la fibrose dans l'ensemble du tissu.

Des forces mécaniques précurseurs

Directeur de recherche au CNRS, à l'unité Génétique et biologie du développement³, Jean-Léon Maître étudie quant à lui le développement des embryons de mammifères, principalement chez l'humain et la souris. « Si la chimie des cellules est importante, les changements de forme de l'embryon viennent principalement de forces mécaniques, explique-t-il. Ces stimuli peuvent d'ailleurs être transformés en réponse chimique, qui va ensuite induire l'expression des gènes. »

Le chercheur utilise des marqueurs fluorescents pour observer l'adhérence des cellules entre elles, ainsi que la manière dont elles tirent grâce à des protéines qui

contractent la surface des cellules. Il emploie également des micropipettes pour mesurer la force requise pour déformer la surface des cellules, ainsi que des pinces optiques, guidées par des lasers, pour explorer la mécanique de l'intérieur des cellules. « Nous constatons que pendant le développement d'un embryon de mammifère, les forces et les cellules impliquées changent au cours du temps, détaille Jean-Léon Maître. Les cellules qui tirent le plus fort se retrouvent à l'intérieur de l'embryon. Quand celui-ci ne comporte que seize cellules, c'est leur position qui définit lesquelles restent dans l'embryon et lesquelles vont former le placenta. On a longtemps étudié cette séparation en s'intéressant à des critères chimiques, mais ce sont bien les forces mécaniques qui agissent en amont des changements d'expression des gènes. »

Ces forces de traction commencent, au sein de l'embryon, dès le stade huit cellules, soit quelques heures seulement après la fécondation. Après une division asymétrique, les cellules filles les plus fortes parviennent à se hisser vers l'intérieur de la masse cellulaire, garantissant ainsi leur participation à l'embryon plutôt qu'au placenta. L'embryogenèse se poursuit avec la formation d'une poche d'eau au sein de l'embryon, le lumen, où les forces hydrostatiques fracturent les points de contact entre les cellules, permettant au fluide de s'accumuler là où les cellules adhèrent le moins les unes aux autres. Les contractions autour de la cavité font également déplacer le lumen, comme l'air au sein d'un ballon de baudruche à moitié dégonflé. « En modifiant l'adhésion et la contractilité des cellules, on peut contrôler où l'embryon va s'attacher, souligne Jean-Léon Maître. Ces découvertes pourraient trouver des applications dans l'aide à la fertilité. »

Si la mécanobiologie est pour l'instant surtout étudiée in vitro, elle va devoir développer des approches in vivo. « Nous manquons encore d'outils bien adaptés, mais, tout comme la biochimie a révolutionné la biologie, notre discipline va bénéficier de l'émergence de chercheurs et de chercheuses formés en tant que biophysiciens purs et durs », conclut Jean-Léon Maître. ||



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

Entrez dans les matrices!



© BENJAMINEC / STOCK.ADOBE.COM

NUMÉRIQUE

MATHÉMATIQUES Qu'elle soit réalisée par un humain ou un ordinateur, la multiplication matricielle est une tâche fastidieuse. Des chercheurs bataillent pour réduire le temps et le nombre d'étapes nécessaires à la résolution de ce type d'opérations.

PAR CHARLOTTE MAUGER

Tableaux Excel, modélisation climatique, simulation de la structure d'une aile d'avion, calcul dans un réseau de neurones, traitement des images... Derrière ces objets ou problèmes se cachent souvent des matrices. Tout droit issues de l'algèbre, elles sont avant tout des objets mathématiques sur lesquels on peut effectuer des opérations, comme on le fait avec des nombres. Parmi elles, la multiplication, une opération simple mais qui peut réclamer d'énormes ressources de calcul à un ordinateur lorsque la matrice devient grande. C'est pourquoi depuis les années 1960 des chercheurs s'attèlent à trouver des méthodes de multiplication optimisée afin d'accélérer ces calculs.

Les matrices peuvent être vues comme un tableau de valeurs. Elles permettent, entre autres, de décrire un système d'équations linéaires de manière compacte. La plupart des phénomènes physiques, chimiques ou biologiques peuvent ainsi être représentés sous forme de matrices. Les matrices sont aussi utilisées pour caractériser un objet, comme une image décrite par un tableau indiquant la valeur (couleur, position, etc.) de chacun de ses pixels, ou encore en *machine learning* (apprentissage automatique), où « l'essentiel du calcul dans un réseau de neurones est effectué sur des matrices représentant l'état de chacun des neurones », pointe Gabriel Peyré, chercheur au Département de mathématiques et applications de l'École normale supérieure¹.

Des tableaux aux matrices

Les ancêtres des matrices ont vu le jour en Chine, au I^{er} siècle avant ou après notre ère. « Dans l'ouvrage anonyme Les neufs chapitres sur les procédures mathématiques, on trouve quelque chose qui ressemble à une matrice. Car la procédure pour résoudre un système linéaire commence par décrire une mise en tableau des données », expose Karine Chemla, chercheuse en histoire des mathématiques au

laboratoire Science, Philosophie, Histoire (Sphere)². L'intérêt de cette mise en page est comparable à notre numération positionnelle qui permet d'additionner facilement en superposant les unités, les dizaines, les centaines, etc. « L'idée ici est que l'algorithme de résolution du problème s'appuie sur la disposition des données en tableau », souligne-t-elle.

Pour autant, ces tableaux ne peuvent pas encore être considérés comme des matrices car ils ne peuvent être utilisés pour faire des opérations. « Ce saut va se faire au milieu du XIX^e siècle, avec les travaux d'Arthur Cayley », indique Karine Chemla. Ce mathématicien britannique pose les premières opérations élémentaires sur ces objets : addition, inversion ou multiplication. Opérer sur les matrices lui permet de résoudre des problèmes de géométrie. En effet, la transformation géométrique d'un objet – sa rotation par exemple – peut être écrite grâce à une matrice. Et la succession de plusieurs transformations n'est rien d'autre que la multiplication de matrices représentant chacune une transformation géométrique que subirait ce même objet. Une technique très utilisée dans le graphisme 3D.

Dans un monde toujours plus numérique, la multiplication matricielle est devenue une opération centrale, et pas seulement dans le champ des mathématiques. « Presque tous les algorithmes pour faire de la résolution numérique utilisent la multiplication matricielle », rappelle François Le Gall, chercheur à la Graduate School of Mathematics de l'université de Nagoya (Japon). L'avantage est que la méthode triviale (ou méthode standard) pour effectuer cette opération est simple à réaliser à la main ou avec un ordinateur tant que la taille de la matrice reste raisonnable. L'inconvénient est que le nombre d'étapes de calcul néces-

saires pour cet algorithme croît exponentiellement avec la taille de la matrice. « On peut compter ces additions et multiplications nécessaires pour multiplier deux matrices avec l'algorithme trivial. Pour une matrice avec n lignes et n colonnes, ce coût, appelé "complexité de l'algorithme", est de n^3 », explique Clément Pernet, enseignant-chercheur au Laboratoire Jean Kuntzmann³. Exemple : si deux matrices ont 1 000 lignes et 1 000 colonnes chacune, alors l'ordinateur (ou l'humain) doit faire 1 milliard d'opérations (soit 1 000³) pour réussir à les multiplier. « Or des matrices de ces tailles-là sont courantes dans les applications, notamment en machine learning », prévient François Le Gall.

À la conquête du meilleur algorithme

Dès les années 1960, mathématiciens et informaticiens se sont demandé si les matrices pouvaient être multipliées avec moins d'opérations. « Volker Strassen (mathématicien allemand, ndlr) s'était mis en tête que cela n'était pas possible. C'est pourtant lui qui a trouvé le premier un algorithme permettant de résoudre un produit de matrices en moins de n^3 étapes », sourit Clément Pernet. Une découverte qui a lancé la quête de l'algorithme optimal du produit matriciel ! « La motivation principale est de faire des calculs rapides », souligne François Le Gall. Car multiplier deux matrices prend du temps : 30 secondes pour deux matrices de 10 000 lignes et 10 000 colonnes mais 4 minutes avec le double de lignes et de colonnes. Trouver un algorithme qui diminue le nombre d'étapes de calcul nécessaires permettrait de réduire le temps de calcul global. Une réduction d'autant plus sensible que la taille de la matrice augmente.

Comparons l'algorithme trivial à un hypothétique algorithme de multiplication dont la complexité serait n^2 . Lors de la multiplication de deux matrices de taille 3×3 , l'avan-

$$\begin{pmatrix} 4 & 2 \\ 5 & 3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 6 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \times 1 + 2 \times 6 & 4 \times 0 + 2 \times 2 \\ 5 \times 1 + 3 \times 6 & 5 \times 0 + 3 \times 2 \end{pmatrix}$$

ALGORITHME TRIVIAL Lors de la multiplication de deux matrices de 2×2 , 8 multiplications et 2 additions sont nécessaires pour trouver les 4 coefficients de la matrice résultat.

ALGORITHME DE STRASSEN

Pour multiplier deux matrices en suivant la méthode diviser pour régner, il est nécessaire de faire 7 calculs intermédiaires, soit le nombre de multiplications, avant de trouver le résultat.

$$\begin{pmatrix} 4 & 2 \\ 5 & 3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 6 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 21+15-12+(-8) & -8+12 \\ 8+15 & 21-8+(-8)+1 \end{pmatrix}$$

1 Calculs intermédiaires

$$\begin{array}{lll} (4+3) \times (1+2) = 21 & (6-1) \times 3 = 15 & (2-3) \times (6+2) = -8 \\ (5+3) \times 1 = 8 & (4+2) \times 2 = 12 & \\ (0-2) \times 4 = -8 & (5-4) \times (1+0) = 1 & \end{array}$$

2 Remplir la matrice

1. Unité CNRS/ENS-PSL. 2. Unité CNRS/Université Paris-Cité. 3. Unité CNRS/Université Grenoble-Alpes.

tage de la seconde méthode par rapport à l'algorithme trivial n'est pas énorme. En revanche, si la taille de la matrice est d'un million de colonnes pour autant de lignes, le deuxième algorithme nécessitera un million de fois moins de calculs, soit un million de fois moins de temps et d'énergie dépensée. « *Notre motivation théorique est aussi de comprendre jusqu'où on peut réduire la valeur de la puissance de n* », expose François Le Gall. Ce que l'on sait, c'est que même optimisé, l'algorithme ne peut descendre sous une complexité de n^2 . En effet, n^2 est le nombre de cases qui composent la matrice résultat. Il faut donc au minimum n^2 étapes pour écrire le résultat. Pour faire baisser la complexité, les chercheurs concentrent donc leurs efforts sur la réduction du nombre de multiplications indispensables à réaliser avant la résolution d'un produit de matrices. « *On connaît bien le nombre d'additions à faire et il est petit par rapport au nombre de multiplications. Alors c'est surtout ces dernières qui déterminent la puissance de n* », éclaire François Le Gall.

Une complexité qui décroît « péniblement »

La première amélioration, l'algorithme de Volker Strassen, réduit la complexité de n^3 à $n^{2,807}$. Pour la construire, le mathématicien a utilisé la méthode qui consiste à diviser pour régner. L'idée est la suivante : on décompose le problème (ici la matrice) en plusieurs sous-problèmes (des parties de la matrice), puis eux-mêmes en d'autres sous-problèmes jusqu'à obtenir uniquement des matrices de taille 2×2 . Il ne reste ensuite qu'à multiplier tous ces résultats entre eux pour trouver le résultat final. De cette manière, la multiplication de deux matrices de taille 2×2 demande une multiplication de moins que la méthode triviale, et la multiplication de matrices de taille $10\,000 \times 10\,000$ offre un gain de temps d'environ 28 %. « *Après Volker Strassen, il n'y a pas eu de progrès pendant dix ans. Puis entre 1978 et la fin des années 1980, il y a eu une compétition énorme !* », s'exclame François Le Gall. Plusieurs petites améliorations sont découvertes, d'abord grâce à de nouveaux travaux de Volker Strassen, puis ceux de Shmuel Winograd et Don Coppersmith. Avec une autre méthode de décomposition des matrices, ces derniers ont ainsi réussi à faire décroître la complexité jusqu'à atteindre $n^{2,376}$.



▼ Volker Strassen, ici en 1988 au colloque Bauer-Jacobs à Erlangen, en Allemagne, a été le premier à trouver un algorithme permettant de résoudre un produit de matrices en moins de n^3 étapes.

Depuis les années 2010, des progrès ont successivement été obtenus en améliorant cette méthode bien précise. La dernière optimisation en date a été réalisée par Zhou Renfei et ses collègues de l'Institut interdisciplinaire des sciences de l'information à l'université de Tsinghua (Chine) et, à la fin 2023, en passant l'exposant de 2.372860 à 2.371866. Un résultat qui ne paye pas de mine mais qui est mathématiquement déterminant. « *Ils ont trouvé que quelque chose dans la méthode de Coppersmith et Winograd n'était pas optimal. On avait loupé ça* », félicite François Le Gall.

En chemin, la motivation théorique a pris le pas sur les améliorations réelles. « *Après les années 1970, les algorithmes de multiplication matricielle sont devenus galactiques* », prévient Clément Pernet. En d'autres termes, ces algorithmes sont si complexes qu'ils ne réduisent le temps de calcul que pour des matrices si gigantesques que tous les ordinateurs de la Terre ne suffiraient pas à les stocker. Alors, en pratique, ils ne sont jamais utilisés pour multiplier deux matrices, même avec des milliers de lignes et de colonnes. Pour autant, ce n'est pas parce que le résultat n'est pas utilisé, qu'il n'est pas intéressant. « *Ces recherches permettent de répondre à des questions fondamentales et elles demandent de mettre en place de nouvelles techniques* », pointe Gabriel Peyré. Cette course entre théoriciens pourrait bien déboucher sur des algorithmes plus rapides et utilisables dans des applications concrètes. ▮



© ROMAIN LIBBRECHT, IRBI

La reine fourmi n'est pas qu'une machine à pondre

VIVANT 

BIOLOGIE D'après une récente étude, ce sont les ouvrières qui initient et maintiennent la fonction de reproduction chez la reine fourmi, prouvant que le comportement de celle-ci dépend de son environnement social. De quoi remettre en question notre vision de ces colonies d'insectes.

PAR MARINA JULIENNE

Elles peuvent pondre jusqu'à cent œufs par jour, et en moyenne 200 000 œufs pour une reine des fourmis noires des jardins, qui vit entre 20 et 25 ans... Un rythme effréné qui donne le vertige ! Et explique pourquoi les reines sont généralement réduites à cette fonction de reproduction. Mais sont-elles capables d'assurer d'autres tâches ?

Si Romain Libbrecht, chercheur CNRS à l'Institut de recherche sur la biologie de l'insecte¹ et co-auteur de l'étude², travaille depuis plus de quinze ans sur les fourmis, c'est notamment pour répondre à des questions de science fondamentale sur le développement. « Je me suis demandé si la fondation des colonies de fourmis avait des points communs avec le développement des organismes multicellulaires auxquels nous appartenons, explique le chercheur. En effet, les deux sont des machines biologiques complexes dont le fonctionnement est basé sur la coopération de composants spécialisés dans la réalisation de différentes fonctions : des types de cellules distincts dans un cas, des

castes de fourmis (reine, ouvrière) dans l'autre. Autre point commun : alors que les organismes multicellulaires ont évolué à partir d'ancêtres unicellulaires, les colonies de fourmis sont issues d'insectes solitaires qui vivaient il y a plusieurs centaines de millions d'années ».

Comment la spécialisation des composants de cette « machine » se met-elle en place chez les fourmis ? « Chez les organismes multicellulaires, la spécialisation est mise en place à chaque génération et implique la différenciation de

► Une reine fourmi noire des jardins s'occupe de son couvain (œufs, larves et cocons) en laboratoire.

cellules souches totipotentes (capables de se différencier en n'importe quelle cellule spécialisée et de se structurer en formant un être vivant multicellulaire, Ndlr) *en cellules de peau, de muscle, du foie, etc.*, poursuit Romain Libbrecht. *Chez les sociétés d'insectes aussi la spécialisation doit être établie à chaque génération, mais si le développement embryonnaire est bien étudié pour de nombreuses espèces animales, on ne sait rien ou presque du développement des colonies d'insectes sociaux* ».

Les chercheurs ont réalisé plusieurs expériences, en plaçant les fourmis dans des boîtes et en enregistrant tous leurs mouvements grâce à des caméras posées en surplomb. Ils ont d'abord documenté les comportements de la reine entre le moment où elle pond ses premiers œufs et le moment où en sortent les premières ouvrières. Et ils ont pu vérifier que durant cette période, la reine fondatrice s'occupe des œufs, puis des larves, en les nourrissant, en les nettoyant, en les aidant à déchirer leur cocon.

La fourmi noire des jardins, un cas d'étude

Avec son équipe, Romain Libbrecht a donc travaillé sur la fourmi noire des jardins (*Lasius niger*), une espèce très commune dont les reines dites « fondatrices » établissent de nouvelles colonies seules, sans l'aide d'ouvrières. Ils ont constaté que ce n'est qu'une fois que les larves sont devenues des ouvrières opérationnelles, prêtes à s'occuper du couvain (l'ensemble des œufs et larves), que la reine se remet à pondre et ne fait plus que cela. Ce serait donc la présence d'ouvrières qui ferait que les reines se spécialisent dans la reproduction ? Encore faut-il le démontrer...

Les chercheurs ont d'abord simplement mis en contact des reines avec des ouvrières étrangères à la colonie, si jeunes qu'elles ne portaient pas encore l'odeur de leur nid d'origine. Les reines ont aussitôt cessé de s'occuper du couvain, la présence des ouvrières, même étrangères, constituant un véritable signal pour se concentrer sur leur spécialité : pondre des œufs, encore et encore.

Puis les chercheurs ont introduit jusqu'à cinq ouvrières dans les tubes à essais, et constaté que plus ils en introduisaient, moins les reines s'occupaient du couvain. Il y a donc un lien entre le comportement adopté par la reine et le nombre d'ouvrières présentes autour d'elles. La simple présence d'ouvrières suffit-elle à induire la spécialisation des reines ou faut-il que les ouvrières s'occupent

effectivement du couvain ? Pour le savoir, l'équipe a simplement introduit des extraits d'odeurs habituellement présentes sur les fourmis. « *Les reines n'ont pas été leurrées par ces signaux sociaux : elles ont continué à s'occuper de leur couvain, qui sans elles aurait déperé* », constate Romain Libbrecht.

Dernier subterfuge : les scientifiques ont séparé les ouvrières de la reine par un grillage fin, qui empêchait les ouvrières de prodiguer des soins au couvain mais permettait à la reine de détecter leur présence. Les films ont montré que dans ces conditions, la présence des ouvrières n'induisait pas la spécialisation des reines sur des fonctions de reproduction, mais qu'elles continuaient à s'occuper du couvain.

La reproduction, une spécialisation réversible

Pour expliquer ces résultats, les chercheurs avancent l'hypothèse que les reines auraient un seuil de réponse au couvain plus élevé que celui des ouvrières. Imaginez des colocataires qui se partagent la corvée de vaisselle : ceux ou celles qui ne supportent pas plus de cinq assiettes empilées dans l'évier feront plus la vaisselle que ceux ou celles qui ne prennent l'éponge qu'à partir de vingt assiettes sales. C'est seulement dans le cas où les colocataires, agacés dès la cinquième assiette sale, quittent la colocation que les autres se mettront à faire la vaisselle. Sinon, ils échapperont toujours à cette tâche ingrate... Il en serait de même pour les fourmis. Il faut que le couvain soit en danger pour que les reines s'en occupent.

Selon cette hypothèse, des « vieilles » reines vivant dans des colonies matures devraient donc s'occuper du couvain si on leur retire toutes leurs ouvrières ? Pour le vérifier, l'équipe a isolé des reines qui, depuis deux ou trois ans, ne faisaient que pondre des œufs. Or si l'on retire les ouvrières de leur nid, elles retrouvent en moins de 24 heures les gestes de soin au couvain ! CQFD : leur spécialisation est totalement réversible. Et c'est bien l'absence d'ouvrières qui déclenche et maintient chez elles le comportement de reproduction.

Ces résultats pourraient-ils être étendus à d'autres comportements habituellement réservés aux ouvrières, comme la recherche de nourriture, la construction du nid ou les comportements hygiéniques ? Dans la nature, si une fourmi meurt au sein de la colonie, elle est coupée en morceaux par les ouvrières et déplacée dans un dépotoir, pour éviter les contaminations. Romain Libbrecht et ses collègues démarrent des expériences pour étudier l'effet de la présence d'ouvrières sur les réactions d'une reine en présence d'un cadavre de fourmi. En attendant leurs résultats, l'image de reines réduites à l'état de machines à pondre sort déjà bien nuancée de cette première étude. II

1. Unité CNRS/Université de Tours. 2. Majidifar V, Psalti MN, Coulm M, et al., "Ontogeny of superorganisms: Social control of queen specialization in ants", *Functional Ecology*, 26 mars 2024.



Le CNRS à VivaTech 2024

© N. LAMBERT/CNRS

Pour sa cinquième participation à VivaTech, le CNRS a décidé de mettre à l'honneur dix start-up à fort potentiel dans des domaines de recherche qui répondent plus que jamais à des défis sociétaux et technologiques d'aujourd'hui et de demain. « Participer à VivaTech est une formidable occasion pour le CNRS de rappeler son rôle clé en matière d'innovation et d'illustrer concrètement que la recherche fondamentale est à la base d'innovations de rupture dans des domaines très variés, utiles à la société », déclare Jean-Luc Moullet, directeur général délégué à l'innovation du CNRS. Des experts et partenaires de l'organisme et des représentants de start-up issues de laboratoires sous sa tutelle ont pu échanger avec le public et présenter des nouvelles technologies autour de quatre des thématiques de cette édition 2024 : la santé, le développement durable, le spatial et la révolution numérique.

Des acteurs du new space

Coté spatial, on y a retrouvé Aldoria et Ion-X. Aldoria, cofondée en 2017, utilise un réseau breveté de télescopes pour surveiller les débris spatiaux, les objets abandonnés et les satellites en orbite. Une solution qu'elle propose à ses clients pour éviter les collisions et augmenter la durée de vie des biens dans l'espace, alors que l'on estime à 36 000

ÉVÈNEMENT Cette année encore, le CNRS a répondu présent pour le plus grand salon européen dédié aux start-up et à l'innovation, qui s'est tenu du 22 au 25 mai à Paris.

PAR LAURENCE STENVOT

le nombre d'objets de plus de 10 centimètres, à 1 million ceux mesurant entre 1 et 10 cm et à 130 millions les objets de moins de 1 cm en orbite basse et geostationnaire.

De son côté, Ion-X, fondée en 2021, développe une technologie de moteurs ioniques originaux. Ces moteurs reposent sur les résultats de Jacques Gierak, ingénieur de recherche au CNRS, au Centre de nanosciences et de nanotechnologies¹ et expert mondialement reconnu en faisceaux d'ions focalisés. « À partir de travaux très exploratoires de Jacques Gierak, soutenus par le Cnes, une technologie prometteuse a émergé, explique Jean-Marc Schmittbiel, chargé d'affaires chez CNRS Innovation. Nous en avons tiré trois brevets et un dossier technique secret, puis financé un démonstrateur avec l'aide d'Airbus Defense & Space. »

Aujourd'hui cofondateur et conseiller scientifique d'ION-X, Jacques Gierak souligne que son rôle n'est pourtant pas « celui d'un opérateur industriel ». Pour le cher-

► Le stand du CNRS au Salon VivaTech, le 22 mai 2024.

Tafalgie Therapeutics : des alternatives aux opioïdes

Créée en 2020, Tafalgie Therapeutics est spécialisée dans la recherche et l'innovation de médicaments antidouleurs. Elle a développé le premier traitement capable de soulager et prévenir l'apparition de douleurs aiguës et chroniques (inflammatoires, post-opératoires, neuropathiques), sans accoutumance ni dépendance, et avec une très bonne sécurité d'emploi. Unique en son genre, la technologie développée par Tafalgie

Therapeutics s'appuie sur un mode d'action fondamentalement différent de celui de tous les antidouleurs actuels et vise à traiter efficacement tous les types de douleurs, de toute intensité, sans les effets secondaires nocifs des analgésiques existants. Cette nouvelle classe thérapeutique de médicaments est issue des recherches du Docteur Aziz Moqrich, neuroscientifique, directeur de recherche au CNRS à l'Institut de biologie du développement de Marseille¹ et lauréat du Conseil européen de la recherche.

1. Unité CNRS/Aix-Marseille Université.

cheur, il est nécessaire d'agréger des compétences et des relations autour des inventeurs pour arriver à des innovations qui intéressent l'industrie. « *Le CNRS m'a apporté la stabilité en me permettant d'explorer des thématiques de propulsion spatiale, alors que cette activité n'existait pas dans mon laboratoire, se réjouit-il. Ils ont pris le risque de me soutenir et nous voilà à présent avec un propulseur dont les performances ont été multipliées par dix.* »

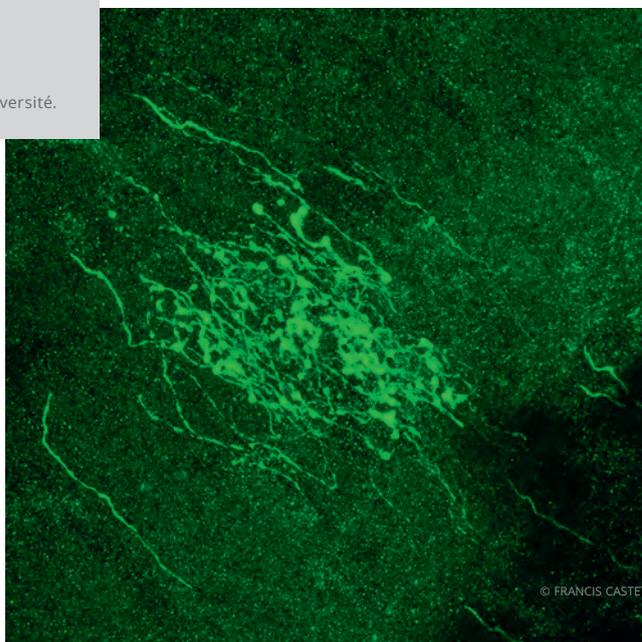
Des innovations en santé

Un constat partagé par une autre start-up présente sur le stand du CNRS : Hephaistos-Pharma. Fondée en 2018, elle valorise une molécule baptisée « Onco-Boost » pour le traitement de tous types de cancers, dont ceux qui ne répondent pas aux traitements actuels. « *Lors de mes dernières années de carrière, le CNRS m'a laissé consacrer 20 % de mon temps de travail à l'innovation, se souvient Martine Caroff, co-fondatrice et directrice scientifique la start-up. J'ai ainsi pu candidater à de nombreux concours d'innovation pour mettre nos projets en avant et trouver des financements.* ». Aujourd'hui, les essais précliniques d'Hephaistos-Pharma donnent des résultats impressionnants sur des cancers difficiles, comme les ostéosarcomes et les cancers du côlon. « *La recherche académique est vraiment à la base de tout ce que nous avons développé* », insiste Martine

Caroff. Elle a dirigé pendant plus de trente ans une équipe de recherche sur les endotoxines, ce qui lui a permis d'acquérir le savoir-faire pour développer la molécule à l'origine d'Onco-Boost à partir de membranes bactériennes. Cette molécule a ensuite dû être modifiée et formulée pour une injection intraveineuse chez l'humain.

Du robot agricole à l'IA générative

Également présentes sur le stand du CNRS, les start-up Lactips, Mecaware et Naïo Technologies. Lactips, basée sur des travaux issus du laboratoire Ingénierie des matériaux polymères², développe un matériau thermoplastique à base de protéines, totalement biodégradable et soluble dans l'eau qui pourrait par exemple servir pour des emballages en papier ou des étiquettes réutilisables. Mecaware, à partir de travaux cette fois-ci menés à l'Institut de chimie et biochimie moléculaires et supramoléculaires³, extrait des matériaux critiques de rebuts de production et de batteries en fin de vie. Le système, quadruplement breveté, permet d'en extraire les métaux en circuit fermé à bas coût économique et écologique.



▼ Fibres marquées par TFAFA4, une protéine ayant une action antidouleur sur tous les types de douleur chronique, dans la moelle épinière.

Enfin, Naïo Technologies (*lire l'encadré page suivante*) développe des robots agricoles et viticoles. Grâce à leur autonomie augmentée, ils n'ont pas besoin d'être surveillés pour désherber ou récolter.

Outre la présentation de ces start-up, dix tables rondes se sont déroulées sur le stand du CNRS, autour de l'intelligence artificielle (IA) – thématique centrale de cette édition de VivaTech – mais aussi de la Défense ou encore des logiciels libres, faisant notamment intervenir de nombreux chercheurs de l'organisme.

1. Unité CNRS/Université Paris Saclay 2. Unité CNRS/Insa Lyon/Univ. Claude Bernard/Univ. Jean Monnet. 3. Unité CNRS/Univ. Claude Bernard. 4. Unité CNRS/Univ. de Lorraine.



© CYRIL FRÉSILLON/CNRS IMAGES

► La DNA card
Biometry peut stocker
1 kilo-octet de données
pour une durée
minimale de 150 ans.

Biomemory: des données stockées sur ADN

Fondée en 2021, Biomemory est une entreprise « green-tech » qui propose une technologie de stockage de données, moléculaire, à moindre coût et à impact écologique minimal. À la croisée de l'informatique et de la biotechnologie, cette innovation se présente comme la solution face aux

problématiques liées à la croissance exponentielle de la production de données et aux capacités de stockage insuffisantes qui s'annoncent dans les prochaines décennies. Forte de trois technologies brevetées et complémentaires, l'équipe de Biomemory a pour objectif de développer d'ici 2030 un système de stockage de données sur ADN capable d'archiver jusqu'à un exaoctet de données (10^{18} octets) et compatible avec les infrastructures actuelles des centres de données.

... Christophe Cerisara, par exemple, chargé de recherche au Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications⁴, intervenait sur « IA générative et innovation : un combo forcément gagnant ? ». Ce spécialiste du traitement de la parole et du langage naturel à l'aide de l'IA décortique les Grands modèles de langage (LLM), dont ChatGPT est l'exemple le plus connu, afin de comprendre comment ils parviennent à mémoriser des faits pour donner d'aussi bons résultats.

« Les LLM sont devenus des objets de recherche à part entière, affirme Christophe Cerisara. Si les entreprises sont plus agiles et rapides pour mettre des ingénieurs sur un sujet, c'est la recherche publique qui pourra ouvrir la boîte noire des LLM pour en poser les fondements théoriques. Les deux approches sont complémentaires et nécessaires. » Une conception de l'innovation qui a parfaitement résonné dans les allées du parc des expositions de la porte de Versailles de Paris. ▮

Naïo Technologies : des robots pour l'agriculture

Créée en 2011 et basée à Toulouse, Naïo Technologies est une entreprise qui conçoit, fabrique et commercialise des solutions de robotique agricole 100 % électriques, en étroite collaboration avec les agriculteurs. Respectueux des hommes et de l'environnement, ces robots de désherbage permettent de pallier notamment le manque de main-d'œuvre agricole, de

réduire la pénibilité liée à certains travaux et de limiter le recours aux intrants chimiques. En 2024, Naïo Technologies a lancé le seul système de sécurité certifié CE qui permet une utilisation totalement autonome. La start-up a à cœur de soutenir une alimentation plus saine pour tous grâce à une productivité agricole plus respectueuse de l'environnement. Aujourd'hui, plus de 300 robots agricoles fonctionnent dans plus de 25 pays.



© NAÏO TECHNOLOGIE

► Orïo, Oz, Jo, Ted, quatre robots agricoles qui réalisent des tâches en plein champs sans surveillance (principe de l'autonomie augmentée).

LES IDÉES



*Substances naturelles
et monnaies artificielles
investissent le futur.*

ILLUSTRATION : MARION JDANOFF POUR CNRS LE JOURNAL

Pharmacognosie, de la nature à l'armoire à pharmacie



© LAURENT ARDHUIN

VIVANT

MATIÈRE

ENTRETIEN Chimiste et pharmacien, le professeur Mehdi Beniddir nous

explique comment la pharmacognosie permet de développer de nouveaux médicaments à partir de substances produites par la nature.

PROPOS RECUEILLIS PAR WARDA MOHAMED

Vous avez reçu en 2022 la médaille de bronze du CNRS pour vos recherches sur la pharmacognosie. Pouvez-vous nous expliquer en quoi consiste cette discipline ?

Mehdi Beniddir¹. Il s'agit d'une discipline appartenant aux sciences pharmaceutiques, qui s'intéresse aux substances naturelles et à leurs actions pharmacologiques. Étymologiquement, « pharmacognosie » signifie « connaissance des poisons ou remèdes ». Mon métier est de découvrir des molécules, sachant que la plupart sont des poisons, et faire en sorte qu'elles deviennent des médicaments. Ces molécules ont des sources variées : végétale, animale, fongique, fermentaire et marine. Leur potentiel thérapeutique est ainsi lié à la fonction qu'elles assurent dans le milieu naturel, comme par exemple des molécules qu'emploient les organismes végétaux et animaux pour se défendre.

Quel est l'intérêt de ces molécules pour l'être humain ?

M. B. Il faut savoir que près de 50 % de l'arsenal thérapeutique utilisé aujourd'hui en clinique provient de la nature. Cet arsenal comprend des antibiotiques antibactériens, antifongiques, des anti-cancéreux, ou encore des immunosuppresseurs majeurs. En ce qui me concerne, je vise à découvrir de nouvelles

substances naturelles qui serviront de source d'inspiration pour concevoir les antibiotiques de demain. Toutefois, la grande majorité des industries pharmaceutiques, qui jadis ne juraient que par les substances naturelles, ont abandonné leurs efforts de recherche en pharmacognosie, aujourd'hui dévolus aux laboratoires académiques.

Quelle est la spécificité de vos méthodes de recherche ?

M. B. Je développe des stratégies de découverte précoce de nouvelles molécules fondées sur la chimio-informatique, qui combine chimie et intelligence artificielle. La numérisation permet notamment de sauvegarder le patrimoine historique des laboratoires en déposant les données spectrales des substances naturelles dans des bases de données accessibles à toute la communauté scientifique. Elle permet également d'améliorer le processus de découverte de substances naturelles et d'éviter le ré-isolément de substances déjà décrites. Combinée à la mise au point de nouveaux instruments

d'analyse et à l'avènement du big data, la pharmacognosie vit une véritable révolution technologique. En outre, les données spectrales jouent aujourd'hui un rôle crucial : elles procurent de précieuses bases de données permettant d'entraîner des algorithmes de *machine learning* (apprentissage automatique) et d'améliorer les processus qui prédisent les structures des molécules. À ce titre, les échantillons patrimoniaux et muséaux constituent de véritables trésors de données à numériser et à partager.

Comment s'articulent pharmacognosie, médecine traditionnelle et recherche en pharmacie ?

M. B. La pharmacognosie élargit la connaissance, ce qui est fondamental pour mieux connaître le vivant et la façon dont on peut l'exploiter. La pharmacie regroupe par essence beaucoup de disciplines. Mon travail de recherche permet de décrire de nouvelles molécules naturelles qui étendent le répertoire chimique dans lequel la pharmacie va tenter d'identifier le futur candidat médicament.

1. Chimiste, pharmacien, enseignant-chercheur au sein de l'unité Biomolécules : conception, isolement, synthèse (BioCIS, CNRS/Université Paris-Saclay).



© NONG GUANBIN / XINHUA / RÉA

► **Plantation d'un pied d'*Artemisia annua*, une plante utilisée contre le paludisme (Chine, 2019).**

Par ailleurs, la pharmacognosie est intimement liée à la médecine traditionnelle car elle tire ses connaissances de savoirs ancestraux. Jusqu'à aujourd'hui, la médecine traditionnelle reste la principale source de soin pour 80 % de la population mondiale selon l'Organisation mondiale de la santé. La science moderne a tenté de rationaliser ces préparations traditionnelles, souvent constituées de mélanges de plantes et d'animaux.

L'artémisinine est un excellent exemple de principe actif découvert grâce à la médecine traditionnelle : des écrits datant de 168 av. J.-C. décrivaient l'emploi de tisane d'armoise annuelle pour traiter des fièvres. L'extraction de l'artémisinine à partir de l'armoise pour traiter le paludisme a valu le prix Nobel de physiologie ou médecine en 2015 à la chercheuse chinoise Tu Youyou.

Explorer les points chauds de biodiversité (*hotspot*) tels que les forêts primaires, associés à un crible ethnopharmacologique, permet par ailleurs de valider les observations empiriques traditionnelles. En effet, lorsqu'un tradipraticien (médecin traditionnel) attire notre attention sur l'utilisation d'une plante, on s'y intéresse particulièrement afin d'isoler la

ou les substances actives et de révéler les bénéfiques. Enfin, le croisement des données historiques d'emploi de certains remèdes ou poisons de flèches, de la chimie et des outils informatiques modernes, permet de tracer l'origine des plantes et des animaux qui existaient à une autre époque et à un endroit donné.

Comment vous assurez-vous que vos recherches ne nuisent pas à la protection de la biodiversité ?

M. B. La préservation de la biodiversité est au cœur de mes travaux. Ceux-ci s'inscrivent dans un cadre strict d'accès aux ressources génétiques et de partage des avantages (APA) découlant de leur utilisation, réglementé par le protocole de Nagoya de 2010. Grâce au recueil du consentement préalable pour l'accès à ces ressources, l'APA contribue à promouvoir des conditions d'accès et d'utilisation respectueuses de la biodiversité, qui renferme une richesse chimique inestimable.

Le dispositif APA permet également l'amélioration de la sécurité juridique entre fournisseur et utilisateur, le renforcement de la traçabilité sur les ressources et la transparence sur les utilisations. De plus, nous

nous référons à la liste de l'union internationale pour la conservation de la nature pour évaluer le statut des espèces que nous étudions.

Dans un contexte de défiance vis-à-vis de « Big Pharma », rappeler que les médicaments sont issus de la nature peut-il rassurer ?

M. B. C'est un argument qui fait sens mais qui est dévoyé par le marketing qui l'utilise uniquement pour vendre. Sous prétexte que les produits sont naturels ou d'origine naturelle, les gens peuvent penser, à tort, qu'ils sont dénués de toute toxicité. Rappelons que la phytothérapie peut conduire, en association avec des médicaments « conventionnels », à des interactions médicamenteuses aux conséquences graves.

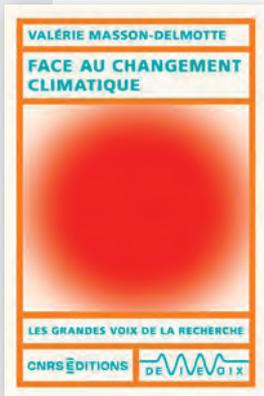
N'oublions pas que les plus grands poisons de l'histoire sont naturels. Beaucoup considèrent que l'utilisation de plantes sous forme de tisane, de gélules, est forcément bénéfique. C'est effectivement possible mais pour s'en assurer, il faut au préalable pratiquer une analyse rigoureuse des bienfaits des plantes en question et une évaluation critique du rapport bénéfice/risque. C'est en partie ce que fait la pharmacognosie. ||

À lire

Personnalité

Dans cet ouvrage petit format, la paléoclimatologue Valérie Masson-Delmotte retrace son parcours de chercheuse et son engagement en tant que co-présidente du groupe I du Giec, en charge d'étudier les aspects physiques du changement climatique et « *revendique le fait que [sa] mission, comme scientifique, n'est pas seulement de produire de nouvelles connaissances, mais aussi de jouer un rôle de passeuse de connaissances, pour stimuler leur appropriation largement dans la société [...]* ».

Face au réchauffement climatique, Valérie Masson-Delmotte, CNRS Éditions, coll. « Les Grandes Voix de la Recherche », avril 2024, 96 p., 8 €.



Odorat

Il est l'un de nos sens les plus puissants. Capable de nous renvoyer à nos souvenirs, notre odorat peut tout aussi bien déclencher une panoplie d'émotions, allant de la joie au dégoût.

Comment notre cerveau interprète-t-il les odeurs ou encore, comment ces dernières guident-elles nos comportements ? Voilà quelques-unes des questions auxquelles le neuroscientifique Hirc Gurden s'est employé à répondre, tout en décrivant les découvertes les plus récentes sur ce sens encore entouré de mystères.

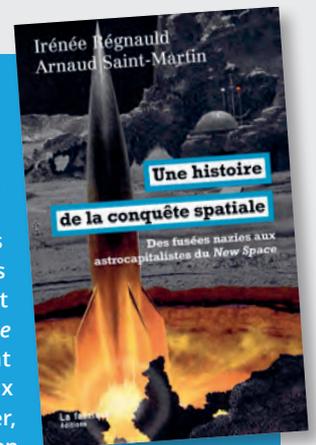
Sentir. Comment les odeurs agissent sur notre cerveau, Hirc Gurden, Les Arènes, avril 2024, 256 p., 21 €.



Hitsoire

Une fusée n'est rien d'autre qu'un missile ; d'ailleurs, les ingénieurs ayant pensé les premières ont également conçu les seconds. Et ce sont bien des scientifiques nazis qui, une fois la Seconde Guerre mondiale terminée et exilés aux États-Unis ont bâti les programmes spatiaux tels Apollo. Aujourd'hui, les États délaissent peu à peu l'exploration spatiale au profit d'intérêts privés, qui entretiennent la flamme du « *space enthousiasme* », en fondant ce que certains appellent l'« *astrocapitalisme* ». Censé apporter des solutions aux problèmes existants sur le plancher des vaches, ce dernier, selon les auteurs, « *se caractérise aujourd'hui par une fuite en avant destructrice* ».

Une histoire de la conquête spatiale. Des fusées nazies aux astrocapitalistes du New Space, Irénée Régnauld et Arnaud Saint-Martin, La Fabrique éditions, février 2024, 282 p., 20 €.



Climat

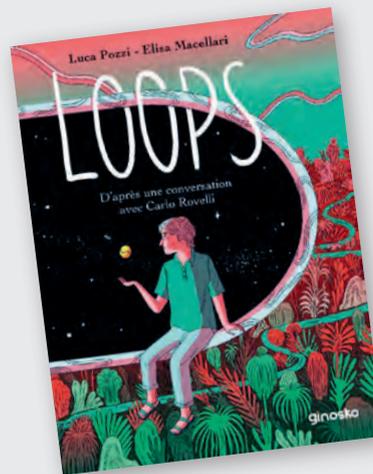
Alors que nombre de scientifiques travaillent à compiler leurs travaux de recherche fondamentale pour informer les décideurs politiques sur les dérèglements climatiques, les sciences humaines et sociales doivent aussi jouer un rôle prépondérant dans la préparation et l'adaptation aux changements sociétaux à venir. Juristes, politistes, sociologues, économistes... cet ouvrage met en commun leurs travaux et leurs réflexions sur la décarbonation de la société, le climato-scepticisme ou encore la santé publique.

Les sociétés face aux défis climatiques, Sandrine Maljean-Dubois, Stéphanie Vermeersh et Agnès Deboulet (dir.), CNRS Éditions, mai 2024, 250 p., 23 €.

Physique

Quoi de mieux que d'illustrer ce qu'on ne peut voir ou percevoir ? C'est toute l'intention de cette bande dessinée qui, à travers une discussion imaginée par les auteurs avec le physicien Carlo Rovelli, retranscrit la pensée du scientifique. Des trous noirs au temps, en passant par la théorie de la gravité quantique à boucle (*Loop Quantum Gravity*), ce livre détaille et rend accessibles des notions de physique fondamentale particulièrement complexes.

Loops. D'après une conversation avec Carlo Rovelli, Luca Pozzi et Elisa Macellari, Éditions ça et là, coll. « Ginosko », mai 2024, 168 p., 21 €.





Intelligence artificielle

Depuis plus d'une année, l'IA, à travers l'outil ChatGPT, fait parler d'elle quasi quotidiennement. Car oui, désormais les ordinateurs comprennent le langage humain, si bien qu'à certains égards, ChatGPT semble nous surpasser. L'ouvrage de Guillaume Wisniewski raconte l'histoire de l'avènement de ces technologies qui ont vu le jour dans les années 1950 et qui continuent d'évoluer aux grés de la recherche.

Faire parler les ordinateurs, La révolution ChatGPT, Guillaume Wisniewski, Dunod, mars 2024, 256 p., 19,90 €.

Botanique

Saviez-vous qu'à l'origine, le maïs était une plante chétive pourvue de seulement quelques grains, et que les pommes de terre étaient toxiques ? Mais les humains sont passés par là, et ont réussi à domestiquer, sélections après sélections, ces plantes pour le bonheur de nos palais et de notre santé. Aujourd'hui, la menace pèse sur les cultures et nous impose de trouver des parades, aussi bien en termes de techniques que de variétés susceptibles de résister aux maladies comme aux aléas climatiques. Le botaniste François Parcy nous livre les clés pour comprendre les mécanismes de la domestication des plantes, et nous parle de celles dont nous aurons besoin demain.

Les clés du champ. Comment domestiquer les plantes, François Parcy, avril 2024, 240 p., 18 €.



Système solaire

La maison d'édition Glénat se fend d'une collection de bandes dessinées pédagogiques sur l'exploration spatiale, plus particulièrement centrée sur notre Système solaire. Au fil des volumes, on suit l'équipage de la Station spatiale internationale qui, après une rencontre du troisième type, embarque sur un vaisseau pour un voyage initiatique. Les détails scientifiques sur chacun des astres visités

ne manquent pas et agrémentent une histoire captivante. Coups de crayons précis et palette de couleurs fidèles à la réalité répondent à de vraies images réalisées par des instruments (sondes, satellites...) pour acquérir des connaissances de façon ludique, chaque tome présentant le plus complètement possible une planète et ses mystères. Deux des huit volumes, *Mars* et *Jupiter*, sont déjà disponibles, les six autres paraîtront d'ici à 2027.

Mars. La planète rouge, Bruno Lecigne et Fabien Bedouel et Jupiter. Le berger des astéroïdes, Bruno Lecigne, Xavier Dujardin et Afif Khaled, Glénat, coll. « Système Solaire », mars 2024, 64 p., 15,5 €.

Astronomie

Un archipel, des volcans et des télescopes... bienvenue à Hawaï ! Au-delà de l'image idyllique que renvoient ces îles du Pacifique, c'est l'histoire de l'implantation des instruments gigantesques que sont les télescopes, érigés sur des terres sacrées, qui a happé le sociologue Pascal Marichalar. En effet, bien qu'essentiels à l'astronomie, ces miroirs géants pointés vers le ciel cachent une histoire bien moins brillante que les astres qu'ils scrutent.

La montagne aux étoiles. Enquête sur les terres contestées de l'astronomie, Pascal Marichalar, La Découverte, avril 2024, 304 p., 22 €.



Une nouvelle monnaie pour détrôner le dollar ?

Incontournable depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale tant dans les échanges commerciaux internationaux que financiers, le dollar voit de plus en plus sa domination remise en question, notamment par les pays réunis sous l'acronyme Brics (Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud) qui envisagent de créer leur propre monnaie. Mais quelle forme cette devise pourrait-elle prendre ? Pour Carl Grekou, économiste au Centre d'études prospectives et d'informations internationales (CEPII) et chercheur associé au laboratoire EconomiX¹, deux scénarios sont possibles : « un premier qui verrait un taux change fixe entre les différentes autorités monétaires de ces pays. Et un second, plus probable, qui verrait à moyen terme ces économies définir une parité centrale et des taux de conversion des monnaies de chaque pays par rapport à cette monnaie Brics. La parité centrale jouerait donc ici le rôle de cours virtuel de la monnaie Brics, cours vis-à-vis duquel chaque monnaie aurait un taux de change ; on retrouve là le même système que l'ECU (European Currency Unit, NdI), ancêtre de l'euro ».

Le commerce mondial comme réseau d'influence

Il est alors bon de se demander si, en considérant uniquement la structure mathématique et le volume des échanges commerciaux, le réseau financier global actuel pourrait favoriser l'émergence d'une monnaie commune aux Brics. Les physiciens² Célestin Coquidé, José Lages et Dima Shepelyansky ont publié une étude³ qui tente de répondre à cette question en analysant la structure du commerce international sur une période allant de 2010 à 2020. « Les données analysées rassemblent environ 3 000 produits (gaz, pétrole, produits alimentaires, produits manufacturés...). Les services n'y sont pas comptabilisés. Les échanges observés entre deux pays, sur une année, correspondent à la somme de tous les produits échangés entre eux et se traduit par un volume d'export relatif, exprimé ici en dollars américains », explique Célestin Coquidé.

SOCIÉTÉS

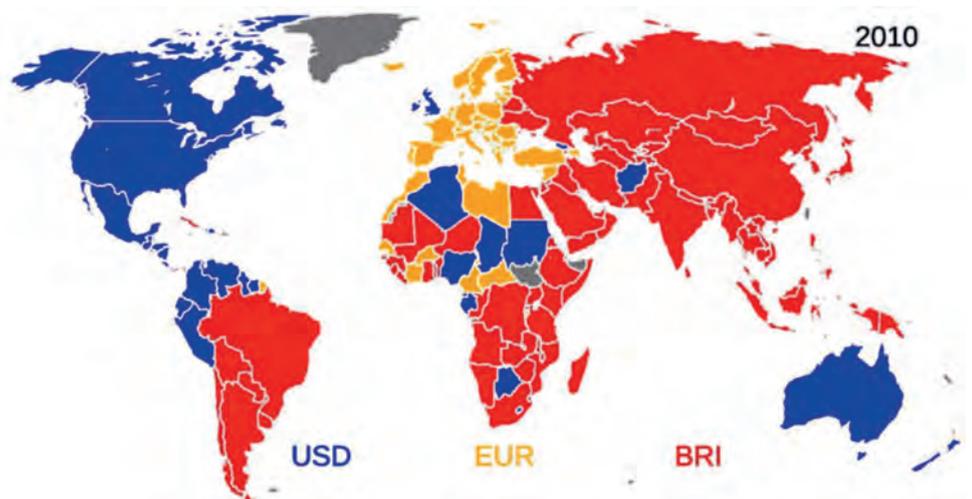


NUMÉRIQUE



ÉCONOMIE Alors que les pays des Brics avancent ouvertement l'idée de créer une monnaie commune, le réseau mondial serait-il prêt à adopter une nouvelle devise internationale ? C'est ce qu'ont cherché à comprendre des physiciens en analysant la structure mathématique des échanges commerciaux.

PAR MATTHIEU STRICOT



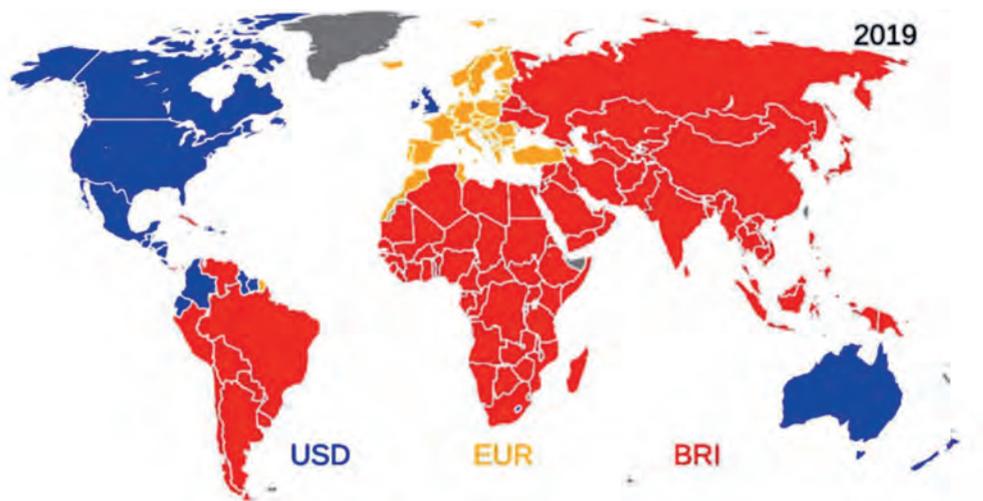
Pour développer leur modèle mathématique, les chercheurs se sont servis d'un « modèle de spin », utilisé en physique pour décrire certains états quantiques de la matière en présence de champs magnétiques. Également employé pour étudier des comportements sociologiques, comme lors d'un scrutin, ce modèle leur a permis de sonder l'influence de trois grands pôles économiques incarnés par trois monnaies : le dollar américain, l'euro et la « nouvelle » monnaie Brics.

Les physiciens ont d'abord défini les pays qui conserveront invariablement la même monnaie : neuf pays européens choisissent l'euro, les États-Unis et quelques pays anglosaxons le dollar, et les Brics adoptent leur « nouvelle » devise. « Pour tous les autres, on attribue, dès la première étape de la simulation, une devise de façon aléatoire. Ainsi, au fil des simulations, plus un pays partenaire est économiquement significatif à l'échelle mondiale, plus les échanges commerciaux avec lui sont importants en termes de volumes relatifs d'importations et d'exportations, plus il y a de chance que la devise de ce partenaire se transmette au pays en question », détaille le physicien.

Entre 2010 et 2020, la montée en puissance des Brics

À l'issue des simulations successives, les chercheurs obtiennent une carte du monde partagée entre les trois devises. « On remarque que dans les années 2010, le monde anglo-saxon privilégiait le dollar, alors que les Brics et un certain nombre de pays asiatiques auraient privilégié la monnaie Brics. L'Europe et le bassin méditerranéen préféraient l'euro, quand l'Amérique latine était partagée entre Brics et dollar. L'Afrique était quant à elle partagée en trois jusqu'en 2012, où la monnaie Brics a commencé à l'emporter sur le continent, remarque José Lages. En 2020, seuls le Maroc et la Tunisie, qui conservent des liens forts avec la France, privilégient encore l'euro ».

► Simulation de l'évolution de la distribution de la monnaie Brics, du dollar américain et de l'euro dans le monde entre 2010 et 2019 (d'après le modèle de spin utilisé par les chercheurs).



Mais pour Yamina Tadjeddine-Fourneyron, professeure de sciences économiques à l'université de Lorraine et directrice adjointe du Bureau d'économie théorique et appliquée⁴, ces conclusions pourraient être hâtives. Notamment le fait qu'une large partie de l'Afrique basculerait vers la monnaie Brics. « Le fait que les pays africains ont, sur cette période, exporté une part plus grande de marchandises vers les Brics n'implique pas pour autant que l'in-

fluence de l'euro sur une partie de l'Afrique ait été moins forte. Car les pays de la Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest (Cedeao), exception faite du Nigeria, utilisent le franc CFA, une monnaie qui est statutairement fixée à l'euro. »

Introduire d'autres sources de données

Ces éléments montrent les limites effectives de cette étude. La première étant qu'il s'avère difficile d'évaluer l'attractivité potentielle d'une devise qui n'existe pas. « Les échanges commerciaux ne font pas tout. Il faut aussi prendre en compte des caractéristiques politiques, économiques et sociales similaires pour qu'elle soit viable », signale de son côté l'économiste Valérie Mignon, professeure à l'université Paris Nanterre, chercheuse à EconomiX et conseillère scientifique au CEPII.

Rappelons ensuite que les échanges de services, qui représentent une part importante du commerce mondial, ne sont pas inclus dans cette étude. « C'est une des raisons pour lesquelles nous allons prochainement introduire d'autres sources de données, comme les flux financiers ou encore les chaînes de valeurs », annonce José Lages.

Enfin, la valeur d'une monnaie tient à la confiance que la communauté lui accorde. « La Chine impose désormais de plus en plus souvent le yuan comme monnaie de facturation dans les paiements l'impliquant. Mais lorsque la Chine n'est pas concernée par une transaction, le dollar ou l'euro restent privilégiés. Prévaut donc une résistance à l'acceptation du yuan, qui peut s'expliquer par des raisons économiques mais surtout pour des raisons politiques », remarque Yamina Tadjeddine-Fourneyron.

La montée en puissance des Brics et de leur potentielle monnaie dépendra de la stratégie qu'ils adopteront. « Les Brics⁵ ont d'ores et déjà émis la volonté d'asseoir la nouvelle monnaie sur un élément pérenne : les énergies. Or, en devenant un fournisseur majeur d'énergie, les Brics peuvent décider que cette énergie sera vendue dans leur monnaie commune. Dans ce cas, elle serait propulsée du jour au lendemain sur le devant de la scène », explique Carl Grekou. ▮



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

1. Unité CNRS/Univ. Paris Nanterre. 2. José Lages est directeur de l'Institut Univers, théorie, interfaces, nanostructures, atmosphère et environnement, molécules (Institut Utinam, CNRS/Univ. de Franche-Comté). Célestin Coquidé est chercheur associé à l'Institut Utinam et chercheur postdoctoral au sein du Laboratoire d'informatique en image et systèmes d'information (Liris, CNRS/Insa Lyon/Univ. Claude Bernard). Dima L. Shepelyansky est directeur de recherche émérite au Laboratoire de physique théorique (CNRS/Univ. Paul Sabatier). 3. "Prospects of BRICS currency dominance in international trade", Applied Network Science 8, 65 (2023). 4. Unité CNRS/Inrae/Univ. de Lorraine/Univ. de Strasbourg. 5. L'Arabie saoudite, l'Égypte, les Émirats arabes unis, l'Éthiopie et l'Iran ont rejoint le réseau le 1^{er} janvier 2024.



de Denis Guthleben,
historien au CNRS

Les médailles sous toutes les faces !

Qu'elles soient d'or, d'argent, de bronze ou de cristal, qu'elles viennent récompenser des travaux scientifiques exceptionnels ou des initiatives remarquables en faveur de l'innovation, de la médiation ou de l'appui à la recherche, les médailles scandent la vie du CNRS et contribuent chaque année à son rayonnement. Leur histoire ne date pas d'hier : elle a débuté il y a 70 ans, en 1954.

La République a besoin de savants...

Pour le CNRS qui fête ses 15 ans, 1954 est une année favorable. Les heures sombres de l'Occupation sont passées. Les restrictions de l'après-guerre aussi. Et la recherche vient d'être érigée au rang des priorités nationales par un nouveau gouvernement, celui de Pierre Mendès France – qui, avant même de le former, a prononcé un discours marquant à l'Assemblée nationale : « *la République a besoin de savants. Leurs découvertes, le rayonnement qui s'y attache et leurs applications contribuent à la grandeur d'un pays...* » Autant dire qu'un parfum d'optimisme flotte dans la maison, et que le moment paraît propice à la création de distinctions pour conforter le prestige de la recherche française.

“D'Alfred Kastler en 1964 à Jules Hoffmann en 2011, la médaille d'or du CNRS, créée en 1954, a souvent devancé l'attribution d'un Nobel.”

La décision n'a pas été prise à la légère. Suggérée par le directeur du CNRS, Gaston Dupouy, elle est discutée par son directoire puis soumise aux sections du comité national, qui vont devoir proposer les noms des récipiendaires. L'adhésion des deux instances est unanime et les médailles sont lancées dans la foulée : le bronze doit à l'époque couronner « les meilleures thèses de l'année », l'argent vient récompenser des travaux notables « postérieurs à la thèse », et une médaille d'or est décernée « chaque année à une des personnalités qui ont honoré la recherche scientifique française ». Cette dernière ne tarde pas à être vue comme la plus haute distinction scientifique française – une

sorte de prix Nobel national, mais avec la dotation sonnante et rébuchante en moins...

Pour qui s'intéresse à l'histoire du CNRS, les médailles forment plus qu'un chapelet de gratifications prestigieuses : elles donnent un aperçu de ses grandes évolutions. L'or, par exemple, renseigne sur la reconnaissance des champs de recherche. En récompensant Émile Borel en 1954, Louis de Broglie en 1955 et Jacques Hadamard en 1956, le CNRS a d'abord joué la carte de la prudence : mathématiques et physique sont des valeurs sûres ! Mais il est vite allé vers plus de diversité, avec les sciences biologiques ou chimiques (Gaston Ramon et l'immunologie en 1958, Marcel Delépine et la catalyse en 1962) ou les sciences humaines et sociales (le géographe Raoul Blanchard dès 1960, l'ethnologue Claude Lévi-Strauss en 1967). Le CNRS a aussi le nez fin : d'Alfred Kastler en 1964 à Jules Hoffmann en 2011, sa médaille d'or a souvent devancé l'attribution d'un Nobel. De quoi faire oublier quelques louvoisements, comme celui qu'a subi l'informatique, bannie en 1965 – « L'informatique ? Ce n'est pas une science ! » – mais réhabilitée au XXI^e siècle avec Jacques Stern, puis Gérard Berry. Chemin faisant, les personnels d'appui à la recherche, dans l'infinie variété de leurs fonctions, ont aussi été mis à l'honneur : le cristal du CNRS a vu le jour en 1992.

... et de savantes !

Chaque médaille a toutefois son revers. En parcourant les archives du CNRS, on constate vite que les femmes sont longtemps restées rares – pour le bronze –, très rares – pour l'argent –, voire carrément très rares – pour l'or. Dans ce dernier cas, il a fallu attendre 21 ans pour que la première, l'égyptologue Christiane Desroches-Noblecourt, soit récompensée, en 1975. Cette année-là, pour la première fois aussi, le CNRS a remis deux médailles d'or, en distinguant en même temps le physicien Raymond Castaing... L'embryologiste Nicole Le Douarin a été mise à l'honneur neuf ans plus tard, en 1986, tandis que 17 années de plus ont été nécessaires pour que la biologiste Margaret Buckingham rejoigne ce cercle fermé, en 2013. Depuis quelque temps, il y a comme un frémissement, plus flagrant du côté du bronze, de l'argent et des nouvelles médailles de l'innovation et de la médiation, que de l'or. Mais avec Claire Voisin, Barbara Cassin, Françoise Combes et Sandra Lavorel, l'espoir est permis. D'autant plus que le CNRS vient de remporter le 1^{er} prix des champions de l'égalité de l'Union européenne, dont le trophée ressemble à... une grosse médaille ! ■

FONDATION 



Donnons à la recherche
les moyens de ses ambitions.

SOUTENEZ-NOUS

Site web : fondation-cnrs.org

Par courrier à la Fondation CNRS : 3, rue Michel-Ange - 75016 Paris

CONTACTS

Téléphone : 01 44 96 44 49

E-mail : contact@fondation-cnrs.org

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS

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



Entrez dans
les coulisses
de la recherche



CNRS ÉDITIONS

www.carnetsdescience-larevue.fr