

Alondra Nelson

Sociologue, Princeton

METTRE EN ŒUVRE L'INNOVATION POUR TOUS

p.6



Patrice Simon

Chimiste, université Paul Sabatier, Toulouse

DES NOUVEAUX MATÉRIAUX POUR STOCKER L'ÉNERGIE

p.108

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE - AVRIL / JUIN 2022 - 9€90

SYMBIOSE
Les réseaux du vivant

Holobionte, parasitisme, mutualisme, mycorhize, microbiomes, étoiles, industries, modélisation p.16



Biologie

NEURONES ET NARCOLEPSIE

p.100

Géomatique

LES CARTOGRAPHES FACE À L'AMAZONIE

p.84

Géophysique

PRÉVOIR LES SÉISMES EN LABORATOIRE

p.92

Archéologie

LES SECRETS D'UN MANUSCRIT FRANCISCAIN

P.122

Mathématiques

LES TUNNELS GRAVITATIONNELS

p.72

LINKINNOV



Chercheurs, académiques, doctorants, posts-doctorants, **votre expertise a de la valeur.**

Réalisez facilement des missions d'expertise scientifique pour le compte d'entreprises innovantes, sans les contraintes de l'auto-entreprise.

Qu'est-ce que Linkinnov ?

Projet soutenu et financé par l'État, Linkinnov est un réseau social qui stimule la **connexion** entre les entreprises et les acteurs de l'enseignement supérieur et de la recherche. Objectif : encourager les collaborations, développer l'innovation et contribuer à répondre aux **défis sociétaux et environnementaux**.

Linkinnov offre aux entreprises et aux chercheurs académiques la possibilité de **se trouver**, d'**échanger** via un fil d'actualités, un chat ou des **groupes thématiques**, mais également de **contractualiser** pour des missions d'expertise scientifique, grâce à un modèle unique de "Match & Contract".

Mission d'expertise : pourquoi ? pour qui ?

Les chercheurs académiques possèdent, quelque soit leur domaine, une somme de connaissances indispensables aux entreprises pour mener à bien leurs **programmes d'innovation**. Il est encore compliqué pour ces entreprises d'identifier les compétences nécessaires et de contractualiser simplement et rapidement avec l'expert.

Chercheurs, Linkinnov vous offre un service sur-mesure pour faciliter votre implication dans la résolution de défis technologiques. Incrivez-vous en que **« Linkinnov Expert »,** et réalisez des expertises parmi ces catégories :

CONSULTANCE EN STRATÉGIE R&D
VEILLE TECHNO & ÉTAT DE L'ART
EXPERT MEDIA
ÉTUDE TECHIQUE
DUE DILIGENCE TECHIQUE
CONFÉRENCIER
EXPERTISE SCIENTIFIQUE DU CIR
FORMATION SPÉCIALISÉE
ÉTUDE SOCIOLOGIQUE & LINGUISTIQUE

Avantages du modèle Linkinnov



SIMPLE & RAPIDE

Épargnez-vous les contraintes du statut d'auto-entrepreneur

Un gain de temps considérable. Fini les démarches administratives, juridiques et comptables de l'auto-entreprise.



SÉCURISÉ

Bénéficiez d'un cadre légal, sécurisé et protecteur

Un cadre légal compatible avec le statut du chercheur et enseignant chercheur grâce à un CDD et une protection assurantielle sur-mesure.



RÉMUNÉRATEUR

Disposez d'un revenu personnel complémentaire

Des revenus additionnels dès la fin de la mission ainsi qu'une cotisation retraite complémentaire.



MAIS ENCORE...

Déclenchez des opportunités pour votre labo

Au délà de votre expertise, devenez ambassadeur de l'excellence scientifique de votre labo et susciter des contrats industriels.

INVESTIR L'AVENIR
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION
MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE DES FINANCES ET DE LA RELANCE
bpifrance
anr agence nationale de la recherche

www.linkinnov.com
connect@linkinnov.com
+33 1 76 50 02 20

Interactions et dépendance

Le bellicisme de Vladimir Poutine envers l'Ukraine résonne de manière tragique avec le dossier de ce numéro sur la symbiose. Dans la définition classique du dictionnaire *Le Robert*, il s'agit « *d'une association biologique, durable et réciproquement profitable entre deux organismes vivants* ». Mais toutes les variations sont possibles : mutualisme, commensalisme, dépendance… Le parasitisme, lui non plus, n'est pas très loin.

« *La symbiose apparaît comme un modèle de pensée* (…) *succès de tout un imaginaire, volontiers biomorphique, censé illustrer l'entrelacement du vivant* », raconte l'écrivain Vincent Zonca, passionné par le lichen (lire p. 18). Cette manière de regarder les manifestations de la vie au travers des réseaux d'interactions est nouvelle. C'est ce que nous apprennent les scientifiques invités à contribuer à ce dossier. Cette conception nous pousse à voir les organismes non pas comme des entités isolées, mais comme des systèmes « entrelacés », en lien avec les microbes qui nous habitent – le microbiote – et, plus généralement, avec tout notre environnement. C'est le concept d'« holobionte » ou supraorganisme. Filant la métaphore hors du champ de la biologie, on parle volontiers d'étoiles symbiotiques (lire p. 53), ou encore de symbiose industrielle (lire p. 56) pour désigner différentes entités qui bénéficient les unes des autres, s'échangent de l'eau, de l'énergie, etc., et où les déchets sont transformés en biens d'échange, imitant en cela les écosystèmes naturels.



Philippe Pajot
RÉDACTEUR
EN CHEF

La hausse des prix de l'énergie est une nouvelle illustration de ces réseaux de dépendance entre les acteurs : la consommation d'énergie augmente plus vite que l'offre, et les pays ont des besoins différents. Sans compter la fiscalité qui intervient, et désormais les problèmes de guerre en Europe qui risquent de tarir la source du gaz russe. Si nous ne sommes pas en symbiose, nos interdépendances sont patentes. Pour sortir de cette crise et s'affranchir des énergies fossiles, il est nécessaire d'engager des changements systémiques – réduction du besoin de transport et isolation des bâtiments – analyse Marie Dégremont (lire p. 134). Sans stratégie d'investissement à long terme, nous avons peu de chance d'y parvenir.

Quid de notre dépendance aux machines ? Là encore, on peut s'interroger sur la manière dont nous nous comportons avec nos téléphones portables, par exemple. Le philosophe Thierry Hoquet estime que nous serions handicapés sans ces artifices qui nous relient à des réseaux complexes (lire p. 55). Le handicap, justement, est sans doute le domaine où l'on peut le plus facilement imaginer des symbioses utiles. En quelques années, les progrès ont été immenses. Ainsi, l'équipe de Grégoire Courtine, à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse), a mis au point un implant qui, placé sur une zone de la moelle épinière et stimulé de manière adéquate, permet à des tétraplégiques de remarcher, même quand leur lésion médullaire est complète (lire p. 64). Vivre en symbiose avec nos artifices peut avoir de bons côtés.■

BERNARD MARTINEZ

SOMMAIRE

Avril / Juin 2022 - n° 569









3 Édito

6 **GRAND ENTRETIEN AVEC ALONDRA NELSON**
Directrice par intérim du Bureau de la politique scientifique et technologique de la Maison-Blanche, Washington DC (États-Unis)

« L'innovation pour tous »

14 Trois mois dans le monde

DOSSIER

16 **SYMBIOSE ET RÉSEAUX DU VIVANT**

18 Histoires d'une notion
Vincent Zonca

22 La symbiose à différentes échelles
Léna Hespel

24 « Nous sommes entrelacés avec des collectifs »
Entretien avec Éric Bapteste

28 Le plancton marin, un océan de symbioses
Johan Decelle et Fabrice Not

34 Une porte vers la dépendance ?
Marc-André Selosse

37 Modéliser l'évolution des interactions hôte-microorganisme
Benoît Perez-Lamarque et Hélène Morlon

40 Une nouvelle stratégie d'amélioration agricole *Manuel Blouin*

44 Plantes et microbes, un subtil équilibre
Cara H. Haney

46 La domestication des champignons du fromage
Jeanne Ropars et Tatiana Giraud

50 Une vie, une santé, une Terre
Mehdi Harmi

53 Étoiles symbiotiques : un destin explosif
Jean-François Haït

55 Humain-machine, des liens indéfectibles
Thierry Hoquet

56 Les symbioses industrielles ouvrent une nouvelle ère économique
Arnaud Diemer et Manuel Eduardo Morales

60 Paradoxes entre science et fiction
Bruno Corbara

62 Start up : à la recherche de médicaments vivants
Pierre Vandeginste

FONDAMENTAUX

64 **PORTFOLIO**
Vers l'humain augmenté
Grégoire Courtine

72 **MATHÉMATIQUES**
Les courants de gravité : un ticket gratuit pour l'exploration spatiale
Emmanuel Trélat

84 **GÉOMATIQUE** La géomatique pour rebattre les cartes de l'Amazonie
Matthieu Noucher et Laurent Polidori

92 **GÉOPHYSIQUE**
La rupture de failles, l'inconnue
François Passelègue, Federica Paglialunga et Alexandre Schubnel

100 **MÉDECINE**
La narcolepsie, trouble assommant
Christelle Peyron et Silvia Melzi

108 **CHIMIE**
« Le stockage de l'énergie est un vrai défi industriel »
Entretien avec Patrice Simon

116 **ASTRONAUTIQUE**
Soixante ans d'exploration du Système solaire *Léna Hespel*

122 **HISTOIRE**
Les trésors fascinants d'un manuscrit franciscain retrouvé
Nicole Bériou

LIVRES

130 La sélection de la rédaction

RÉFLEXIONS

134 Transition énergétique
Marie Dégremont

136 Numérique et IA *Liva Ralaivola*

137 La chronique dessinée *Boulet*

138 Éthique *Jean-Gabriel Ganascia*

SCIENCE ET FICTION

140 L'essor des langues fictives
Frédéric Landragin

Ce numéro comporte un encart abonnement sur les exemplaires kiosque.

2019 DAN KOMODA - DARIA FEDOROVA - MARC LESTER/AP/SIPA - COLLECTION CHRISTOPHEL / CBS TELEVISION STUDIOS





Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie

ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

SA0222



Entretien avec **Alondra Nelson**

DIRECTRICE PAR INTERIM DU BUREAU DE LA POLITIQUE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE DE LA MAISON-BLANCHE, WASHINGTON DC (ÉTATS-UNIS)

“L’INNOVATION POUR TOUS”

Anthropologue et sociologue, la scientifique a rejoint l’administration du président américain Joe Biden en janvier 2021. Elle est notamment en charge des questions éthiques et de l’intégrité scientifique. Défendant l’importance d’une science en accès libre, elle copréside le groupe de travail sur les données équitables. Enfin, Alondra Nelson s’intéresse en particulier aux nouveaux droits liés à l’intelligence artificielle et aux problèmes éthiques que cela pose.

La Recherche **Deux ans après le début de la pandémie de Covid-19, la situation semble s’améliorer, mais de façon inégale dans le monde. Êtes-vous inquiète des conséquences de cette pandémie et des inégalités d’accès aux soins qu’elle a mises en évidence pour de nombreuses catégories de la population, que cela soit aux États-Unis ou dans le monde ?**

Alondra Nelson Nous ignorons encore beaucoup de choses, car nous vivons toujours en pleine pandémie. J’espère, que lorsque celle-ci sera derrière nous, nous prendrons le temps d’étudier ses conséquences de manière plus approfondie. Nous comptons sur les chercheurs pour nous aider à les comprendre. Par exemple, nous voulons être en mesure de mener des recherches rigoureuses sur ses effets sur la santé mentale et sur un certain nombre d’autres questions qui ont émergé, comme celles portant sur cette maladie au long cours, appelée Covid long. Nos vies telles que nous les connaissions ont radicalement changé depuis 2020, l’année de l’émergence du Covid-19. Aux États-Unis, la pandémie a mis en évidence des formes d’inégalités, certaines bien connues et d’autres dont nous n’avions pas pleinement conscience.

Pouvez-vous en donner des exemples ?

Les soins de santé, par exemple. C’est une préoccupation majeure de l’administration Biden-Harris *[Joe Biden, président des États-Unis et Kamala Harris, vice-présidente, NDLR]*, en particulier les obstacles à l’accès aux soins de santé et à l’égalité de traitement. Nous avons élargi la loi sur la protection et les soins abordables *[surnommée Obamacare, NDLR]* :

2019 DAN KOMODA

près de 3 millions de personnes supplémentaires bénéficient désormais d'une couverture par l'assurance maladie (1). Le plan de sauvetage américain de 2021 *[un plan de relance économique de près de 2 000 milliards de dollars signé par Joe Biden en mars 2021, NDRL]* a fourni une aide aux plus démunis pour payer la couverture des soins de santé et faire baisser les primes d'assurance maladie. Mais d'après des témoignages – en particulier au début de la pandémie –, des personnes qui possédaient une couverture médicale, souvent des Afro-Américains ou des Latinos, n'ont toujours pas reçu de soins appropriés. La question de la discrimination dans l'accès aux traitements reste d'actualité. Bien des réalités ont été mises en lumière, et le gouvernement peut jouer un rôle pour aider à changer les choses.

Que pensez-vous de la place des femmes dans la recherche et la technologie aux États-Unis et dans le monde ? Quelles dispositions peuvent être prises pour améliorer la situation ?

Il s'agit d'une question importante pour l'avenir de la société. Comment ouvrir à dessein des voies à quiconque souhaite s'intéresser à la science et à la technologie par curiosité, par vocation ou pour faire carrière dans la recherche ? L'administration Biden-Harris s'est engagée à faire progresser l'équité dans le domaine des sciences et de la technologie, et cela inclut l'élargissement des voies d'accès pour les femmes. Nous avons des exemples extraordinaires de la manière de bien faire. Le département d'informatique de l'université Carnegie Mellon, à Pittsburgh (Pennsylvanie), a réussi à augmenter en quelques années la proportion de femmes dans ses programmes (2). Le Harvey Mudd College, en Californie, dirigé par la chercheuse en informatique Maria Klawe, a également mis en place des pratiques exemplaires et efficaces.

Que pourrait-on faire à plus grande échelle ?

Lorsque nous analysons la conception des programmes, la pédagogie, l'enseignement et la culture institutionnelle, nous constatons qu'ils ne s'adressent pas à un large panel d'étudiants. L'approche de la pédagogie et de l'enseignement a été fondée sur la rareté plutôt que sur l'abondance. Un changement total d'orientation est donc nécessaire. Dans des établissements comme Carnegie Mellon et le Harvey Mudd College, ainsi que dans l'incroyable groupe de collèges et d'universités historiquement noirs, ou indiens *[Tribal Colleges and Universities, des établissements destinés aux Indiens de toutes les tribus, NDLR]* en Amérique du Nord, de petits changements dans la culture institutionnelle et les programmes d'études peuvent faire une grande différence. La mise en place de cohortes, de programmes d'études en groupe ou axées sur l'inclusion dans le travail plutôt que sur la compétition, peut aider à faire progresser non seulement les femmes, mais aussi d'autres personnes n'ayant jamais été intégrées dans les domaines scientifiques et technologiques. Nous devons développer une pédagogie inclusive.

Pouvez-vous donner des exemples de cette pédagogie inclusive ?

Pensez à des séries télévisées comme *The Big Bang Theory* ou *Silicon Valley,* dans lesquelles sont mis en avant la culture geek et un type très particulier de communauté autour de l'informatique. Or la culture geek peut être rebutante pour certains. D'autres cultures de la science, de la technologie et de l'informatique existent. On peut s'y impliquer de mille et une façons ; il faut en être conscient et en tirer parti : par exemple, en soulignant les contributions des femmes de couleur à l'histoire informatique ou en reconnaissant les expériences vécues que les individus de tous les milieux socio-économiques ou géographiques apportent à l'informatique et à la technologie. On doit tenir compte aussi de l'« apprentissage caché », cet ensemble de savoirs essentiels, non inclus dans les programmes, mais liés à l'éducation. Cela présuppose que chacun connaisse les rouages des universités et des collèges, comme les membres de la classe moyenne supérieure ou de l'élite pour qui cela va de soi. Au contraire, rendons ces savoirs accessibles au plus grand nombre.

Abordons le cas des outils technologiques génétiques récents, comme les ciseaux moléculaires CRISPR-Cas9. Ne devrait-on pas mettre en place un moratoire sur l'utilisation de ces outils qui permettent de modifier le génome ?

Distinguons l'édition de gènes héréditaires de celle de gènes qui ne le sont pas. La seconde

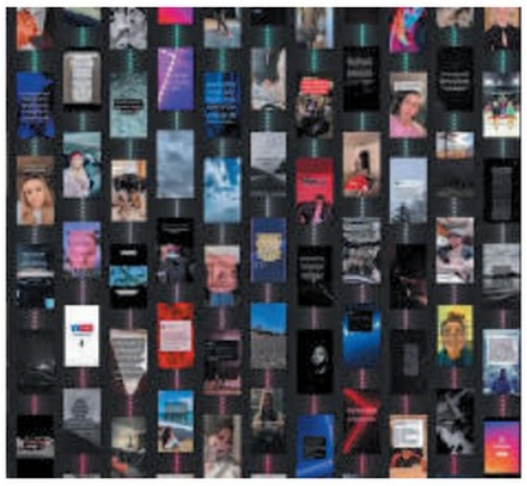
BIO

- **1968** Naissance à Bethesda (Maryland, États-Unis).
- **1994** Licence en anthropologie.
- **2003** Docteure en études américaines.
- **2003** Professeure assistante de sociologie et d'études afro-américaines à l'université Yale, à New Haven.
- **2009** Professeure associée de sociologie et d'études de genre à l'université Columbia, à New York.
- **2013** Professeure de sociologie et d'études de genre à l'université Columbia.
- **2014** Première doyenne des sciences sociales à l'université Columbia.
- **2016** Autrice de *The Social Life of DNA : Race, Reparations, and Reconciliation After the Genome* (Beacon Press).
- **2017** Nommée présidente du Conseil de la recherche en sciences sociales.
- **2019** Professeure et titulaire de la chaire Harold F. Linder à l'Institut des études avancées à Princeton.
- **2021** Nommée directrice adjointe pour la science et la société au Bureau de la politique scientifique et technologique (OSTP) de la Maison-Blanche à Washington.
- **2022** Nommée directrice par intérim de l'OSTP (au moment de l'interview, elle était encore directrice adjointe).

†

« La difficile définition de l'équité en IA »

Les biais algorithmiques sont des problèmes récurrents de d'intelligence artificielle. Ces anomalies, discriminantes parfois envers certaines catégories de la population, peuvent naître de données incomplètes qui ont servi à entraîner les modèles. Les recherches sur ces biais sont maintenant anciennes, et on parvient dans la plupart des cas à les corriger. Les chercheurs tiennent compte de ce paramètre, y compris dans les grosses entreprises du numérique – Microsoft, Google ou Meta.
Une grande partie des travaux théoriques se concentre sur des décisions binaires pour l'octroi de prêts bancaires par exemple. Une autre



▲ *Sur des sites de recommandations, un algorithme mal entraîné est subjectif.*

porte sur les systèmes de recommandation, ces applications qui suggèrent articles, musique, recrutements (mise en relations de candidats et d'employeurs), etc. Comment éviter que certains groupes sociaux y capturent toute l'attention ? « *Tout d'abord, ajoutons des contraintes d'égalité, imposons que, dans les résultats d'une recherche, apparaissent autant de femmes que d'hommes,* explique Virginie Do, en thèse à l'université Paris-Dauphine-PSL. *Comment définir la notion d'équité ? Par exemple, sur les plateformes de rencontres, certaines préférences des usagers sont en conflit avec des critères d'égalité recherchés.* » De même, lors une recherche internet de « PDG », très peu de noms de femmes s'affichent. Faut-il conserver ce type d'algorithme qui reflète une réalité française ou bien faire de la discrimination positive ? Aux concepteurs de choisir. La notion d'équité reste subjective. Même en la précisant, peut-on toujours l'appliquer ? Prenons le cas de ces plateformes de recommandations de contenu, par exemple de musiciens sur Spotify ou de restaurants sur Google Maps. Si chaque usager ne peut connaître une satisfaction identique, il faut a minima veiller à ce que les contraintes d'équité imposées par les producteurs de contenu ne pénalisent pas les utilisateurs les moins privilégiés. « *Dans ce cadre, nous avons pu trouver une approche mathématique qui satisfait toujours notre définition d'équité* », conclut Virginie Do. ■

Ph. P.

(1) V. Do *et al.*, *Two-Sided Fairness* in *Rankings via Lorenz Dominance*, NeurIPS, 2021.

possède un certain potentiel thérapeutique – dans le cas des maladies génétiques par exemple – et constitue un moindre danger pour la société. En revanche, les Instituts américains de la santé des États-Unis (NIH) ont adopté une position très ferme sur l'édition héréditaire du génome, c'est-à-dire l'édition de gènes capables non seulement de modifier un profil génétique familial, mais aussi celui de l'humanité. Pour celle-ci, la discussion doit être globale et planétaire. Comme celle du changement climatique, cette question concerne l'humanité entière. Une large consultation est nécessaire. Chaque communauté peut faire des choix différents en matière de moratoires sur l'édition de gènes humains. Une législation nationale sur une question de portée mondiale ne suffit pas. Ainsi, en 2019, les premières expériences sur des bébés en vue de changer leur génome, les « bébés CRISPR », ont eu lieu. Plusieurs scientifiques ont d'ailleurs proposé un moratoire sur ce type d'édition du génome (3). Mais moratoire ou non, cette technologie existe et soulève de profondes questions éthiques, politiques et sociales.

La progression rapide de l'intelligence artificielle (IA) ces dernières années et son utilisation de plus en plus étendue soulèvent une interrogation. L'IA peut se révéler très utile, mais on peut légitimement s'inquiéter des préjugés qu'elle induit envers certains genres ou groupes minoritaires.
Que peut-on faire pour empêcher son utilisation abusive ou partiale ?

De multiples travaux de recherche et rapports ont été consacrés à ce que l'on nomme les « biais

DR



“Nous devons essayer d’anticiper les conséquences possibles de la technologie pour tous les utilisateurs”

algorithmiques » (*), notamment aux bases de données de référence utilisées pour l’IA. En effet, celles-ci peuvent avoir un impact important sur les communautés souvent marginalisées aux États-Unis. Ainsi les assistants vocaux, tels Siri ou Alexa, ne reconnaissent pas tous les accents ; certains systèmes de reconnaissance faciale identifient de manière erronée des visages afro-américains, pouvant conduire à des arrestations iniques. L’approche sociotechnique du biais algorithmique fait partie des problèmes à résoudre, mais nous devons également tenir compte de manière plus large des conséquences en aval dans le processus de recherche et de développement. Dans le cadre de notre travail à l’OSTP *[Office of Science and Technology Policy, NDLR]*, nous essayons ainsi de faire en sorte que la politique en matière d’IA, et plus généralement la politique technologique, tienne compte des conséquences – bonnes et mauvaises – de l’innovation sur la vie des gens. On ne peut pas prédire l’avenir. Mais nous devons essayer d’anticiper les conséquences possibles de la technologie, non seulement pour les utilisateurs qui ont conçu ces systèmes et les connaissent particulièrement bien, mais aussi pour les personnes qui ne sont pas impliquées dans cette création mais qui devront vivre avec leurs effets. Maintenir les questions de démocratie, d’équité et de droits humains dans les discussions sur le développement de l’IA est l’un des défis auquel nous sommes confrontés, mais c’est en même temps une opportunité.

La suppression des préjugés dans les algorithmes d’IA serait-elle justement un premier pas vers plus de démocratie et d’équité ?

Prenons l’exemple d’un algorithme conçu pour nous aider à prédire la météo et adaptons-le à la police prédictive. Nous pouvons constater un biais dans un contexte qui ne serait pas un biais dans un autre : un biais conduisant à une mauvaise prédiction en police prédictive n’aura pas la même conséquence pour la prédiction météo ! Ou encore des biais similaires dans l’infrastructure technique peuvent avoir des conséquences très différentes sur l’expérience vécue des gens. Les algorithmes sont souvent intégrés dans des systèmes dynamiques, de sorte que si l’on supprime un biais dans un cas, il peut apparaître ailleurs dans le système. Dans un tel contexte, nous devons élaborer une politique scientifique et technologique qui soit itérative et dynamique, de la même manière que la technologie elle-même est itérative et dynamique.

Que pensez-vous du mouvement dit des « antivax », qui s’oppose notamment à la vaccination contre le Covid-19 ? Il est assez présent en France et dans le monde, et ses partisans font entendre leur voix. Comment aborder le problème ?

Avant d’entrer au gouvernement, j’étais une spécialiste des inégalités en matière de santé.

(*) Un biais algorithmique désigne le fait que le résultat d’un algorithme ne soit pas neutre, loyal ou équitable.

2019 DAN KOMODA

Certaines communautés ont toujours été méfiantes à l'égard du gouvernement et des institutions de soins. Je suis donc bien placée pour savoir que l'opposition à la vaccination n'est pas un phénomène nouveau. Le gouvernement doit être honnête quant aux circonstances historiques qui ont amené les gens à se méfier et quant au fait que les gens n'ont pas tort de dénoncer cette situation. Rappelons que, dans les années 1940, l'étude dite Tuskegee portant sur des hommes afro-américains atteints de la syphilis ne leur fournissait pas de pénicilline, alors qu'il s'agissait du traitement recommandé. Et il y a eu bien d'autres comportements non éthiques dans notre histoire. Aux États-Unis, depuis des générations, nous avons des exigences en matière de vaccination, y compris à l'école et à l'université. Malgré le mouvement antivax et la désinformation, la majorité des Américains sont cependant de plus en plus vaccinés *[65 %, NDLR]* et plus de 76 % ont reçu au moins une dose de vaccin contre le Covid-19. Une partie de ce contexte historique est perdue lorsque nous nous concentrons uniquement sur le mouvement antivaccin.

Comment faire pour que la collecte de données soit juste et que les données soient aussi disponibles pour tous ?

Les données ouvertes sont un moyen important de responsabiliser le gouvernement envers les publics qu'il sert. Le gouvernement doit rendre les données accessibles, mais aussi utilisables afin que chaque citoyen puisse les contextualiser ou les utiliser pour répondre aux questions qu'ils jugent importantes. Ainsi, nous devons non seulement garantir l'accès aux données, mais aussi mettre en place des aides à la visualisation, des tableaux de bord et autres outils permettant de s'y retrouver. Au cours de la pandémie de Covid-19, des personnes ont élaboré leurs théories sur la maladie et la santé publique. La question est aujourd'hui de savoir comment nous pouvons fournir facilement des informations et des données pour aider les gens à s'informer de façon fiable. Cela ne veut pas dire que nous allons nécessairement faire changer les esprits ou les orienter tous vers la même conclusion. Mais il est important d'être transparent.

Pourriez-vous donner un exemple de ce que signifie la collecte de données équitables ?

Le premier jour de son mandat, le 20 janvier 2021, le président Joe Biden a signé un décret (5) chargeant le gouvernement de mettre en œuvre des politiques et des pratiques qui favorisent l'équité raciale et les occasions pour les communautés moins bien servies, notamment les personnes handicapées, les vétérans, les communautés rurales et les communautés LGBTQ, en plus des communautés de couleur. Ce décret prévoit notamment la création du Groupe de travail sur les données équitables (*Equitable Data Working Group*), que je copréside.

Lorsqu'un programme gouvernemental est lancé, comment savoir s'il atteint équitablement les communautés qui en ont besoin ?

Ces fonds parviennent-ils aux personnes qui en ont le plus besoin ou seulement à celles qui disposent de ressources et de stratégies pour y accéder ? Pour effectuer ce type d'évaluation de l'équité, il est nécessaire de disposer de données différentes ou plus nombreuses que celles collectées actuellement au sein du gouvernement, ou d'établir de nouveaux liens entre les données existantes – toujours en préservant la vie privée – de manière à pouvoir répondre à ces questions importantes. L'équité et la justice sont souvent des propositions éthiques théoriques mais, dans certains cas, elles peuvent aussi être posées par le gouvernement comme des questions empiriques. Disposer des bonnes données peut nous aider à y contribuer.

L'une de vos grandes préoccupations est d'aborder la question de la discrimination due aux technologies émergentes. Que comptez-vous faire à ce sujet ? Avez-vous un calendrier ?

En octobre 2021, nous avons lancé une initiative baptisée « *The Time is Now* » afin d'étudier les questions d'équité dans les sciences et les technologies (6). Nous avons donné le coup d'envoi de cette initiative par une série d'engagements au cours desquels l'OSTP a cherché à entendre directement les membres de la communauté des personnes handicapées, les personnes impliquées dans le travail sur la discrimination et l'antiracisme dans les domaines de la science et de la technologie, et d'autres parties prenantes engagées à faire progresser l'équité

(1) tinyurl.com/2p8d3j6c

(2) A. Fisher et J. Margolis, *ACM SIGCSE Bulletin, 34*, 79, 2002.

(3) E. Lander *et al.*, *Nature, 567*, 165, 2019.

(4) https://covid.cdc.gov/covid-data-tracker

(5) tinyurl.com/2p9hvxu2

(6) tinyurl.com/2p8afstt

dans la science et la technologie. Pour le bien de la démocratie, de la compétitivité, de la créativité, et plus encore, nous devons créer davantage d'occasions pour quiconque souhaite s'asseoir à la table de l'innovation et mesurer son succès, en partie en fonction de sa capacité à favoriser l'équité et l'inclusion. Il incombe au gouvernement de soutenir cette démarche. Le nom de l'initiative – « *The Time is Now* » – souligne le sentiment d'urgence quant aux types de transformation attendus.

En tant que sociologue, quel rôle pouvez-vous jouer pour contribuer à la justice et aux nouvelles opportunités pour tous ?

Comprendre la dynamique institutionnelle, politique et comportementale de l'adoption du vaccin pendant la pandémie de Covid-19 est un exemple de la manière pour les sociologues, et les spécialistes des sciences sociales en général, de jouer leur rôle. Il y a énormément de questions liées à l'utilisation des vaccins et aux communautés antivax : celle du comportement personnel ; celle de l'engagement de la santé publique et des systèmes médicaux ou encore de l'inégalité en matière de santé. Les sciences sociales ont une riche tradition de théorie et de recherche qui peut nous aider à mieux comprendre ces questions.

Des scientifiques et des décideurs politiques du monde entier se sont réunis à l'automne 2021 à Édimbourg (Écosse) pour la COP26 avec une déclaration finale pour le climat mitigée. À quoi ressemble l'équipe chargée du climat à la Maison-Blanche ?

Le changement climatique est une priorité de l'administration Biden-Harris. Cela se traduit par une politique mais aussi par la mobilisation de nombreux experts et décideurs. Un département lui est dédié à la Maison-Blanche, dirigé par Gina McCarthy, la conseillère du président pour le climat. Et dans mon département – l'Office of Science and Technology Policy – pour la première fois, un service se consacre au climat et à l'environnement, dirigé par Jane Lubchenco. Cette équipe compte 24 personnes spécialistes du climat, tant du point de vue de l'économie, de la physique, de la météorologie que de la justice environnementale. Le Conseil de la qualité de l'environnement à la Maison-Blanche, l'Agence de protection de l'environnement et de nombreux autres départements et agences se penchent aussi sur ce sujet. On peut affirmer qu'aucune administration américaine ne s'est jamais autant engagée à relever les défis posés par le changement climatique. Beaucoup de travail reste encore à faire. Il ne faut pas perdre de temps.

Que pensez-vous des relations entre les États-Unis et la Chine en ce moment ?

Pour le président des États-Unis, la concurrence avec la Chine est l'une des principales priorités. Par essence, la recherche scientifique et technologique est collaborative. Le point central est donc de savoir garder la recherche ouverte mais sécurisée. Le travail de l'administration actuelle est de parvenir à trouver cet équilibre.

Enfin, comment vous sentez-vous à ce poste dans l'administration Biden-Harris ? Améliorer l'égalité et l'éthique semble être une tâche très lourde. Vous sentez-vous optimiste ?

Je suis chercheuse. Ma nomination à la Maison-Blanche m'a paru être une chance incroyable de faire de la science et de la technologie un outil pour un monde meilleur, et pour le plus grand nombre ! Quand on croit sincèrement au pouvoir de l'innovation, on est capable de la mettre au service de tous, et en particulier dans les domaines d'équité et de justice. Je mets beaucoup d'espoir dans cette nouvelle manière dont on peut développer la politique scientifique et technologique. Donc, oui, je suis très optimiste. ■

Propos recueillis par Philippe Pajot

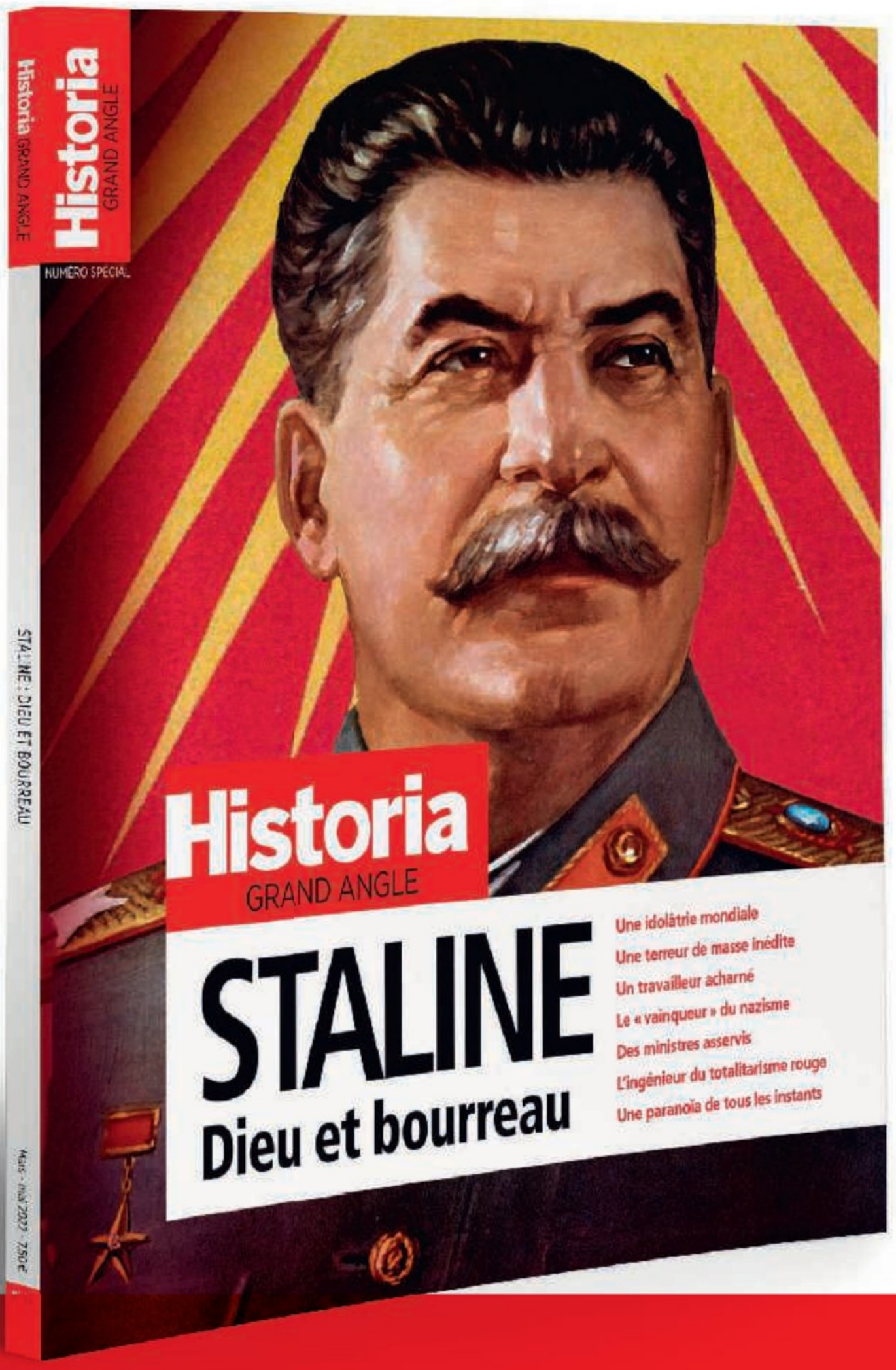
“Quand on croit sincèrement au pouvoir de l'innovation, on est capable de la mettre au service de tous”

Historia
GRAND ANGLE

NOUVEAU

Magazine-livre

TRIMESTRIEL



HISTORIA GRAND ANGLE, c'est un rendez-vous de référence avec les meilleurs historiens, un point de vue qui cerne l'essentiel, une grille chronologique, un lexique pour ne jamais perdre pied et un traitement visuel privilégié : nombreuses infographies et illustrations.

Ce sont aussi des rubriques inédites : un fait divers, une BD, des textes bruts, un récit gastronomie, un fact-checking...

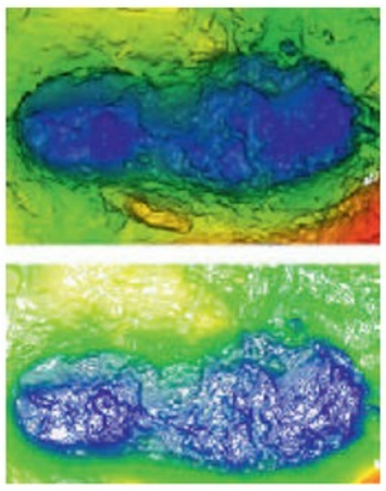
Des histoires au service de l'Histoire.

CHEZ VOTRE MARCHAND DE JOURNAUX ET CHEZ VOTRE LIBRAIRE

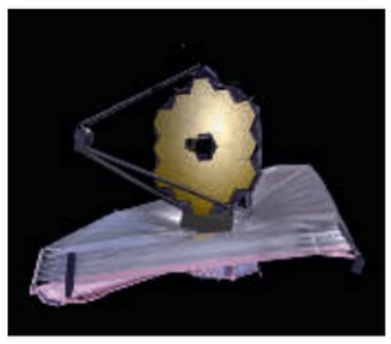
Fut-il le chef militaire de génie qui fit chuter Hitler ? Fut-il l'inventeur d'un système totalitaire inédit où la purge permet de renouveler les élites ? Reste-t-il la référence nationaliste russe inégalable pour le Kremlin en 2022 ? HISTORIA GRAND ANGLE a mis à plat cet enchevêtrement de cauchemars et de rêves dont Staline fut porteur.

TROIS MOIS DANS LE MONDE

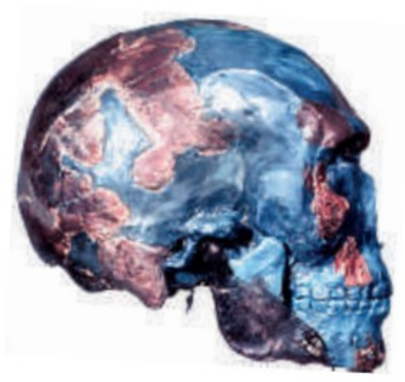
Avec le lancement du tant attendu télescope spatial James-Webb, la science s'est offert un beau cadeau de Noël ! Plus des annonces de découvertes archéologiques d'importance et de prouesses médicales.



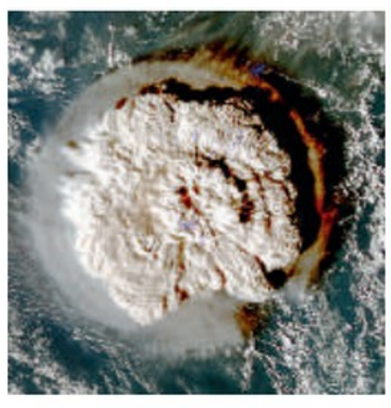
▲ 23 novembre
La première trace de l'usage de chaussures.



▲ 25 décembre
Tout va bien pour le télescope James-Webb.



▲ 12 janvier
Le plus vieux fossile d'*Homo sapiens* connu.



▲ 15 janvier
Îles Tonga : une éruption visible de l'espace.

23 NOVEMBRE

Dans la grotte de Cussac, en Dordogne, sept traces de pied figées dans l'argile témoignent qu'il y a au moins 30 000 ans, des hommes préhistoriques portaient des chaussures souples.

L. Ledoux *et al.*, *Sci. Rep.*, *11*, 22727, 2021.

26 NOVEMBRE

Il existe des noyaux atomiques d'un nouveau genre exclusivement composés de neutrons. Ces « tétraneutrons » sont obtenus par la réaction de transmutation du lithium 7 en carbone 10.

T. Faestermann *et al.*, *Phys. Lett. B*, *824*, 136799, 2022.

13 DÉCEMBRE

Le gène *Cirop* serait responsable de la position du cœur dans la cage thoracique des vertébrés. S'il est récessif, le cœur perd la polarité droite-gauche et peut se retrouver à droite.

E. Szenker-Ravi *et al.*, *Nat. Genet.*, *54*, 62, 2022.

25 DÉCEMBRE

Après moult reports et un budget sans cesse revu à la hausse, le télescope spatial James-Webb est enfin lancé. Il a atteint sans encombre le point de Lagrange L2, sa destination finale à 1,5 million de kilomètres de la Terre, le 24 janvier.

tinyurl.com/Insertion-James-Webb

7 JANVIER

Grande première : opéré à l'université du Maryland (États-Unis), David Bennett, 57 ans, a reçu un cœur provenant d'un porc génétiquement modifié.

tinyurl.com/Greffe-de-coeur

12 JANVIER

Une étude menée par une équipe de l'université de Cambridge (Royaume-Uni) repousse à 230 000 ans au moins l'âge du crâne d'Omo 1, découvert en Éthiopie en 1967 et dont la datation restait incertaine. Cela en fait le plus vieux fossile d'*Homo sapiens* avéré à ce jour.

C. M. Vidal *et al.*, *Nature*, *601*, 579, 2022.

14 JANVIER

Les Kungas, premiers animaux hybrides utilisés par l'humain, sont apparus au moins 2 500 ans avant notre ère en Mésopotamie. Un croisement entre une ânesse domestique et un âne sauvage.

E. A. Bennett *et al.*, *Sci. Adv.*, *8*, eabm0218, 2022.

15 JANVIER

Le volcan Hunga Tonga–Hunga Ha'apai subit la plus importante éruption jamais enregistrée. La puissance de l'explosion est estimée à 500 bombes d'Hiroshima.

tinyurl.com/Volcan-Tonga

20 JANVIER

Au large de Tahiti, à plus de 30 mètres de profondeur, un récif corallien long de 3 kilomètres a été découvert dans un état vierge.

tinyurl.com/recif-corallien-tahiti

21 JANVIER

Le virus Epstein-Barr, responsable de la mononucléose, est associé à l'apparition de la sclérose en plaques (SEP). Des analyses menées sur plus de 10 millions de soldats américains révèlent que les 955 qui ont développé la SEP avaient contracté le virus auparavant.

K. Bjornevik *et al.*, *Science*, *375*, 296, 2022.

26 JANVIER

Le centre de notre galaxie se dévoile comme jamais. La photo, prise grâce au radiotélescope MeerKAT, basé en Afrique du Sud, montre pour la première fois des restes de supernovae et des filaments radio, dont l'origine reste inconnue.

tinyurl.com/MeerKAT-Telescope

2 FÉVRIER

Le MIT présente un matériau bidimensionnel plus léger que le plastique et deux fois plus résistant que l'acier. Ce polymère de mélamine tient ses propriétés de sa structure. Applications possibles : nanofiltration, séparation des gaz, etc.

Y. Zeng *et al.*, *Nature*, *602*, 91, 2022.

PACEA, BORDEAUX - NASA - SPL / NATIONAL HISTORY MUSEUM, LONDRES / SUCRÉ SALÉ - EYEPRESS NEWS / AFP

7 FÉVRIER

Trois ans après une première réussie, l'espoir se confirme : grâce à une stimulation électrique épidurale médiée par des implants au niveau des racines dorsales, des chercheurs suisses permettent à trois nouveaux patients de retrouver en partie l'usage de leurs jambes.

A. Rowald *et al., Nat. Med., 28,* 260, 2022.

8 FÉVRIER

Les espèces d'arbres présentes sur Terre seraient au nombre de 73 000, dont 9 200 environ resteraient à découvrir. 40 % de ces espèces inconnues se situeraient en Amérique du Sud.

R. Cazzolla Gatti *et al., PNAS, 119,* e2115329119, 2022.

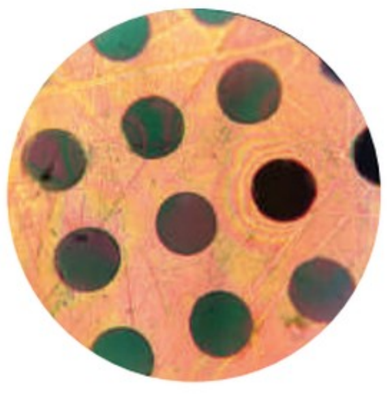
9 FÉVRIER

▶ Le président du CNRS, Antoine Petit, est reconduit à la tête de l'organisme pour un second mandat.

tinyurl.com/petit-second-mandat

▶ Une dent de lait et des artefacts lithiques provenant de la grotte Mandrin (Drôme) révèlent la plus ancienne présence connue d'*Homo Sapiens* en Europe, entre – 56 800 et – 51 700 ans, soit environ 10 000 ans plus tôt que ce que l'on pensait. L'étude montre aussi qu'*Homo Sapiens* et Néandertal se seraient croisés dans cette région à cette époque.

L. Slimak *et al., Sci. Adv., 8,* eabj9496, 2022.



▲ 2 février
Un polymère entre acier et plastique.



▲ 7 février
L'implant qui redonne la liberté de marcher.

AU FIL DES TWEETS

Ce trimestre, les scientifiques ont parlé planètes errantes, occupation des terres agricoles ou encore modélisation sur le réseau social de micro-messages.

Sean Raymond (@sraymond_astro), *astronome à l'université de Bordeaux* évoque une découverte récente sur les planètes errantes. Les résultats d'analyses nous éclairent sur ces objets célestes mal connus qui pourraient être plus nombreux qu'on ne le croit.
tinyurl.com/sean-raymond

Valérie Masson Delmotte (@valmasdel), *paléoclimatologue, directrice de recherche au CEA*
La coprésidente du groupe n°1 du GIEC, habituée des débats avec les décideurs et les journalistes, raconte son expérience du *« décalage entre le mode de fonctionnement des scientifiques et celui des médias et du pouvoir politique »*. Un fil inspiré par le visionnage du film de Netflix, *Don't Look Up*.
tinyurl.com/valmasdel

Vittoria Colizza (@vcolizza), *biostatisticienne à l'Inserm*
À l'aide de modèles récents, la chercheuse revient sur l'importance du dépistage proactif d'Omicron chez les enfants scolarisés par rapport au dépistage réactif en cours dans les écoles françaises : *« Record de cas d'Omicron chez les enfants et protocoles scolaires : 1) les tests réactifs utilisent des ressources comparables à celles des tests hebdomadaires, mais pour un contrôle beaucoup plus faible ; 2) la fermeture réactive de classe double les journées d'école perdues. »*
tinyurl.com/vcolizza

Pim Huis in't Veld (@ApieFrmScratch), *post-doctorant à l'université de Dortmund (Allemagne)*



nous parle d'Ulrich K. Laemmli. Professeur aux départements de biochimie et de biologie moléculaire à l'université de Genève, il décrit pour la première fois en 1970 une technique de séparation des protéines par électrophorèse, le SDS PAGE. L'article, qui lui vaudra près de 300 000 citations, est devenu l'un des plus cités de tous les temps.
tinyurl.com/ph-int-veld

Nicolas Jourdain (@nicojourd), *chercheur à l'institut des géosciences de l'environnement de Grenoble* se félicite que les modélisations des systèmes climatique et océanique terrestres incluent enfin les données relatives à la dynamique des glaces polaires. Une avancée obtenue *« après de nombreuses années de développement »*.
tinyurl.com/nico-jourd

Adrien Luyckx (@Hcomosa), *doctorant en physiologie végétale à l'université catholique de Louvain (Belgique)* lit avec pessimisme le récent article de *Nature Food,* qui explique comment des images satellite des vingt dernières années ont permis d'estimer la superficie occupée par les terres agricoles à l'échelle de la planète.
tinyurl.com/aluyckx

À VENIR

DU 16 AVRIL AU 4 SEPTEMBRE LA CITÉ DE L'ARCHITECTURE ET DU PATRIMOINE, À PARIS, ACCUEILLE L'EXPOSITION « MACHU PICCHU ET LES TRÉSORS DU PÉROU ». UNE PLONGÉE DANS CE SITE ET DANS L'UNIVERS DES ANCIENNES SOCIÉTÉS ANDINES, AU TRAVERS DE 190 PIÈCES ARCHÉOLOGIQUES ET DE DISPOSITIFS VIRTUELS.
https://tinyurl.com/expo-m-picchu

DU 16 AU 20 MAI SE TIENT SUR LA PRESQU'ÎLE DE GIENS LE 15e COLLOQUE NATIONAL EN CALCUL DES STRUCTURES. NUMÉRICIENS, THÉORICIENS ET CHERCHEURS DISCUTERONT NOTAMMENT DE L'ÉVOLUTION DE LA MÉCANIQUE NUMÉRIQUE EN FRANCE À L'HORIZON 2040.
https://tinyurl.com/CSMA-2022

4 JUIN LA VILLA MÉDITERRANÉE, À MARSEILLE, ACCUEILLE LA RESTITUTION DE LA GROTTE COSQUER, DONT LA CÉLÈBRE MAIN ROUGE.
https://tinyurl.com/Grotte-Cosquer

CHRISTINE DANILOFF, MIT - NEURORETORE / JIMMY RAVIER - DR

SYMBIOSE ET RÉSEAUX DU VIVANT

Vu au travers du microscope optique, au XIXe siècle, le monde du vivant a intrigué les naturalistes par de surprenantes organisations au niveau cellulaire. Certains organismes d'espèces différentes vivent telles des poupées russes : des algues imbriquées, des champignons, des bactéries intégrées dans des cellules eucaryotes planctoniques. Ces observations ont donné lieu à de passionnants débats sur la nature des relations : symbiose, parasitisme… Ils se poursuivent encore. Les progrès de la microscopie électronique et le développement du séquençage ont dévoilé la richesse des interactions qui se jouent entre les êtres vivants à de multiples échelles. Les humains dépendent de leur microbiote intestinal, mais également de l'état de santé du plancton qui produit une bonne part de notre oxygène. Par ailleurs, très vivace, le concept de symbiose est sorti du champ de la biologie pour investir d'autres domaines comme l'astronomie ou l'économie.

DARIA FEDOROVA

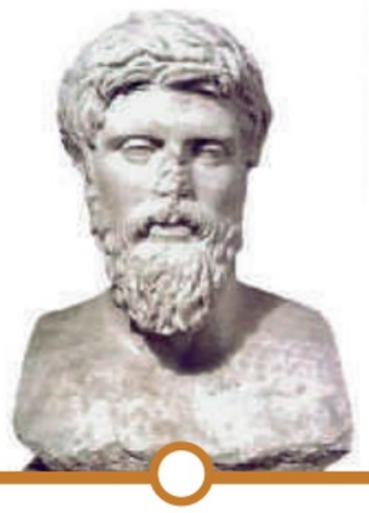
◀ *L'artiste russe Daria Fedorova compose ses œuvres en faisant croître des bactéries et des champignons qui interagissent avec, pour résultat, des tableaux colorés (ici,* Mold Fungi studies 1*).*

Histoires d'une notion

Définie au XIXe siècle, après l'observation de divers organismes comme le lichen, la symbiose illustre la complexité des interactions dans le monde du vivant et le renouveau d'une pensée du lien. Vincent Zonca, auteur d'un essai sur les lichens, revient sur l'histoire et les enjeux de ce concept.

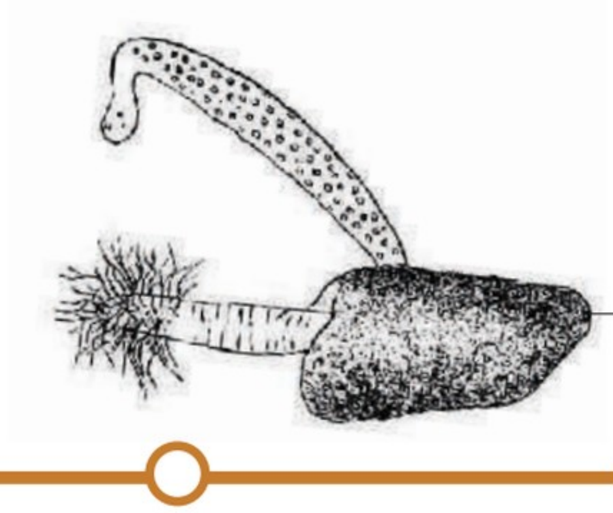
Depuis peu, le mot « symbiose »est à la mode. Cette notion définie il y a un siècle et demi au cœur d'âpres et complexes débats scientifiques, se popularise subitement chez ceux qui relèvent de nouveau l'importance de l'interaction au sein du vivant. En 2015 paraît *La Vie secrète des arbres* (Les Arènes, 2017, pour la traduction française), de l'ingénieur allemand Peter Wohlleben. Consacré aux champignons mycorhizes, évoquant et rêvant les réseaux de coopération racinaire dans le sol des forêts, le livre devient un bestseller. En 2017, l'ingénieure agronome française Isabelle Delannoy propose « l'économie symbiotique » comme alternative au capitalisme. Tandis que les agronomes Gauthier Chapelle et Pablo Servigne publient *L'Entraide, l'autre loi de la jungle* (éditions Les liens qui libèrent). On retrouve la symbiose, en 2020, dans les installations du célèbre artiste islando-danois Olafur Eliasson, intitulées *Vision sym-*

D. R. - WELCOME COLLECTION - D. R. - F. LE TACON



Ier siècle apr. J.-C.

Plutarque (46-125) réunit, dans son Traité de l'intelligence des animaux, *plusieurs cas d'animaux vivant en « société ».*



1866-1867

Découverte de la nature double du lichen et de la « théorie algo-lichénique » par les botanistes allemand Heinrich Anton de Bary et suisse Simon Schwendener.



1874-1875

Définition du concept de « commensalisme », par le zoologue belge Pierre-Joseph Van Beneden, qui publie Les Commensaux et les parasites dans le règne animal.

1875-1878

P. J. Van Beneden, A. B. Frank et H. A. de Bary fixent un nouveau concept et créent les mots « mutualisme », « symbiotismus » et « symbiose », nuançant la « théorie algo-lichénique ».



Les années 1880

La symbiose est étendue aux animaux (exemple du ver plat de Roscoff). Découverte d'une autre symbiose fongique : les « mycorhizes », les champignons avec les racines des arbres.

biotique, ou dans celle de l'artiste italienne Fara Peluso, recréant une « co-culture » de champignons et d'algues, tels les lichens, intitulée *Niche*. La symbiose apparaît comme modèle de pensée, creuset de représentations, support de projections. C'est aussi le succès de tout un imaginaire, volontiers biomorphique, censé illustrer l'entrelacement du vivant : la toile d'araignée, la liane, le mycélium, le corail, le lichen, etc. Mais que recouvre exactement le sens du mot « symbiose » ? Quelles en sont les origines, les enjeux, les biais, les actualités ?

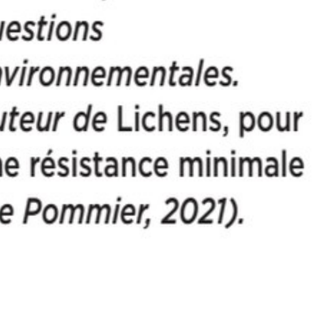
LES DÉCOUVERTES RÉVOLUTIONNAIRES AUTOUR DES LICHENS

L'histoire officielle fait remonter l'émergence de la notion de pensée interactive du vivant, en Occident, au XIXe siècle, en lien avec la découverte de la nature composée (algue et champignon) du lichen. Celle-ci est liée à des révolutions techniques (la microscopie) mais aussi conceptuelles (l'écologie, le mutualisme) – ainsi qu'à l'étude d'un organisme auparavant si peu considéré, le lichen.

En 1825, le botaniste allemand Karl F. W. Wallroth observe des entités présentes dans les lichens qu'il appelle « gonidies » (les « futures » algues des lichens). En 1866, un autre botaniste allemand, Anton de Bary, puis, en 1867, le botaniste suisse Simon Schwendener, observent au microscope la croissance du lichen et découvrent que se développent concomitamment des filaments de champignons et des noyaux d'algues. C'est la découverte de la nature double du lichen. Cette relation est alors comprise dans un rapport de parasitisme : le champignon parasite l'algue.

Cependant, la notion de parasitisme apparaît impropre. En 1875, le zoologiste belge Pierre-Joseph Van Beneden propose les concepts de « commensalisme » et de « mutualisme », ce dernier pour modéliser l'idée nouvelle et révolutionnaire qu'un organisme puisse se former à partir de l'union de deux organismes différents et que l'organisme hébergé (l'algue, au sein du champignon) puisse également tirer bénéfice de cette relation. En 1877, Albert Bernhard Frank, de l'université de Leipzig, propose le mot « symbiotismus », puis, en 1878, Anton de Bary, certainement à partir des travaux de Frank, le mot de « symbiose ». Dans les deux cas, il s'agit de définir la vie commune d'espèces différentes, durable au cours de leur vie et au sein d'un habitat commun. C'est ce dernier mot que la postérité retient.

Dès lors, les lichens sont compris comme une association « symbiotique » entre une algue unicellulaire photosynthétique et un champignon (mycète) : l'algue bénéficie d'un apport en eau et en sels minéraux, ainsi que d'un gîte ;



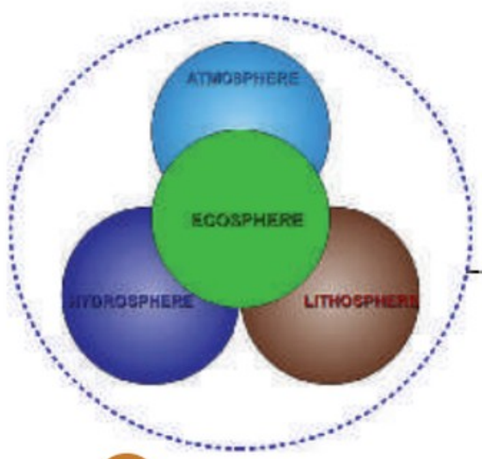
Vincent Zonca
DIPLÔMÉ DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE LYON ET AGRÉGÉ DE LETTRES MODERNES
Écrivain, il se passionne pour les lichens et réfléchit de façon transdisciplinaire aux questions environnementales. Auteur de Lichens, pour une résistance minimale *(Le Pommier, 2021).*

D. R.- D. R. - NIH - SCIENCE PHOTO LIBRARY / SCIENCE PHOTO LIBRARY - D. R.



Les années 1900-1920

Travaux pionniers du chercheur russe Constantin Sergeïevitch Merejkovski sur l'origine symbiotique des chloroplastes et la symbiogenèse (à partir des diatomées et des lichens).



Les années 1960

« Théorie de l'endosymbiose » de la microbiologiste américaine Lynn Margulis : les cellules eucaryotes viennent de l'évolution symbiotique de cellules procaryotes.

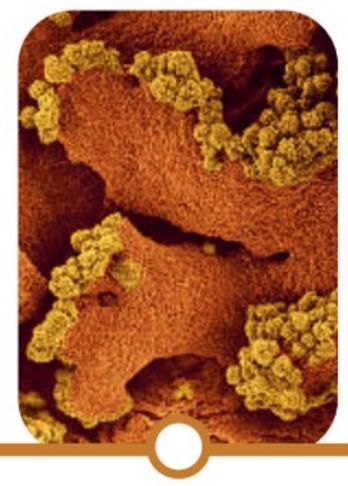
1974

La symbiose à l'échelle macroscopique, planétaire : formulation de l'« Hypothèse Gaïa » par Lynn Margulis et le chimiste anglais James Lovelock.



2002

D'après le concept proposé par Lynn Margulis, le biologiste américain Forest Rohwer propose d'appeler « holobionte » l'ensemble constitué par l'hôte et ses microorganismes.



2016

Cent cinquante ans après leur découverte, confirmation de la nature triple, et même multiple des lichens, par la mise en évidence de leur « micro(sym)biote ».

Les racines grecques de la symbiose

Le mot « symbiose » proposé par le botaniste allemand Anton de Bary était en réalité déjà utilisé en grec ancien. *Symbiosis* veut dire littéralement « co-habiter ». Dans l'Antiquité grecque, le mot *symbios* a le sens de « partenaire », de « compagnon, compagne » : il s'agit de « celui ou celle qui vit avec » et qui partage des liens durables, affectifs, familiaux ou sociaux. Il désigne « *la vie en commun, littéralement l'action de vivre ensemble, entre deux époux, deux camarades ou deux amis : en somme, il décrit une expérience de cohabitation harmonieuse (la "symbiose" de deux frères qui sont du même avis, ayant grandi ensemble, chez Antisthène ; celle de l'homme et de la femme, faits pour vivre ensemble, chez Aristote)* ». Il est également utilisé, par métaphore, dans le champ scientifique, pour des formes de « symbioses » biologiques avant la lettre. Dès le IVe siècle avant notre ère, Théophraste l'utilise pour décrire la relation que l'olivier entretient avec le lierre. Plus tard, Plutarque (46-125), dans son *Traité de l'intelligence des animaux,* évoque plusieurs cas d'animaux vivant en « société ». Il faut attendre le XIXe siècle pour que l'évolution technique permette de déceler ces associations à l'échelle microscopique. V.Z.

le mycète, hétérotrophe, bénéficie notamment du glucose que produit l'algue par photosynthèse et qui est nécessaire à sa croissance. Par ailleurs, la symbiose, plus qu'être la juxtaposition des propriétés des partenaires, permet à la structure de gagner de nouvelles propriétés. Ainsi, l'association algue-champignon produit des substances nouvelles qui donnent au lichen cette résistance incroyable aux UV et aux variations de température. Quand de Bary définit la « symbiose » en 1878, c'est ainsi pour désigner une relation aux bénéfices mutuels : il s'agit d'un mode horizontal, réciproque, de relations. Coexistent, par la suite, deux définitions de la symbiose : l'une, spécifique, caractérisant les associations aux bénéfices mutuels, et l'autre, globale, reliant tous les modes continus du « vivre-ensemble ».

De 1875 à aujourd'hui, le concept se complète et se complexifie. En parallèle à l'étude du lichen, les biologistes et les naturalistes découvrent d'autres exemples de symbiose : plancton (lire page 28), corail, ver de Roscoff. Ainsi, de nombreuses espèces appartenant à des règnes différents sont intéressées par les produits de la photosynthèse des algues. Par ailleurs, certaines associations sont redéfinies : les champignons liés aux racines des arbres, découverts trente ans plus tôt, sont désormais compris comme mutualistes et baptisés « mycorhizes » par Frank en 1885. En une vingtaine d'années, l'histoire des sciences est ainsi traversée par un véritable bond conceptuel qui aboutit à la fixation de différents termes classant les modes d'interactions continues (symbioses) du vivant : parasitisme, commensalisme, mutualisme (soit la symbiose en son sens restreint) ; ainsi qu'à l'étude d'une multiplicité toujours plus grande de cas. Qu'il s'agisse d'associations externes entre êtres vivants (appelées « ectosymbioses ») ou internes (« endosymbioses »). Que celles-ci soient continues (dans le cas du lichen, du corail, des mycorhizes, du rémora et des poissons qui le transportent) ou discontinues (dans le cas de la dissémination des graines et de la pollinisation des plantes par les animaux). Ces dernières sortent de la définition *stricto sensu* de la symbiose, qui repose sur une coexistence durable, et relèvent donc d'une forme de mutualisme sans symbiose.

DU TOUT PETIT À L'INFINIMENT GRAND

Dans les années 1900, les travaux du chercheur russe Constantin Sergueïevitch Merejkovski ouvrent la voie à la « symbiogenèse ». Soixante ans plus tard, la microbiologiste états-unienne Lynn Margulis popularise la « théorie de l'endosymbiose » selon laquelle les cellules eucaryotes résultent d'associations symbiotiques avec différents procaryotes (bactéries et archées). Une archée aurait englobé une bactérie qui est alors devenue son usine de production d'énergie, la mitochondrie. La vie se serait développée grâce à des associations si étroites entre certaines espèces qu'elle aurait abouti à leur fusion. En 1974, la symbiose s'ouvre à l'échelle macroscopique. Avec le chimiste britannique James Lovelock, Lynn Margulis formule l'hypothèse selon laquelle la Terre serait un organisme gigantesque au fonctionnement symbiotique, autorégulant harmonieusement ses composantes.

C'est la fameuse « Hypothèse Gaïa ». Plus tard, dans les années 1990, le concept de symbiose est appliqué à l'astrophysique pour décrire des systèmes d'étoiles où il existe des transferts de matière entre celles-ci (lire page 53). L'idée se retrouve aussi dans les « symbioses industrielles », modèle d'économie circulaire où différentes usines associées en réseau profitent de l'eau, de l'énergie et des rejets des unes des autres (lire page 56).

SUCCÈS ET LIMITES D'UNE NOTION

Plus récemment, l'étude du microbiote confirme une vision symbiotique de l'être humain : l'intestin contient plus de 1 000 espèces de bactéries et le nombre de cellules « non humaines » hébergées dans notre corps dépasse celui de nos propres cellules, soit plus de 60 000 milliards ! Un premier catalogue des gènes du microbiote intestinal humain – le microbiome – est réalisé en 2014. Il comporte 26 fois plus de gènes que notre propre génome. Les études révèlent des liens entre la composition de ce microbiote et notre santé (lire page 50). En 2016, le modèle du lichen se complexifie et les biologistes découvrent qu'il se compose d'un troisième compagnon (une levure), suivi de bien d'autres organismes, en somme, de son propre « microbiote ». D'où une nouvelle définition en 2020, de David Leslie Hawksworth et Martin Grube : un « *écosystème autonome formé par l'interaction entre un champignon "englobant", un agencement extracellulaire d'un ou de plusieurs partenaires photosynthétisant et un nombre indéterminé d'autres organismes microscopiques* ».

Tout *bios* est donc *symbios*, l'individu divisé, pris dans des relations, brèves comme durables, spatiales comme temporelles, micro- comme macroscopiques. En somme, il est intimement « politique ». Ainsi pour eux, comment dès lors modéliser l'être vivant ? Le concept d'« écosystème » permet de penser l'être vivant comme un lieu de rencontres, un « milieu », mais implique l'unité d'une structure, l'idée d'un tout articulé avec ses parties : il n'inclut pas tout à fait les relations symbiotiques qui se situent en dehors, ni la variabilité relationnelle d'une telle structure à travers le temps. Le biologiste américain Forest Rohwer, poursuivant la réflexion de Lynn Margulis, propose en 2002 le mot d'« holobionte » (du grec *holos*, « entier ») : le corail, le lichen seraient l'holobionte (la « totalité de vie ») de ces dispositifs biologiques. Pour Marc-André Solosse, s'il l'élargit, il maintient cependant le concept d'organisme. Dans la lignée de la philosophie de Gilles Deleuze, le chercheur évoque celui d'interaction.

Ces dernières années, différents travaux scientifiques nuancent le concept de mutualisme. Le lichénologue anglais David Cecil Smith montre que l'échange symbiotique est souvent unilatéral sur un plan nutritif : pour l'un des partenaires, le coût de la symbiose dépasserait le bénéfice. Le champignon lichénisé synthétise une enzyme qui agit sur les membranes des algues pour faciliter la diffusion des sucres fabriqués et en profiter. Les scientifiques décrivent désormais le lichen comme des algues « cultivées » par des champignons, impliquant un rapport de domination. Même si la notion de symbiose peut être frustrante, sa définition élargie permet justement de subsumer la modalité de l'interaction. Une définition « épochale », en quelque sorte. D'ailleurs, de telles modalités relationnelles sont-elles applicables au vivant ? Comme l'écrit le biologiste américain David G. Haskell, « *tel le fermier cultivant son verger et son champ de maïs, le lichen est une alliance de vies qui repose sur des intérêts communs* ». Le succès, aujourd'hui, de la vision du monde qu'incarne la symbiose, par son versant mutualiste, est lié au contexte plus général de mondialisation, qui cultive la notion de réseau – social ou non – tout en favorisant une crise du sujet et du lien ; mais aussi, à son envers, celui de la crise environnementale de l'âge de l'Anthropocène. En ce sens, la symbiose vient modéliser, voire « resignifier » une politique du vivant, un « vivre ensemble », un « commun » à réinventer. ■

Le contexte de mondialisation, qui cultive la notion de réseau, explique le succès du concept de symbiose



▲ *Le concept de symbiose est né en étudiant les lichens, qui sont aussi objet de fascination pour les artistes. Ici, Cellulaires Contacts 7. Photo de lichen Ramalina fastigiata, par Pascale Gadon-Gonzàlez, avec l'aide du Centre de microscopie électronique appliquée à la biologie (Toulouse).*

PASCALE GADON-GONZÀLEZ

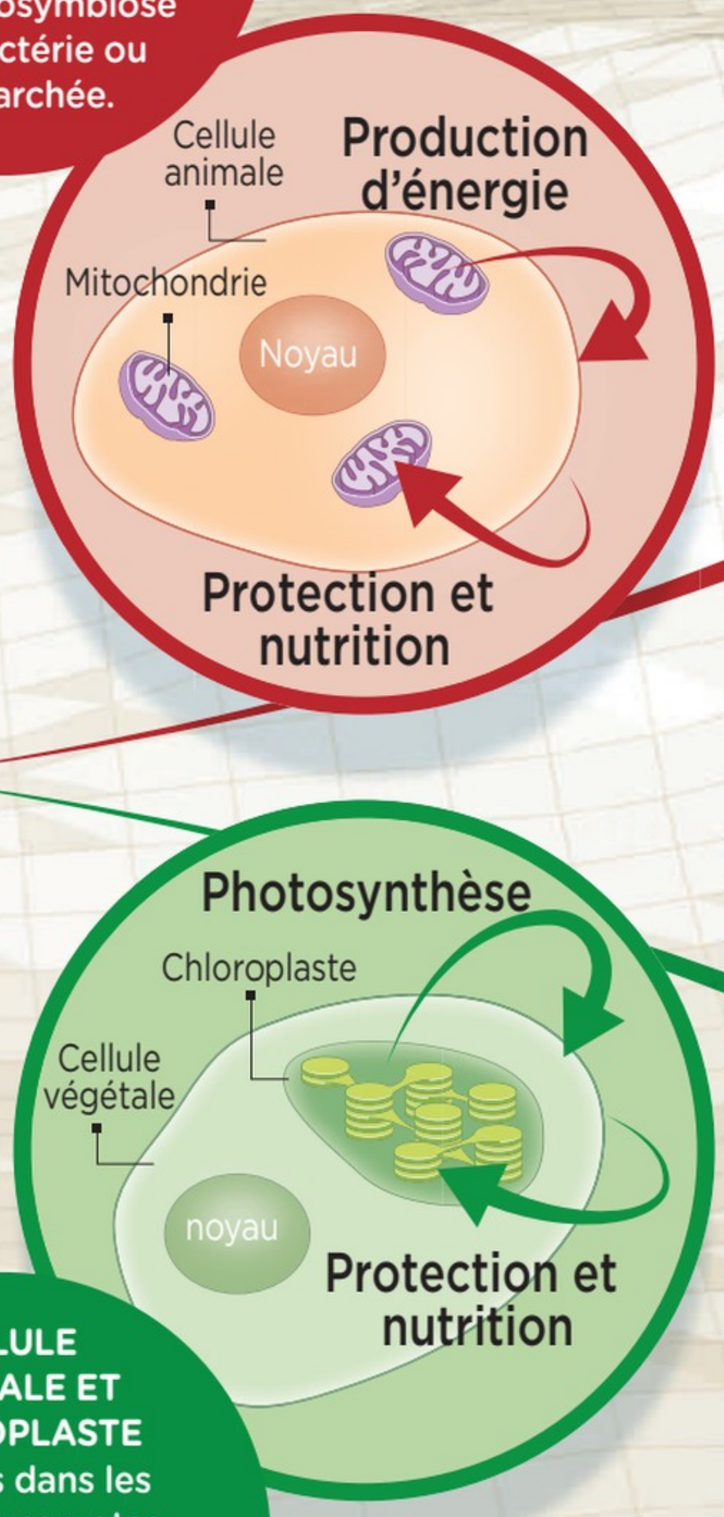
La symbiose à différentes échelles

Si en anglais le terme de symbiose, *symbiosis,* englobe de multiples interactions sociales comme le parasitisme, le commensalisme ou l'amensalisme, le sens strict en français renvoie à une association réciproquement profitable entre deux organismes vivants. De telles associations ont lieu à différentes échelles, chez tout type d'organismes et à divers degrés d'interdépendance. Au cours de l'évolution, certaines sont devenues tellement étroites que l'un des organismes contient désormais l'autre, qui n'est plus capable de survivre hors de son hôte. C'est par exemple le cas des mitochondries et des chloroplastes, les centrales à énergie des cellules dans les mondes animal et végétal.

Texte : Léna Hespel - Infographie : Bruno Bourgeois

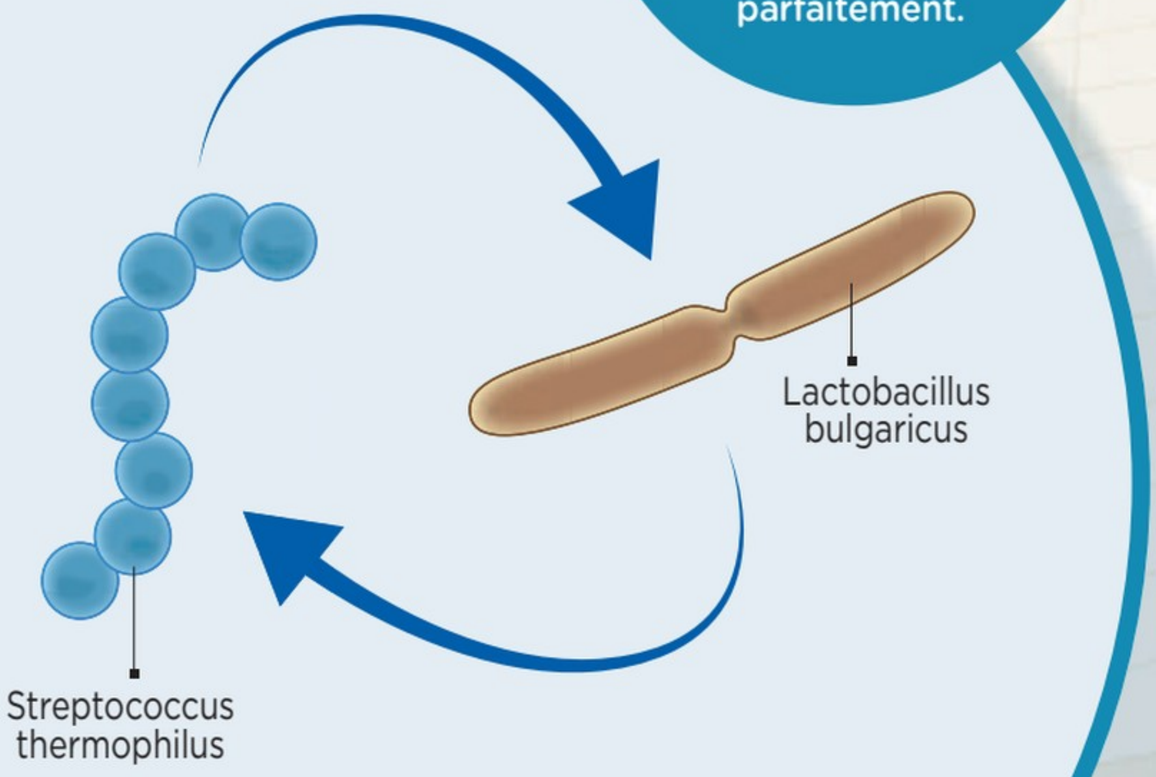
SYMBIOSE D'ANIMAUX

CELLULE ANIMALE ET MITOCHONDRIES
Indispensables aux cellules eucaryotes, les mitochondries sont issues d'une endosymbiose d'une bactérie ou d'une archée.



SYMBIOSE ARTIFICIELLE

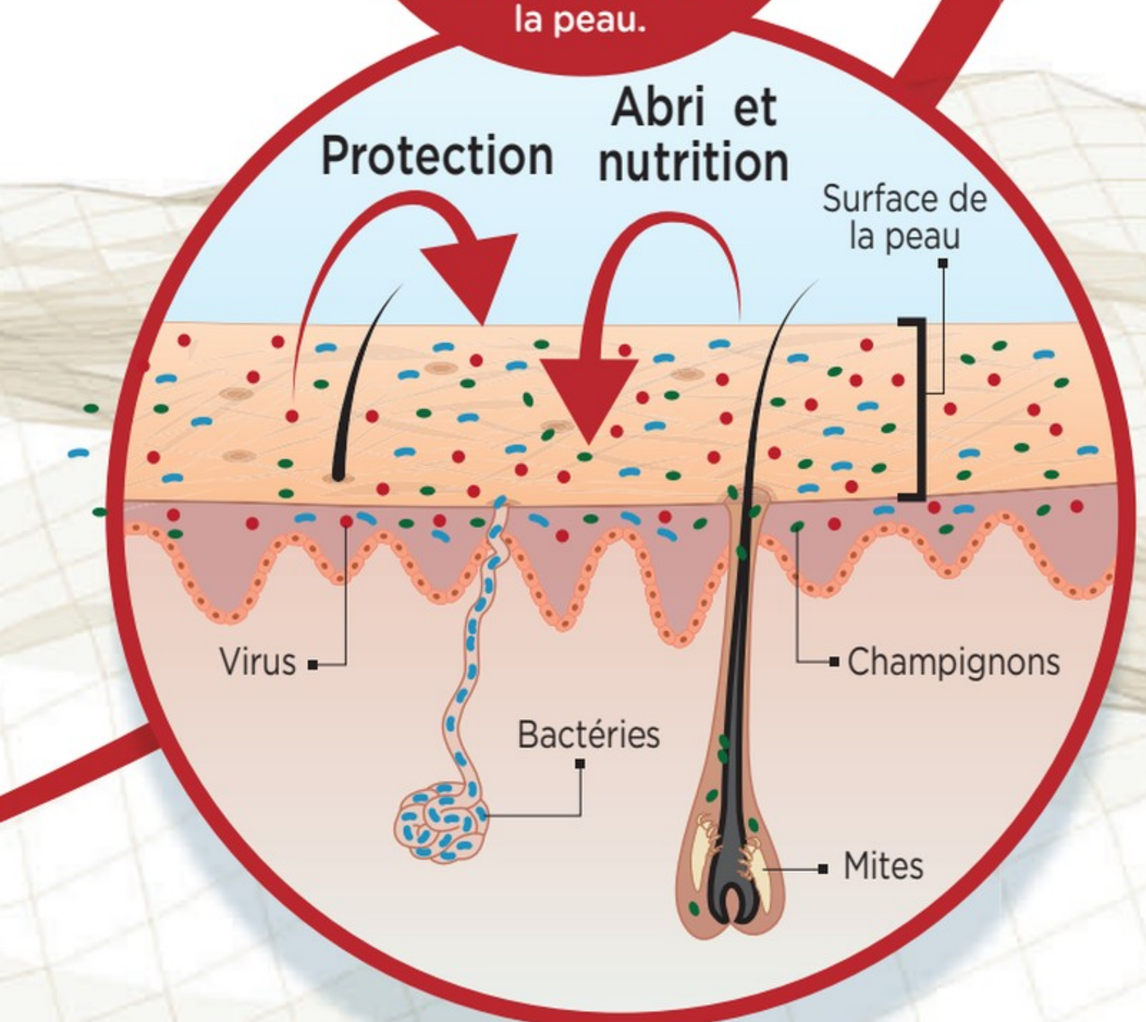
LES BACTÉRIES DU YAOURT
Dans le yaourt, ces deux microorganismes ne peuvent pas être cultivés seuls. Cultivés ensemble, ils se développent parfaitement.



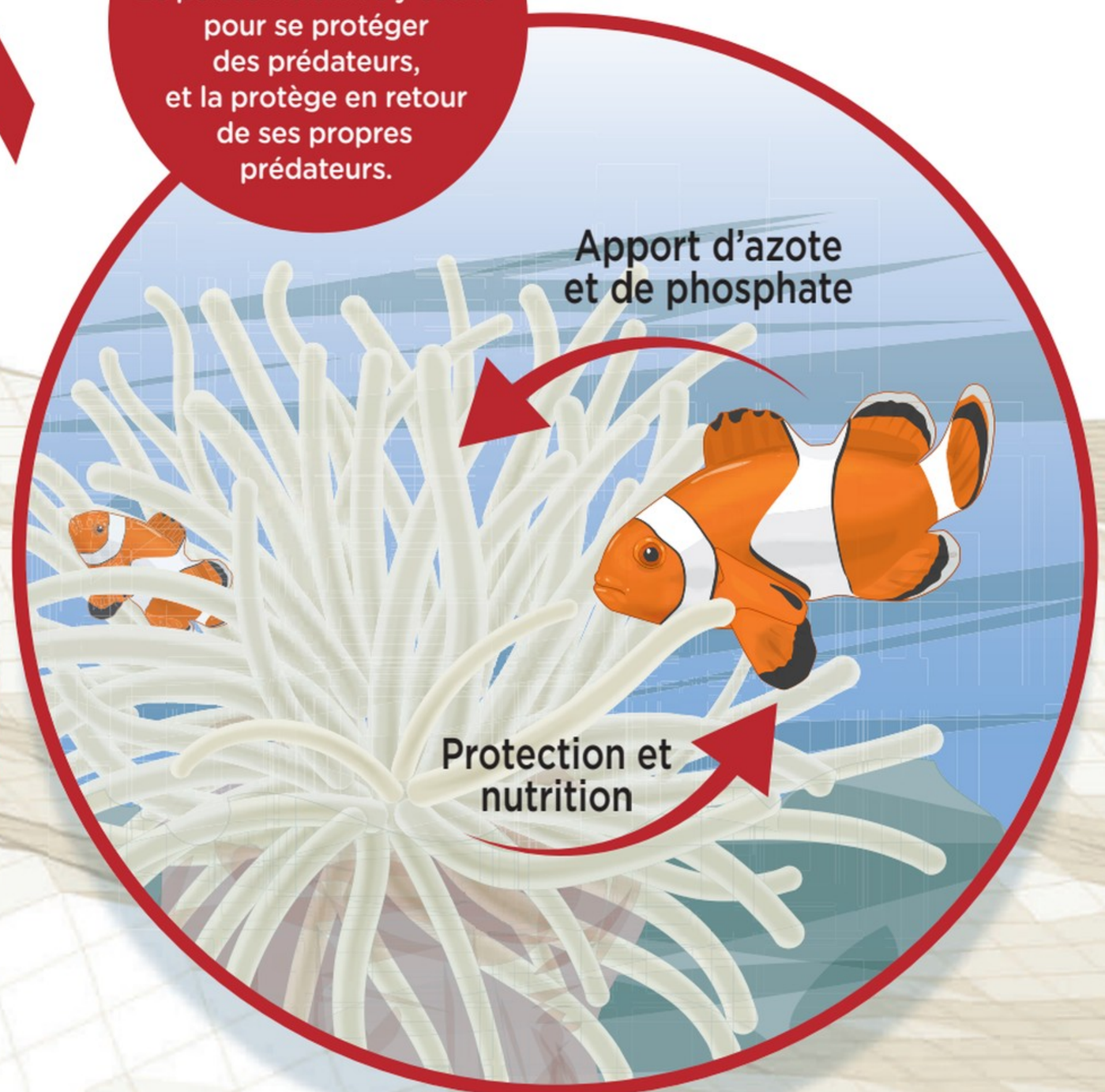
CELLULE VÉGÉTALE ET CHLOROPLASTE
Présents dans les cellules eucaryotes photosynthétiques, les chloroplastes résultent de l'endosymbiose d'une cyanobactérie.

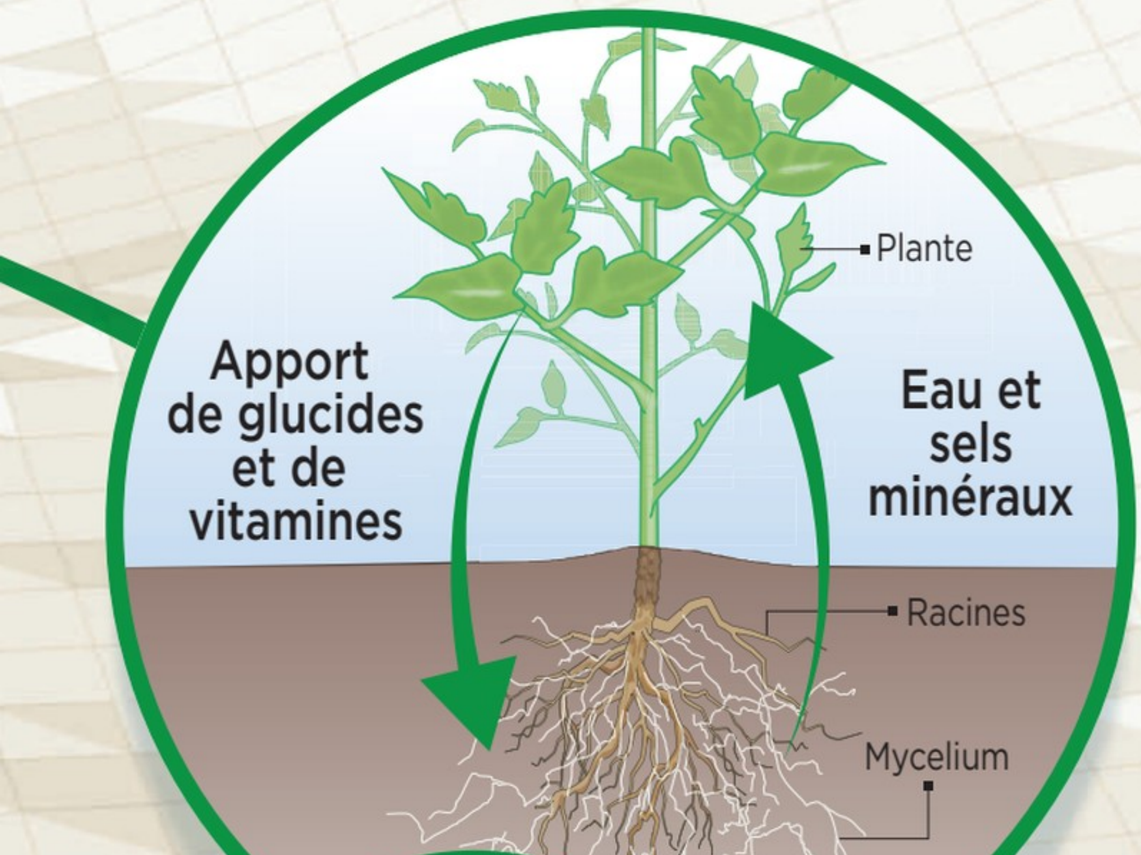
SYMBIOSE DE VÉGÉTAUX

PEAU HUMAINE ET SON MICROBIOTE
La flore cutanée limite le risque de colonisation de son hôte par une bactérie pathogène et constitue une protection contre l'inflammation de la peau.

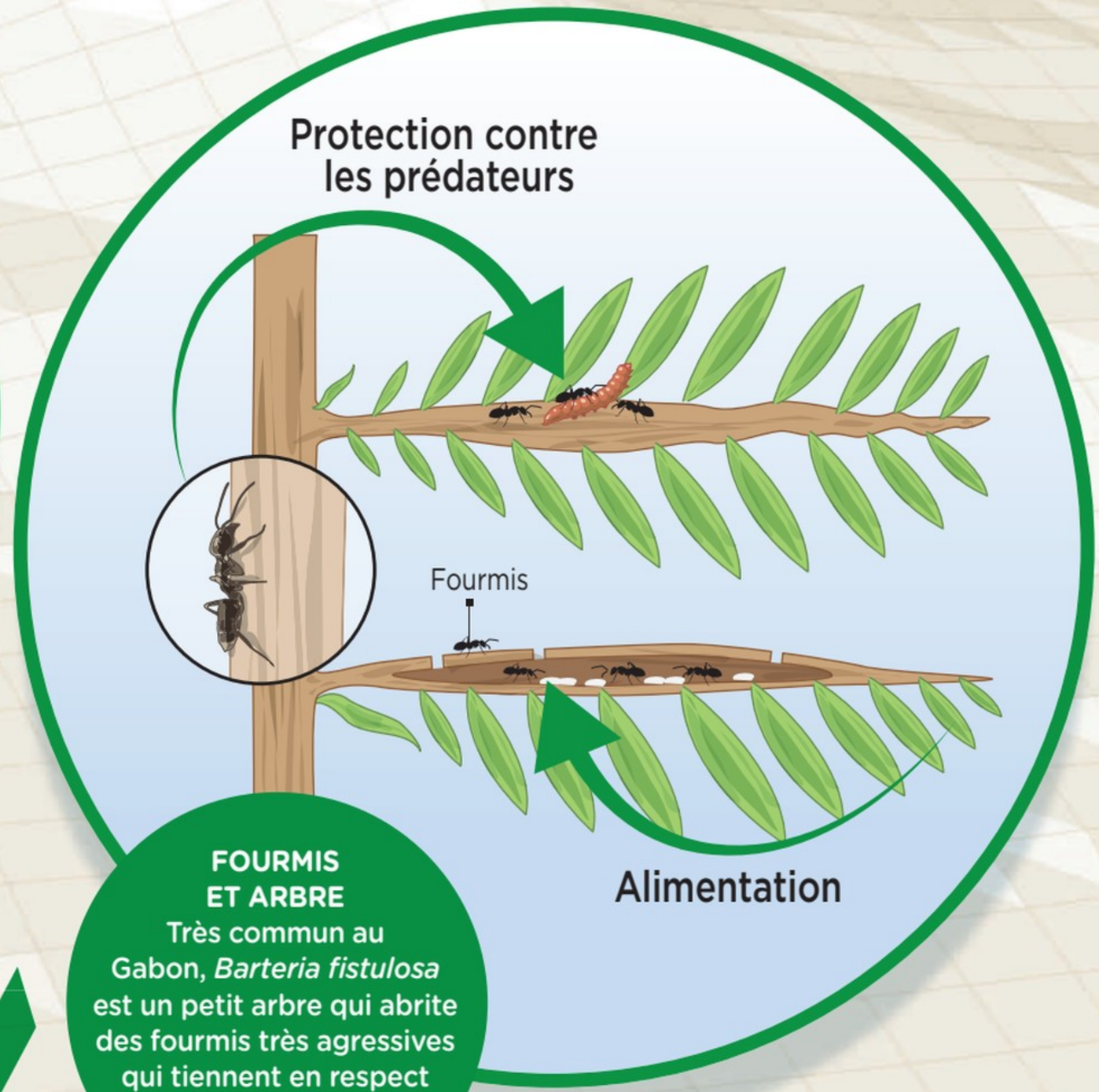


POISSON CLOWN ET ANÉMONE DE MER
Le poisson clown s'y cache pour se protéger des prédateurs, et la protège en retour de ses propres prédateurs.





SYMBIOSE MYCORHIZIENNE
Cette association entre des champignons et les racines permet à la plante de multiplier par 1000 la surface d'exploration des racines.



FOURMIS ET ARBRE
Très commun au Gabon, *Barteria fistulosa* est un petit arbre qui abrite des fourmis très agressives qui tiennent en respect les singes et les éléphants.

Entretien avec **Éric Bapteste**

« Nous sommes entrelacés avec des collectifs »

Les êtres vivants, unicellulaires ou pluricellulaires, dépendent de très nombreux collectifs. S'intéresser aux innombrables interactions moléculaires, cellulaires, qui régulent et participent à la vie sur Terre, élargit considérablement le concept de symbiose. Éric Bapteste, directeur de recherche au CNRS, biologiste et philosophe, nous fait découvrir des réseaux d'interactions.



▲ *Analyse des communautés bactériennes du microbiome cutané après des poignées de main dans la performance « 1000 Handsakes » du bioartiste F-J. Lapointe.*

FRANÇOIS-JOSEPH LAPOINTE

La Recherche **Biologiste de l'évolution, spécialiste des interactions, pouvez-vous nous préciser l'objet de vos travaux ?**

Éric Bapteste Je m'intéresse en particulier à la contribution des interactions dans l'évolution et l'organisation du monde vivant, à l'échelle des molécules, des cellules, des organismes pluricellulaires et des écosystèmes ! J'essaie de déterminer l'architecture de leurs liens, de comprendre leurs rôles. Pour cela, je travaille avec d'autres biologistes mais aussi des philosophes, des mathématiciens théoriciens des graphes, car les interactions peuvent s'étudier comme des graphes *[structure composée d'objets dans laquelle certaines paires d'objets sont en relation, NDLR]*.

Qu'est-ce que la symbiose ?

C'est un terme compliqué à appréhender. Le définir est un jeu dans les congrès spécialisés du domaine : sa définition varie selon les recherches de chaque participant. Aujourd'hui, ce mot n'est pas nécessairement synonyme de coopération à succès, comme avait pu le définir le mycologue allemand Anton de Bary, en 1867, en

observant la double nature du lichen, à la fois algue et champignon.

Quelle serait votre propre définition ?

Pour moi, la symbiose correspond à l'idée qu'au minimum deux entités de nature différente – des cellules, des organismes mais aussi des molécules – se trouvent fonctionnellement intégrées. Autrement dit, elles établissent des interactions, chimiques, physiques, biologiques. Ces interactions, «matériau» sur lequel agit la sélection naturelle, deviennent alors une source de variété car cette sélection confère de nouvelles fonctions et crée un nouvel ensemble qui éventuellement pourrait s'individualiser. Dans ce dernier cas, cela correspond à une symbiose qui va jusqu'à une fusion, et verrait émerger de ce collectif rassemblé une nouvelle forme d'individualité.

Pouvez-vous en donner un exemple ?

Le plus illustre est la cellule eucaryote, qui est notamment l'unité de base de l'organisme humain. Très schématiquement, cette cellule se caractérise par la présence de compartiments structurés comme un noyau où se trouve le patrimoine génétique ou, pour de nombreux eucaryotes, une mitochondrie dans laquelle se déroulent les réactions biochimiques nécessaires à la production d'énergie. Or il a été établi que l'organisation particulière de cette cellule, comparée à celle d'autres microorganismes sans noyau, telles les bactéries et les archées, est issue d'une symbiose. En particulier, les mitochondries se révèlent être les descendantes d'anciennes bactéries libres, désormais emboîtées dans leurs hôtes. On parle d'endosymbiose. La cellule eucaryote serait ainsi le fruit d'interactions entre une archée et une bactérie. Que s'est-il passé exactement ? Est-ce une interaction d'ordre métabolique ? Autrement dit, est-ce une archée qui, ayant besoin de l'hydrogène produit par une bactérie, a conduit au fil du temps à l'emboîtement de l'une dans l'autre, comme le suggèrent les travaux du biologiste William Martin à l'université de Düsseldorf, en Allemagne (1) ? Est-ce plutôt une relation de prédation – une archée cannibale attrapant une bactérie – ce que conforteraient les études du microbiologiste suédois Thijs J. G. Ettema de l'université d'Uppsala (2) ? Ou est-ce encore un peu plus compliqué ? Les recherches et les débats sont toujours en cours. À retenir : les interactions entre ces deux microorganismes, archée et bactérie, ont probablement donné naissance à une nouvelle entité, la cellule eucaryote, qui a été sélectionnée par l'évolution. D'ailleurs, nous, les humains, sommes inscrits dans la lignée des cellules eucaryotes.

Cette symbiose dont nous sommes issus se produit entre deux cellules, mais vous allez plus loin en parlant de symbiose entre des molécules. Pouvez-vous nous expliquer ?

Au niveau moléculaire, l'exemple le plus marquant concerne les gènes et les protéines. Les gènes sont souvent tenus pour les principaux responsables de l'évolution biologique. Mais au fil des multiples travaux du domaine, les biologistes ont montré que dans les cellules telles que nous les connaissons, s'il n'y a pas de protéines sans gènes, il n'y a pas non plus de gènes sans protéines. En effet, l'activation d'un gène dépend de ces dernières, des facteurs qui servent de clés pour déclencher la transcription du gène en ARN qui va finalement coder une protéine. En outre, le processus de transcription est lui-même réalisé par des protéines, des ADN polymérases. Ces deux exemples montrent les interdépendances entre ces molécules. Ainsi les molécules biologiques n'agissent pas seules : les gènes et les protéines sont pris dans des réseaux de régulation et d'interaction. Une molécule entame l'action, passe le relais à une suivante, engendrant un réseau d'interactions dont le résultat se manifeste dans le monde biologique, parfois à de nombreuses échelles. La meilleure preuve est qu'en conservant les mêmes familles de gènes mais en changeant leurs expressions, on obtient des organismes différents. Le biologiste français François Jacob, prix Nobel de physiologie en 1965, déclarait que « *ce qui distingue un papillon d'un lion, une poule d'une mouche, ou un ver d'une baleine, c'est moins leurs différences en termes de constituants chimiques que l'organisation*



D. R.

▲ *Éric Bapteste, biologiste, est spécialiste des interactions dans le monde du vivant.*

BIO

- **2003** Doctorat de biologie évolutive à l'université Paris VI.
- **2003-2007** Post-doctorat dans le laboratoire de W. Ford Doolittle, université Dalhousie, Canada.
- **2007** Doctorat de philosophie des sciences à la Sorbonne.
- **2007** Chargé de recherche au CNRS.
- **2009** Lauréat du prix Paoletti. Codirecteur de l'équipe Adaptation, Intégration, Réticulation, Évolution (CNRS- Sorbonne Université).
- **2014-2019** Lauréat d'une bourse du Conseil européen de la recherche (ERC), pour le projet Evolunet.
- **2015** Directeur de recherche au CNRS.

et la distribution de ces constituants ». Par analogie, chacun peut comprendre l'effet d'un changement de structure de réseaux moléculaires en imaginant ce qui se passerait si on conservait sur le terrain les joueurs d'une équipe de football mais en les changeant de poste. Ce ne serait plus le même match.

Au niveau moléculaire, les interactions et leur architecture compteraient plus que les molécules elles-mêmes ?

Comptent-elles davantage ? Elles ont au moins une importance égale pour comprendre le fonctionnement de la vie et son évolution. C'est pourquoi les biologistes cherchent depuis une quinzaine d'années à déceler des points communs dans l'organisation des équipes de molécules. Ces régularités ne concernent pas la nature des gènes ou des protéines employés par les organismes, mais plutôt la mise en œuvre renouvelée du même type d'entrelacements quels que soient les gènes, les protéines et les organismes considérés. La biologie des systèmes cherche à déterminer si les régularités organisationnelles se présentent sous la forme de motifs récurrents, si des architectures répétées dans les réseaux observés peuvent refléter des règles générales de construction et d'évolution des collectifs. On a, entre autres, établi que l'architecture des réseaux d'influence contraint l'évolution des composants qui y sont entrelacés. Ils ont un effet sur les gènes et sur les protéines, sur leur facilité à occuper de nouveaux rôles au cours de l'évolution.

Pouvez-vous en donner un exemple ?

Beaucoup de variations morphologiques chez les animaux semblent provenir de changements génétiques sur les promoteurs, les interrupteurs positionnés en amont des gènes, qui régulent leur expression. En effet, des mutations sur ceux-ci ont de bonnes raisons d'être sélectionnées pour engendrer de la variation car elles sont moins dommageables que des mutations dans les gènes codant les protéines. Si une mutation détruit un promoteur, l'expression du gène promoteur muté ne sera perdue que dans certains tissus. En revanche, si une mutation détruit un gène codant une protéine, l'expression du gène sera en totalité perdue dans l'ensemble de l'organisme. Et comme les gènes codent souvent plusieurs fonctions, perdre un gène multitâche peut s'avérer trop lourd de conséquences pour la survie de la lignée. Les contraintes imposées par les collectifs déjà en place introduiraient donc une forme d'inertie ou de stabilité plus significative dans les systèmes animaux complexes, où les gènes et leurs produits sont plus entrelacés, que dans des systèmes simples.

Vous avez évoqué les interactions et les collectifs qui en émergent aux niveaux moléculaire et cellulaire, mais que dire à un niveau supérieur, celui des organismes pluricellulaires ?

Sur ce plan, des interactions et des collectifs entre des acteurs de différentes natures existent aussi et contribuent à la vie. Les plantes et les animaux vivent en symbiose avec des colonies de microorganismes. Au niveau de leurs racines, les plantes sont en relation étroite avec des bactéries et des champignons pour former des mycorhizes. Cet ensemble symbiotique est si essentiel au développement de la plante qu'on pourrait en contrôlant le microbiome – l'ensemble des gènes présents dans le microbiote – favoriser le développement de certaines caractéristiques chez la plante (lire page 40). De même, les animaux vivent en étroite relation avec des communautés microbiennes. L'être humain abrite dans ses intestins un microbiote composé d'environ 100 000 milliards de microorganismes. Il nous aide autant à la digestion qu'au développement de notre système immunitaire (lire page 50).

« Il existe des interactions et des collectifs entre acteurs de différentes natures »

Ainsi, ces communautés microbiennes apparaissent comme des composants normaux, plus encore, nécessaires, du cycle de vie animal. Chaque animal est un composant d'un collectif impliquant aussi des microorganismes.

Comment qualifier ce type d'association ? Est-ce une forme de « super-symbiose » ?

La biologiste américaine Lynn Margulis (1938-2011), pionnière de l'endosymbiose, et le spécialiste du corail Forest Rohwer, ont proposé pour cette association le terme d'holobionte (du grec *holo,* « tout », et *bios,* « vie »). Tous les animaux, y compris les humains, sont en réalité des composites de nombreuses espèces, qui vivent, se développent et évoluent ensemble. D'autres biologistes utilisent le mot de méta-organisme… Mais l'idée reste la même, les êtres vivants sont entrelacés par des réseaux d'interactions, à différentes échelles. Que l'on considère les microbes associés comme des symbiontes qui co-évoluent avec des organismes multicellulaires, ou simplement comme des voisins présents dans l'environnement auxquels les animaux s'adaptent vaille que vaille, on ne peut pas négliger leur impact.

Considérer les êtres vivants comme des holobiontes, avec tous ces entrelacs d'interactions, est-ce une révolution en biologie ?

Cela élargit le champ de recherche, modifie les perspectives, mais, sur le fond, les biologistes s'intéressent depuis toujours aux interactions. En fait, les progrès technologiques, comme le séquençage et la microscopie haute résolution, l'informatique, nous permettent de comprendre mieux l'étendue et la multiplicité de ces interactions. Les scientifiques peuvent maintenant analyser des mondes intérieurs et extérieurs associés aux animaux et aux plantes, appréhender une multitude de partenaires. Aujourd'hui, il faut tenir compte des rôles des microbiomes, notamment dans le cadre des recherches en biologie de l'évolution. Les modèles évolutionnistes, établis avant les progrès de la microbiologie, se concentrent assez logiquement sur l'importance de la transmission des gènes des hôtes. En plus de ce flot de gènes entre générations d'une même espèce, il est nécessaire d'étudier le flot de leurs microbes. Le biologiste américain Seth Bordenstein, de l'université Vanderbilt, à Nashville (États-Unis), suggère que certains microbes sont des faiseurs d'espèces. Ils affectent la reproduction de leurs hôtes soit en modifiant leurs habitudes alimentaires, soit en participant aux choix des partenaires, soit en contribuant à stériliser leurs descendants. Ces exemples nous incitent à élargir les théories standards pour mieux tenir compte de ces collectifs en interaction.

Dans quelles directions menez-vous vos recherches ?

Avec des collègues biologistes et des philosophes, nous élaborons des outils conceptuels afin d'étendre la théorie de l'évolution à tous ces processus d'interactions (3). Par ailleurs, je commence à étudier les liens au sein des microbiotes intestinaux des personnes âgées. Est-ce que la structuration des communautés microbiennes des hôtes vieillissants, parmi un grand nombre d'individus, converge vers le même type d'architecture ? Ou est-ce que chaque individu vieillissant a son propre type de communauté ? J'essaie de suivre comment les communautés microbiennes associées évoluent au cours du vieillissement (4). L'âge a-t-il un effet sur les interactions entre le microbiote et la personne ? Ce n'est que le début : nous élaborons les méthodes pour analyser ces interactions.

Une fois les interactions comprises entre l'humain et ses microbiotes, peut-on imaginer s'en servir pour nous améliorer ?

Beaucoup de travail reste à accomplir… Mais certains se sont déjà projetés en cyborg, doté de prothèses technologiques. Alors pourquoi ne pas envisager d'agir sur nos microbiotes ? Ils sont beaucoup plus malléables : certes, les bactéries qui les composent sont en partie accessibles à la biotechnologie, mais ils sont aussi tout simplement sensibles aux variations de nos modes de vie. Comprendre comment reconstruire ou transformer les microbiotes figure parmi les défis scientifiques de demain. Comprendre comment les protéger aussi. ■

Propos recueillis par Mathias Germain

POUR EN SAVOIR PLUS

- É. Bapteste, *Tous entrelacés !*, Belin, 2017.



(1) W. Martin et M. Muller, *Nature, 6671,* 37, 1998.

(2) T. Ettema *et al., Mol. Microbiol., 4,* 1052, 2011.

(3) É. Bapteste *et al., Biology*, 10, 651, 2021.

(4) J. Teulière *et al., Ageing Res. Rev., 70,* 101375, 2021.



Johan Decelle
BIOLOGISTE MARIN,
GRENOBLE
Chercheur au CNRS, laboratoire de physiologie cellulaire et végétale



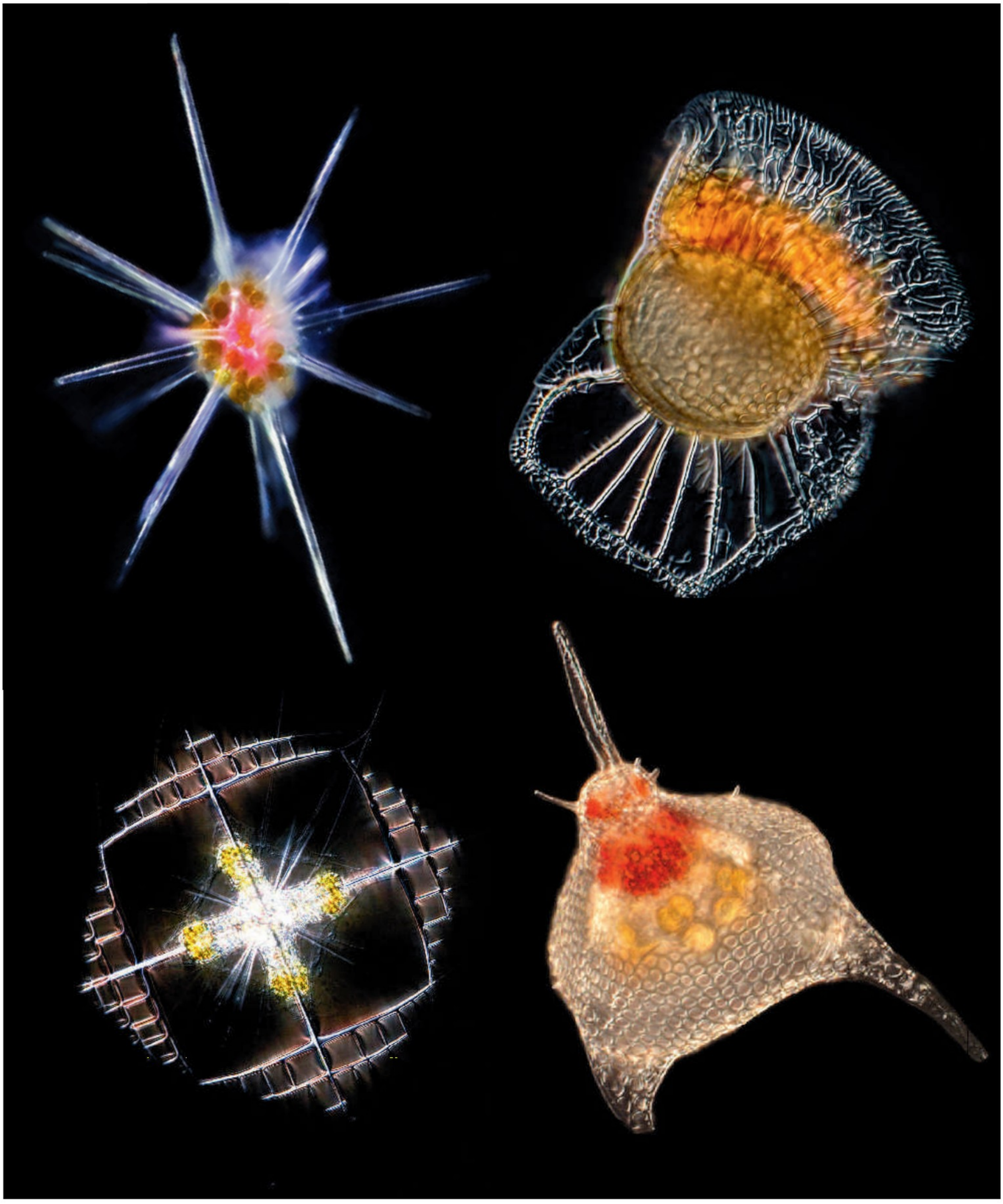
Fabrice Not
OCÉANOGRAPHE BIOLOGISTE,
ROSCOFF
Directeur de recherche CNRS, Station biologique de Roscoff, Sorbonne

Le plancton marin, un océan de symbioses

Les océans regorgent de microorganismes à la dérive. Découverts dès le XIX[e] siècle, ils intriguent les naturalistes pour leurs associations étonnantes, comme ces microalgues jaunes, logées au sein d'êtres unicellulaires aux formes spectaculaires. Les uns fournissent l'énergie liée à l'activité photosynthétique, les autres des nutriments. Aujourd'hui encore, ces associations symbiotiques continuent de surprendre tant par leur foisonnante diversité que par la complexité de leurs interactions à tous les niveaux. Celles-ci restent d'ailleurs largement incomprises.

En 1847, Thomas Henry Huxley n'est pas encore le naturaliste ardent défenseur de Darwin. À 22 ans, il sort de la faculté de médecine de Londres. Chirurgien, il embarque à bord du *HMS Rattlesnake* pour étudier les méduses et mollusques. La corvette de la Royal Navy est affrétée pour une exploration de la Nouvelle Guinée et de l'Australie. Lors de cette expédition, le jeune scientifique récolte des créatures étranges à l'aide de son filet à plancton, agglomérées dans une gelée et flottant à la surface de l'eau. Il y observe à l'intérieur des « petites cellules jaunes sphériques ». C'est peut-être la première fois qu'est observée la symbiose animale avec des microalgues – terme qui d'ailleurs n'existe pas encore à l'époque.
Quelques années plus tard, le naturaliste allemand Ernst Haeckel décrit de nombreux microorganismes marins, provenant de divers océans du globe, dont les radiolaires, une grande famille d'unicellulaires, remarquables par leur squelette en silice ou sulfate de strontium, avec en leur sein des microalgues bien visibles. Grâce à ses magnifiques dessins d'observation au microscope, le chercheur a mis ces radiolaires au cœur des premières recherches et réflexions sur la symbiose dans le vivant. Le naturaliste russe Leon Cienkowski est alors le premier en 1870 à avancer l'idée que les cellules jaunes ne sont pas des parties

D.R. - D.R.



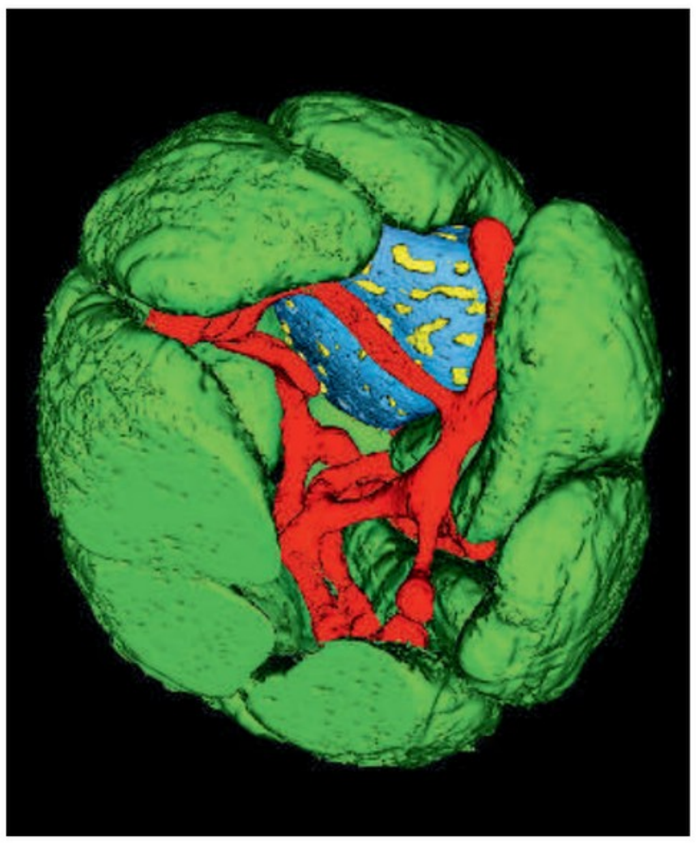
LUIS GUTIERREZ - JOHN DOLAN, CNRS, IMEV - J. DECELLE / SARDET / CNRS - MIGUEL MÉNDEZ SANDRIN

▲ *À gauche et en bas à droite, trois radiolaires en symbiose avec des microalgues eucaryotes (en marron-jaune). En haut, à droite, un dinoflagellé avec des cyanobactéries dans sa collerette (en orange). Taille réelle : 0,1-0,3 mm.*

Les méthodes d'études sur cellules uniques

La plupart des organismes impliqués dans les associations symbiotiques du plancton ne sont pas cultivables en laboratoire. De ce fait, leur étude implique la mise en œuvre d'approches spécifiques, particulièrement sensibles, qui s'appliquent sur cellules uniques, isolées directement dans leur environnement naturel. Les récents progrès techniques en analyse génomique ou en microscopie permettent d'aller étudier les processus symbiotiques au niveau subcellulaire, par exemple en microscopie très haute définition (comme les microscopes électroniques à balayage à faisceau d'ions focalisé), où les échanges de nutriments peuvent être visualisés ainsi que la reconstruction en trois dimensions de l'organisation cellulaire de la symbiose. Ainsi, nous avons réussi à observer sur une microalgue *Phaeocystis cordata* les changements de son organisation interne lorsqu'elle vit librement puis en symbiose dans un acanthaire (1) (voir image). Des systèmes microfluidiques intégrés de type « laboratoire sur puce » sont également mis au point afin d'aboutir à des dispositifs expérimentaux sur cellules uniques isolées et ainsi permettre d'étudier, par exemple, les réponses physiologiques très fines des symbioses planctoniques face aux perturbations environnementales. ■

J. D. et F. N.



▲ *Vue d'une microalgue (*P. cordata*) qui vit en symbiose avec un acanthaire (par microscopie électronique 3D).*

(1) C. Uwizeye *et al.*, *PNAS*, 118, e2025252118, 2021

(*) **Les eucaryotes** sont des cellules qui se caractérisent par la présence de compartiments comme le noyau (à la différence des bactéries). Celui-ci abrite leur patrimoine génétique, le génome.

d'animaux mais plutôt des algues, possiblement parasites. La symbiose par intégration d'une algue dans un organisme animal reste encore à l'état d'hypothèse. Il faut attendre d'autres travaux pour le confirmer, en particulier ceux de Patrick Geddes au laboratoire de zoologie expérimentale de Roscoff, qui démontre en 1878 qu'un petit ver marin plat (du groupe des acœles) abrite sous sa peau des microalgues et a une activité photosynthétique comparable à celle d'une algue verte. Un peu plus tard, le biologiste allemand Karl Brandt confirme ces travaux, mais cette fois chez les radiolaires : les microalgues sont au centre de leur système nutritionnel où se déroule un échange réciproque, chaque partenaire de la symbiose semblant indépendant.

Depuis ces travaux pionniers sur les symbioses marines, les progrès technologiques (microscopie, séquençage d'ADN) et de nouvelles explorations des océans (comme les expéditions Tara Océans) ont permis de révéler que la diversité, aussi bien des hôtes que des algues impliquées dans les symbioses planctoniques, est bien plus grande et complexe que ce qui avait été décrit. Du côté des hôtes, les biologistes ont découvert l'existence de cellules eucaryotes (*) amiboïdes (qui ressemblent à celles des amibes). Leur taille varie de 20 micromètres à 1 millimètre. Elles appartiennent le plus souvent à la famille des radiolaires ou à celle des foraminifères et peuvent abriter jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'algues unicellulaires symbiotiques, tel un microcosme dans l'immensité océanique ! D'autres organismes unicellulaires du plancton sont des hôtes pour des microalgues ou des bactéries photosynthétiques : il s'agit des ciliés (qui ont des cils vibratiles à leur surface), et de certains dinoflagellés, un groupe très hétéroclite d'organismes (végétal et animal). Les organismes multicellulaires planctoniques ne sont pas en reste : les acœles, ou encore des méduses comme les vélelles qui ressemblent à des voiliers bleutés miniatures, abritent de nombreuses microalgues.

Du côté des microalgues symbiotiques susceptibles d'être hébergées, nos connais-

F. NOT ET AL.

sances ont récemment évolué. Le nom donné par Karl Brandt au XIX[e] siècle, *Zooxanthellae nutricola,* n'a plus aucune valeur taxinomique. Ces microalgues, au début considérées comme une seule et unique espèce, se révèlent être en fait d'une grande diversité, appartenant à différentes lignées eucaryotes, qui ont divergé depuis plusieurs centaines de millions d'années. Le séquençage d'ADN a permis d'identifier précisément la taxinomie des microalgues symbiotiques, ce qui restait très difficile en utilisant uniquement les critères morphologiques, observés par microscopie. Dans le plancton marin, de nombreuses lignées différentes d'algues peuvent vivre en symbiose au sein de la multitude d'hôtes planctoniques. Parmi les groupes de microalgues les plus représentées, on trouve des dinoflagellés, des haptophytes (ce groupe se caractérise par la présence d'un appendice filiforme, un haptonème, qui sert à attraper ou à se fixer), ou encore des algues vertes. Certaines espèces d'algues dinoflagellés – comme *Brandtodinium nutricula,* les *Symbiodiniaceae* du type *Symbiodinium* – semblent être des « super » symbiontes généralistes, autrement dit elles semblent avoir des prédispositions à vivre en symbiose avec différents hôtes, des méduses, des coraux et des radiolaires.

DES IMBRICATIONS À DIFFÉRENTS DEGRÉS

Cette foisonnante biodiversité du plancton, loin d'être complètement décrite, suggère une grande variété de types de relations symbiotiques. Les observations récentes le confirment : le lien physique entre les partenaires symbiotiques peut aller d'une imbrication très forte, à l'instar des endosymbioses où les cellules sont incorporées l'une dans l'autre (lire encadré), à des interactions moins étroites comme dans le cas des ectosymbioses, où les organismes vivent l'un sur l'autre. D'autres formes d'organisation à distance existent aussi, comme la phycosphère : un ensemble de bactéries diverses, attirées probablement par des molécules nutritives issues de microalgues, vit autour de ces dernières, formant une sphère, un microbiote externe.

Endosymbiose, ectosymbiose… Quelle que soit la situation, des relations physiologiques et métaboliques importantes existent et ce sont elles qui fondent la symbiose. Le plus souvent, la photosynthèse de l'algue symbiotique permet de fabriquer de l'énergie sous forme de sucres et de lipides qui sont transférés à la cellule hôte. En retour, l'hôte fournit à son symbionte les éléments nutritifs nécessaires mais doit contrôler en même temps la croissance des algues. Dans certains cas, comme le dinoflagellé *Ornithocercus,* les organismes hôtes hébergent des bactéries fixatrices d'azote qui leur donne un avantage pour l'acquisition de nutriments rares dans les environnements pauvres.

Cependant, il n'est pas si évident de caractériser la nature exacte des relations entre organismes. Premièrement, ils sont fragiles et difficiles à cultiver en laboratoire, c'est pourquoi nous ne pouvons pas apprécier de façon contrôlée leurs échanges. Beaucoup de connaissances sur le sujet proviennent de l'exemple des coraux dont la symbiose avec des microalgues a pu être finement étudiée. Deuxièmement, les relations entre microorganismes planctoniques sont parfois plus complexes qu'elles n'en ont l'air. Ces interactions cellulaires peuvent être dynamiques et évoluer graduellement entre parasitisme, commensalisme et mutualisme en réponse à des conditions environnementales mais aussi selon la « coopération » de chaque partenaire. Les microalgues symbiotiques dans le milieu planctonique semblent généralement indépendantes vis-à-vis de leurs hôtes. Pour preuve, certaines sont cultivées en labo-

La foisonnante biodiversité des microalgues suggère une multitude d'interactions avec les planctons



▲ *Underwater Vision Profiler quantifie et classe,* in situ, *les microorganismes.*

Face aux perturbations environnementales, explorer la vie in situ est plus urgent que jamais

ratoire sans leur hôte. Peut-on considérer alors la photosymbiose planctonique comme une relation surtout mutualiste comme entre les coraux et les microalgues ? Cette question anime les biologistes depuis le XIXe. Pour nous, elle appartient plutôt au domaine philosophique tant les interprétations deviennent difficilement vérifiables et parfois anthropocentristes (1). Déjà Maurice Caullery déclarait au début du XXe siècle : « *L'association des algues et des animaux n'est pas, à tout le monde, une parfaite symbiose et, dans certaines circonstances, l'animal vit en parasite sur les algues.* » Par exemple, les radiolaires acanthaires, aux admirables squelettes en sulfate de strontium (voir image) « profiteraient » du succès écologique d'une microalgue en la capturant et la manipuleraient pour en tirer le maximum de bénéfice énergétique au lieu de la manger telle une relation proie/prédateur, sans aucun bénéfice évident pour la microalgue (2). Le terme mutualisme ne paraît donc pas approprié dans ce cas et nous proposons plutôt le terme de « cytokleptie », autrement dit un vol de cellules !

Les symbioses planctoniques ne sont pas seulement fondamentales pour la vie des divers organismes à l'origine de ces interactions, elles le sont également pour le fonctionnement des écosystèmes océaniques. Dans les couches de surface des océans, éclairées par la lumière du soleil, les photosymbioses contribuent de manière significative au cycle du carbone et autres éléments minéraux. Ces symbioses sont également impliquées dans les chaînes alimentaires car les hôtes maintiennent la prédation comme source alternative d'énergie à la photosynthèse apportée par les microalgues. On considère ces organismes comme des « mixotrophes ».

Pour illustrer les rôles que peuvent avoir les photosymbioses pour l'écologie des organismes, nous allons prendre un exemple chez les radiolaires, les collodaires. Ce sont des radiolaires coloniaux constitués de milliers d'individus partageant une même enveloppe gélatineuse abritant de très nombreuses microalgues. Grâce à des techniques d'imagerie sous-marine capables de quantifier et classer la présence de microorganismes directement dans l'océan (l'outil *Underwater Vision Profiler* développé par nos collègues océanographes de Villefranche-sur-Mer, voir photo), des études ont mis en évidence la quantité considérable de ces collodaires. Ces organismes, habituellement détruits par les méthodes de prélèvements classiques que sont les filets à plancton, ont pu être observés directement dans leur milieu et leur biomasse globale de carbone estimée. Il en ressort qu'ils ne représenteraient pas moins de 5 % de la biomasse de carbone présente dans les océans (3).

L'OCÉAN INFLUENCE LES ASSOCIATIONS

Une particularité : ces collodaires (les espèces connues jusqu'à présent) sont symbiotiques, d'où leur répartition surtout dans les zones équatoriales. En effet, les conditions environnementales influencent la formation de ces interactions symbiotiques. Parfois un océan pauvre en nutriments pousse des microorganismes à s'associer. C'est ce que suggèrent des travaux sur les radiolaires acanthaires. L'étude de la diversité génétique de ces acanthaires a permis d'illustrer les relations étroites entre l'évolution du vivant et l'environnement. En 2012, lorsque la symbiose entre la microalgue *Phaeocystis* (haptophytes) et les planctons acanthaires a été mise en évidence, des études fondées sur les horloges moléculaires (qui permettent de remonter dans l'histoire évolutive des espèces à partir de leur ADN) ont déterminé que cette association symbiotique s'est mise en place il y a environ 170 millions d'années (4), une période caractérisée par un vaste océan très pauvre en nutriments. Ces

EMBRC FRANCE

Une symbiose à l'origine de notre oxygène

L'apparition de la photosynthèse chez les plantes et les microalgues eucaryotes il y a 1,5 milliard d'années a bouleversé notre atmosphère (oxygénation). Elle s'est faite grâce à des phénomènes de symbiose entre une cellule-hôte et des microalgues procaryotes ou eucaryotes. L'acquisition de la structure qui permet de capter la lumière et de produire de l'énergie – le chloroplaste – chez les cellules eucaryotes est donc sûrement un des événements les plus importants de l'histoire de la Terre. Cette acquisition à plusieurs reprises au cours de l'évolution a permis de distribuer les chloroplastes dans de multiples lignées eucaryotes. Encore plus remarquable, chez certains organismes, ce chloroplaste a été perdu, puis réacquis avec des symbioses multiples successives. De là sont nées des cellules extrêmement chimériques avec des gènes de plusieurs algues. L'étude des photosymbioses actuelles, d'une certaine façon des étapes évolutives vers l'acquisition du chloroplaste, cherche à retracer les événements évolutifs qui ont permis à une cellule-hôte d'intégrer des chloroplastes en contrôlant ses microalgues symbiotiques. La génomique a permis de comprendre l'intégration génétique d'une algue vers sa transformation en organelle, le chloroplaste. Il y a une réduction des organelles et des génomes de l'algue, et un transfert de gènes vers la cellule-hôte. Par cette intégration, l'hôte contrôle ainsi génétiquement le chloroplaste, dont l'hôte produit une grande partie des protéines. Mais l'intégration morphologique et métabolique de l'algue reste encore peu étudiée. ■

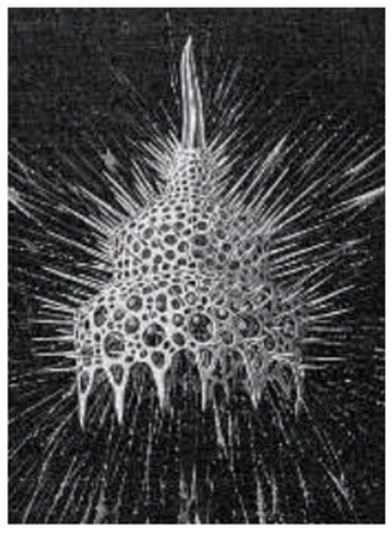
J. D. et F. N.

conditions environnementales auraient favorisé le rapprochement symbiotique afin de faciliter l'accès des partenaires aux ressources nutritives. Plus récemment, des études portant sur d'autres groupes de planctons radiolaires en association avec d'autres types de microalgues semblent confirmer une origine de l'association symbiotique pendant cette même période.

Depuis les premières observations de Thomas Henry Huxley, les scientifiques ont considérablement élargi le champ des connaissances. Le plancton regorge d'exemples d'associations entre les espèces. Mieux, ces symbioses participent au bon fonctionnement des cycles du carbone et de l'oxygène essentiels à la régulation de notre atmosphère. Cependant, toute la diversité des microorganismes, formée de lignées aux histoires évolutives longues et complexes, reste mal connue. Nos connaissances sur ces relations trophiques dans les symbioses planctoniques demeurent balbutiantes et reposent largement sur les travaux réalisés chez les coraux. Les métabolites échangés entre les partenaires et les mécanismes d'échanges ne sont pas entièrement identifiés, à cause surtout de limitations technologiques pour l'étude de ces microorganismes non cultivables (voir encadré). Les investigations au niveau moléculaire doivent se poursuivre en laboratoire, mais aussi en mer, grâce à des nouveaux outils comme *Underwater Vision Profiler*. Des projets de bouées équipées existent : réaliser des prélèvements et les séquencer automatiquement, pour suivre dans le temps le plancton.

Mais comment vivent les microalgues symbiotiques lorsqu'elles ne forment pas de symbiose ? Leur fonctionnement en phase libre nous reste quasi mystérieux. Dans les récifs, les microalgues se concentrent en très forte densité dans les tissus des invertébrés benthiques (comme les coraux). Mais il est rare de les découvrir en phase libre dans l'eau. La symbiose est-elle obligatoire pour les microalgues dans les océans ? Par ailleurs, quelle est la stabilité des relations symbiotiques dans le plancton face aux perturbations environnementales (augmentation des températures, acidification des océans, etc.) ?

Explorer la vie in situ est plus urgent que jamais. En 2009, l'Américain James Collins, spécialiste de biologie synthétique, a souligné la tragédie actuelle : la première génération de scientifiques disposant des outils nécessaires pour aborder les dimensions de la biodiversité sur Terre pourrait aussi être la dernière à avoir l'opportunité de le faire. ■



▲ *Radiolaire observé par E. Haeckel. Gravure sur bois, tirée de* Der Mensch und die Erde, *H. Kraemer, 1906.*

AKG-IMAGES

(1) F. Not *et al.*, « *Photosymbiosis in Marine Pelagic Environments* » in *The Marine Microbiome*. Springer ed., 2016.

(2) T. Biard *et al., Nature*, 532, 504, 2016.

(3) J. Decelle *et al., PNAS*, 109, 18000, 2012.

(4) C. Uwizeye *et al., PNAS*, 118, 2025252118, 2021.

Une porte vers la dépendance ?

La symbiose est perçue comme une association bénéfique qui favorise l'émergence de nouveaux organes ou de nouveaux organismes. Cependant, ces interactions très étroites entre des espèces différentes conduisent aussi à la dépendance. Où se situe la limite ?



▲ *Micrographie d'une mitochondrie (en orange ; sa longueur est de l'ordre du micromètre) dans une cellule animale. Les mitochondries fournissent de l'énergie aux cellules en oxydant le sucre et les graisses.*

KEITH R. PORTER / SCIENCE PHOTO LIBRARY / SUCRÉ SALÉ



Marc-André Selosse
BIOLOGISTE, MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE, PARIS

Professeur au Muséum national d'histoire naturelle, il est spécialiste en botanique et mycologie. Il travaille sur les symbioses, sur leur évolution, en particulier sur celles qui créent des réseaux entre des individus et des espèces différentes.

La symbiose a ponctué l'évolution d'innovations majeures : nouveaux organes, organismes chimériques ou nouvelles cellules. Cependant, quel étonnement de voir ces innovations issues d'interactions très étroites entre les partenaires de symbiose conduire à la dépendance ! Des espèces autrefois indépendantes ne peuvent plus vivre l'une sans l'autre. Prenons l'exemple, au niveau cellulaire, des mitochondries et des chloroplastes, ces petites bactéries présentes dans le cytoplasme des cellules eucaryotes (*), au rôle essentiel de « centrale à énergie ». Les premières se trouvent dans les cellules animales et végétales, tandis que les secondes existent dans les seules cellules photosynthétiques (plantes, algues). Descendantes de bactéries « libres », elles ont perdu leur autonomie. Ainsi, incapables de réguler les flux d'eau à leur surface, ces bactéries, isolées de la cellule-hôte sans précaution, explosent – un phénomène qui a retardé la reconnaissance de leur nature bactérienne ! Bien plus, si mitochondries et chloroplastes ont bien un génome, celui-ci ne code respectivement que 1 % et 5 % de l'ensemble des protéines qu'ils contiennent ! En effet, la plupart d'entre elles sont fabriquées à l'extérieur d'eux-mêmes, grâce à des gènes situés dans le noyau de la cellule-hôte, puis importées dans la bactérie symbiotique. Ces gènes sont soit présents ancestralement dans le génome du noyau, soit issus d'un transfert à partir du génome des bactéries vers le noyau au cours de l'évolution. Mitochondries et chloroplastes ne sont donc plus autonomes génétiquement car leur hôte code la plupart de leurs gènes !

Bien plus, chez certains eucaryotes vivant sans oxygène, la mitochondrie perd… tout son génome ! Une situation courante dans leur évolution. Dans certains cas, ces mitochondries sans génome produisent encore de l'énergie pour la cellule-hôte par une fermentation productrice d'hydrogène, d'où leurs noms d'hydrogénosomes : ils se trouvent chez des champignons du tube digestif des bovins, ou chez les loricifères, des animaux microscopiques des fonds marins. Dans d'autres cas, ces mitochondries produisent des molécules utiles au métabolisme de l'hôte : on parle de mitosomes, comme chez certaines amibes ou des champignons parasites d'animaux, les microsporidies.

LES MYCORHIZES : UNE COMPOSANTE INDISPENSABLE AUX PLANTES

De semblables pertes du génome se sont produites pour les chloroplastes, dans des lignées qui ont perdu la photosynthèse et où le chloroplaste résiduel sert à d'autres fonctions, comme la fabrication d'acides aminés : la plante parasite asiatique aux fleurs géantes, la rafflésia, possède ainsi des chloroplastes sans génome ! La fonction génétique est alors totalement abandonnée à l'hôte…

Les plantes et les animaux présentent des dépendances certes moins fortes que chez les bactéries intracellulaires, mais véritables. Par exemple, la stérilisation des graines chez les premières réduit leur taux de germination à cause de l'élimination des méthylobactéries : ces bactéries vivant dans les tissus des végétaux y synthétisent des cytokinines, hormones

1-5 %

EST LA PROPORTION

restante du génome des bactéries, à l'origine des mitochondries et des chloroplastes dans les cellules eucaryotes.

(*) **Les eucaryotes** sont des cellules qui se caractérisent par la présence de compartiments comme le noyau (à la différence des bactéries). Celui-ci abrite leur patrimoine génétique, le génome.

D.R.

notamment nécessaires à la germination. Neuf plantes sur dix ne peuvent pas pousser sans les mycorhizes évoquées plus haut… Le cas des animaux est aussi éloquent : leur santé dépend de l'ensemble des microbes symbiotiques qui les habite, le microbiote.

Louis Pasteur pensait que si l'on pouvait produire et nourrir des animaux stérilement, on découvrirait *« que la vie, dans ces conditions, deviendrait impossible »*. Par la suite, l'obtention de souris et de rats élevés en bulle stérile a nuancé sa théorie : oui, ces animaux survivent, mais ils ne sont pas en bonne santé ; une digestion plus difficile (et un besoin de 30 % d'aliments en plus) ; des tissus et des organes sous-développés, dont le système immunitaire appauvri en cellules ; jusqu'à des problèmes de mémoire et de comportement dus au développement anormal du système nerveux. Mais après la recolonisation expérimentale par un microbiote, ces symptômes disparaissent !

La santé et l'équilibre du microbiote sont liés, chez l'humain comme chez l'animal

L'humanité occidentalisée expérimente elle aussi, sans le vouloir, la perte partielle des microbes – entre un tiers et la moitié de diversité microbienne en moins par rapport à celle des tribus amazoniennes (1) : environnement aseptisé, aliments pasteurisés, excès d'antibiotiques dans les savons et la médecine… Chez les sujets atteints de maladies du métabolisme (diabètes, obésité), du système immunitaire (asthme, allergie, maladies auto-immunes…) ou du système nerveux (autisme, Parkinson, Alzheimer…), cette perte est souvent plus marquée, et le microbiote souvent moins diversifié, ce qui est une des causes de ces pathologies. En effet, lors des expériences cliniques, le remplacement du microbiote des malades par celui d'individus bien portants réduit transitoirement les symptômes. D'après des travaux dirigés par le Coréen Dae-Wook Kang, de l'université de Toledo (États-Unis), des enfants autistes ainsi traités présentent une amélioration comportementale sur plus de deux ans (2). Certes, les symptômes reviennent progressivement, accompagnés du retour d'un microbiote appauvri : les raisons complexes, également génétiques et environnementales, incluent en effet le microbiote.

Donc, a contrario, un microbiote diversifié permet un développement et un fonctionnement « normaux ». Des messages régulateurs sont échangés. Bethany Henrick et ses collègues de l'université de Californie ont étudié les bifidobactéries, dont la présence est favorisée par des composés du lait maternel, des oligosaccharides : elles régulent le développement et le fonctionnement du système immunitaire grâce à l'acide indole-acétique qu'elles produisent (3). Suite à la récente découverte de diverses molécules régulatrices, notre physiologie, notre système immunitaire et notre comportement apparaissent fortement influencés par le microbiote. Tous ne sont pas pleinement fonctionnels de façon autonome.

LA LOGIQUE ÉVOLUTIVE, UNE EXPLICATION PLAUSIBLE À LA DÉPENDANCE

Comment une telle dépendance a-t-elle pu s'établir ? Avec Alain Bessis, de l'Institut de biologie de l'École normale supérieure, Maria Pozo, de l'université de Grenade (Espagne), nous pensons que cette dépendance est logique d'un point de vue évolutif. L'évolution implique l'acquisition de nouvelles fonctions, soit par mutations, soit par l'acquisition d'un partenaire symbiotique portant ces fonctions (4). Il est possible de recruter des molécules produites par le partenaire, comme signaux de régulation du développement ou de la physiologie par exemple. Pour chaque fonction acquise par procuration et devenue nécessaire, une dépendance apparaît ! Mieux, quand une fonction existe dans les deux organismes d'une symbiose, cette redondance est instable ! L'un des deux peut en perdre l'usage : l'autre, ou encore l'association entre les deux organismes, suffit à réaliser cette fonction. Ainsi, l'acquisition de nouvelles fonctions et la perte de redondances font émerger des dépendances dans la symbiose. Et cela, sans guère de

POUR EN SAVOIR PLUS

■ M.-A. Selosse, *Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations,* Actes Sud, 2017.

probabilité de retour en arrière : en effet, si la fonction est bien accomplie, aucune sélection ne favorise le retour à l'autonomie de chacune des espèces impliquées… Ce mécanisme agit aussi avec des parasites qui ne tuent pas leur hôte et se propagent à leur descendance. Un exemple historique de ce passage de la maladie à la dépendance a été décrit dans les années 1970 par le biochimiste Kwang W. Jeon, de l'université du Tennessee à Knoxville (États-Unis), à la suite d'une infection bactérienne qui décima en 1966 une culture d'amibes *in vitro* (5). Certaines survécurent à la présence de bactéries dans leur cellule et en devinrent dépendantes : quand les bactéries sont tuées à l'aide d'antibiotiques, les amibes meurent. Le gène d'une enzyme vitale dans le métabolisme de l'amibe (S-adénosyl-méthionine synthétase) ne s'exprime plus : l'enzyme a été remplacée par celle, équivalente, de la bactérie. D'autres exemples proviennent de bactéries pathogènes, les wolbachias, qui affectent les insectes et les nématodes. Chez divers nématodes, ces bactéries sont devenues des partenaires obligatoires et bénéfiques en prenant un rôle dans la régulation de l'approvisionnement en fer de l'organisme ; chez les punaises de lit, une wolbachia est devenue nécessaire à la synthèse de vitamine B7 sans laquelle les punaises deviennent rachitiques et stériles…

Des répartitions aléatoires de fonctions entre symbiotes ou entre partenaires d'un parasitisme conduisent donc à des dépendances. Cette réflexion revisite et complète l'image classique d'une complexification et d'un progrès par la symbiose : des mécanismes neutres, sans action de la sélection, détruisent l'autonomie des protagonistes. Il existe une autre perspective sur la symbiose : neutre et accidentelle, expliquant l'émergence de dépendances entre symbiotes. Cette perspective renforce l'importance biologique de la symbiose car, avec le temps évolutif, la pertinence de l'organisme comme unité autonome se dilue dans celle de l'interaction biologique ! ■

(1) J.C. Clemente *et al., Sc. Adv., 1,* : e1500183, 2015.
(2) D.-W. Kang *et al., Microbiome, 5, 10,* 2017.
(3) M. Bethany. *et al., Cell, 184,* 3884, 2021
(4) M.-A. Selosse *et al., Trends Microbiol., 22,* 607, 2014.
(5) K. W. Jeon, *Science, 176,* 1122, 1972.

PÔLE COMMUNICATION ENS - D.R.

Modéliser l'évolution des interactions hôte-microorganisme

Caractériser la composition des microbiotes et modéliser l'évolution des interactions hôtes-microorganismes : voilà comment nous parvenons à déterminer comment les bactéries qui forment notre flore intestinale s'acquièrent et comment celle-ci évolue. Comprendre les mécanismes en jeu permet en outre de mieux appréhender la manière dont réagit cet écosystème face aux perturbations multiples liées à nos modes de vie actuels.



Benoît Perez-Lamarque
BIOLOGISTE, INSTITUT DE BIOLOGIE DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE, PARIS



Hélène Morlon
DIRECTRICE DE RECHERCHE AU CNRS, SPÉCIALISTE DE LA MODÉLISATION DE LA BIODIVERSITÉ

Bactéries, champignons, virus et autres microorganismes établissent, dans les intestins des animaux ou les racines des plantes, des écosystèmes microbiens divers et complexes : les microbiotes. Chez les grands singes, par exemple, dont l'être humain, l'intestin renferme plusieurs centaines d'espèces bactériennes. Ces microorganismes vivent en symbiose avec leur hôte : ils sont devenus indispensables à la plupart des animaux et des végétaux, jouant un rôle primordial dans leur bon fonctionnement en contribuant à leur nutrition, leur protection ou encore à leur développement. Un dérèglement de la composition du microbiote peut avoir des conséquences importantes, comme des troubles digestifs chez les animaux ou des déficits de croissance chez les plantes. Mais qu'est-ce qui détermine la composition d'un microbiote ? Comment un tel écosystème complexe est-il assemblé ? Comment hôtes et microorganismes

ont-ils évolué sur des millions d'années pour aboutir à la symbiose actuelle ? Les modélisations mathématiques aident aujourd'hui à le comprendre.

Grâce aux techniques modernes de séquençage de l'ADN, on caractérise de mieux en mieux la composition des microbiotes. À l'image d'une empreinte digitale, chaque espèce microbienne se distingue par une séquence d'ADN unique. Ainsi, le séquençage du microbiote d'un grand nombre d'espèces animales et végétales a révélé une importante variabilité de sa composition d'une espèce à l'autre. De surcroît, on observe souvent que des espèces hôtes évolutivement proches (dont la divergence est récente au cours de l'évolution) en possèdent de plus similaires que des espèces hôtes évolutivement distantes. Par exemple, le microbiote humain est plus proche en composition de celui des chimpanzés que de ceux des gorilles ou des orangs-outans. On parle alors de « phylosymbiose », où le préfixe « phylo » renvoie aux relations d'apparentement entre espèces, la phylogénie. Des cas de phylosymbiose ont par exemple été observés chez des araignées de l'archipel d'Hawaï ou des pikas en Amérique, mais aussi, plus généralement, chez l'ensemble des mammifères, certains groupes d'oiseaux, de poissons et d'invertébrés, et chez de nombreuses familles de plantes.

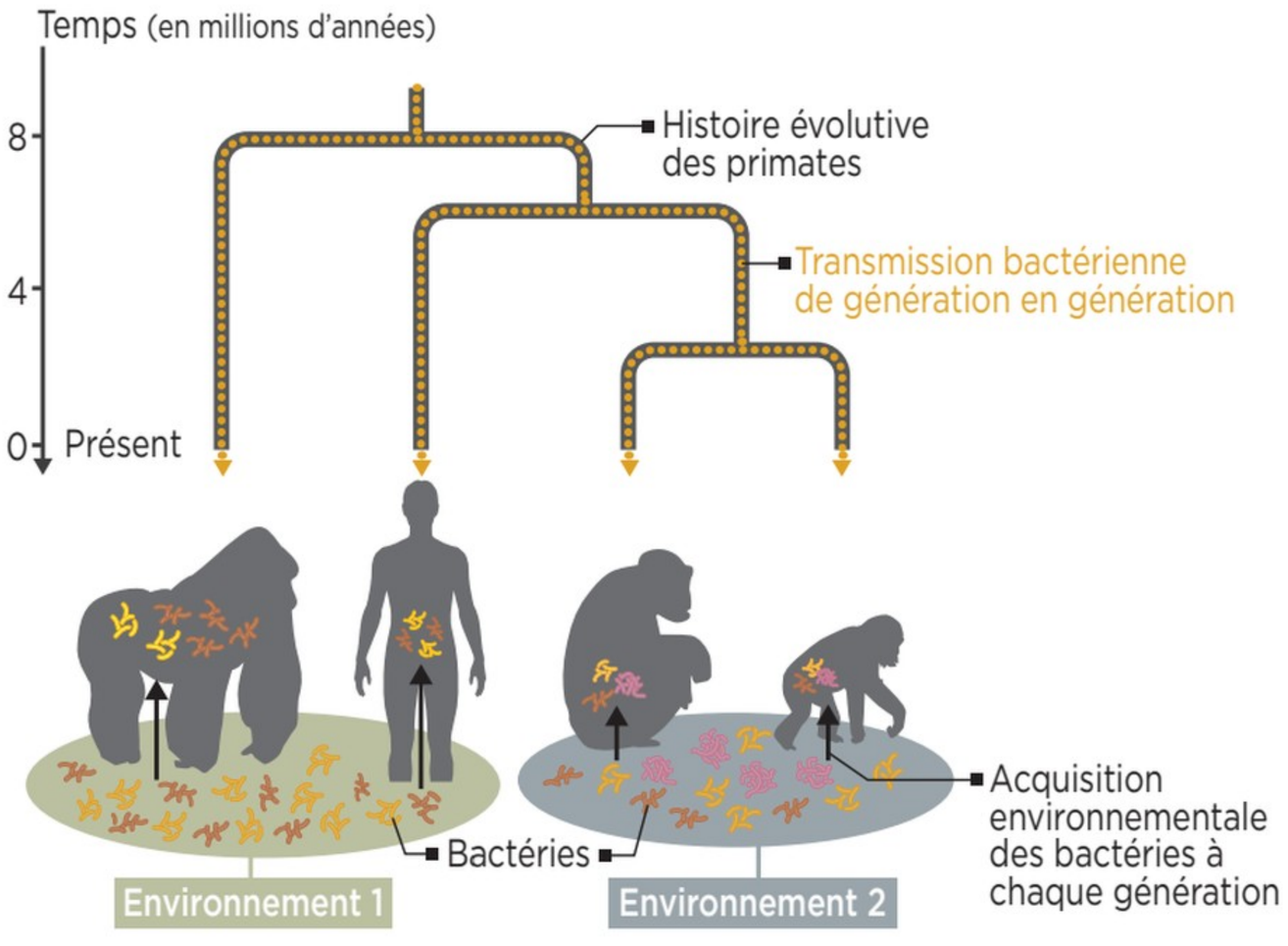
LA TRANSMISSION EST DOUBLE : D'UNE GÉNÉRATION À L'AUTRE ET PAR L'ENVIRONNEMENT

Le phénomène de phylosymbiose révèle que loin d'être très changeante et le fruit du hasard, la composition du microbiote des espèces peut être conservée en partie durant des millions d'années. Une telle conservation des interactions hôtes-microorganismes a différentes origines. Par exemple, une partie du microbiote peut être transmise « verticalement » de générations d'hôtes en générations d'hôtes. Tel est le cas pour la bactérie *Helicobacter pylori,* fréquemment transmise de mère à enfant chez l'être humain, qui a ainsi pu s'adapter au cours du temps au milieu acide de notre estomac. Sur le long terme, les microorganismes transmis verticalement évoluent donc en parallèle de leurs hôtes, ce qui génère cette phylosymbiose.

Toutefois, celle-ci peut également émerger lorsque les microorganismes sont acquis à partir de l'environnement des hôtes à chaque génération, sans transmission verticale. En effet, certaines caractéristiques des espèces qui influencent l'acquisition des microorganismes à partir de l'environnement – tel le régime alimentaire, ou encore leur aire de répartition géographique – peuvent être conservées des millions d'années durant. Avec ce scénario d'acquisition « environnementale », la conservation des caractéristiques des hôtes entraîne alors celle de la composition de leur microbiote, à l'origine de la phylosymbiose.

PHYLOSYMBIOSE CHEZ LES GRANDS SINGES

L'histoire évolutive de quatre espèces de primates (le gorille, l'être humain, le chimpanzé et le bonobo) est représentée par une phylogénie (en noir) : l'être humain est plus proche génétiquement du chimpanzé et du bonobo que du gorille. Les microbiotes d'espèces de primates évolutivement proches ont des compositions plus similaires que celles d'espèces évolutivement distantes (phylosymbiose). Cette phylosymbiose peut être expliquée par la transmission verticale de génération en génération de la bactérie orange (qui évolue ainsi « le long » de la phylogénie des hôtes) ou bien par les différences de bactéries à disposition dans l'environnement (les bactéries roses sont seulement présentes dans l'environnement des chimpanzés et des bonobos). L'utilisation de modèles mathématiques permet de distinguer ces deux scénarios et d'identifier des bactéries transmises verticalement dans le microbiote intestinal des primates.



BRUNO BOURGEOIS

Ainsi, si la présence de phylosymbiose met en lumière l'importance de l'histoire évolutive des hôtes dans la composition du microbiote des espèces, elle soulève beaucoup de questions sur les modalités d'évolution des interactions hôtes-microorganismes. Les modèles mathématiques éclairent ces interrogations, en se servant de l'information contenue dans l'ADN des microorganismes actuels qui le composent. En effet, les séquences d'ADN accumulent peu à peu des mutations au cours du temps, de sorte que celles caractéristiques de deux microorganismes évolutivement proches sont généralement plus similaires que celles de microorganismes évolutivement distants, c'est-à-dire ayant divergé voici longtemps. Autrement dit, les séquences d'ADN microbiennes observées de nos jours retiennent en leur sein des traces de l'histoire évolutive de ces microorganismes. En particulier, la trace laissée lors d'une transmission verticale diffère de celle laissée lors d'une acquisition environnementale.

ANALYSER, MODÉLISER PUIS PRÉVOIR

La modélisation probabiliste de l'évolution des séquences d'ADN microbien permet de distinguer ces deux traces, et ainsi de déterminer les scénarios les plus probables d'acquisition des microorganismes. Par exemple, un scénario de transmission verticale stricte est obtenu en modélisant les mutations successives pouvant avoir lieu sur une séquence d'ADN microbien qui évoluerait « le long » de la phylogénie des hôtes, c'est-à-dire divergeant en même temps qu'eux (voir schéma ci-contre). A contrario, un scénario d'acquisition environnementale est obtenu en faisant l'hypothèse que l'évolution des séquences microbiennes est indépendante de la phylogénie des hôtes. Si la probabilité d'observer les séquences d'ADN microbien, obtenues par séquençage du microbiote, est supérieure avec un scénario de transmission verticale qu'avec un scénario de transmission environnementale, on peut conclure que les microorganismes ont vraisemblablement été transmis verticalement sur le long terme. Nous avons ainsi pu montrer que plus de 5 % des bactéries

Mieux comprendre comment le microbiote est acquis et évolue, l'un des enjeux de la modélisation mathématique couplée à l'analyse

intestinales des primates, dont celles de l'être humain, ont été transmises verticalement au cours de leur évolution (1). À l'inverse, chez d'autres groupes d'espèces, comme les araignées de l'archipel d'Hawaï, dans lesquelles de la phylosymbiose a été trouvée, nous n'avons pas détecté de bactéries transmises verticalement : l'acquisition semble donc être entièrement environnementale. Dans ce cas, l'histoire de colonisation des îles par les araignées, combinée à une répartition hétérogène des microorganismes entre îles, pourrait en grande partie expliquer la composition actuelle des microbiotes de ces araignées.

Grâce à la caractérisation de la composition des microbiotes et le développement de modèles mathématiques de l'évolution des interactions hôtes-microorganismes, on comprend ainsi de mieux en mieux comment le microbiote est acquis et évolue. Selon les mécanismes en jeu, nous sommes alors en mesure de mieux appréhender la résilience des interactions symbiotiques entre hôtes et microorganismes face aux perturbations multiples liées à nos modes de vie actuels. Par exemple, chez l'être humain, nous savons bien que l'utilisation déraisonnée d'antibiotiques peut conduire à la disparition de certaines bactéries intestinales. Si les bactéries acquises à partir de l'environnement peuvent ensuite facilement recoloniser l'intestin, à l'inverse, pour les bactéries transmises verticalement depuis des millions d'années, cette disparition pourrait être irréversible avec des conséquences néfastes sur la santé humaine (2). ■

(1) B. Perez-Lamarque *et al.*, *bioRxiv*, doi : 10.1101/2021.08.30.458192, 2021.

(2) M. Groussin *et al.*, *Nat. Commun.*, *8*, 14319, 2017.

Le microbiote, compagnon invisible des plantes

Les racines des plantes vivent en interaction étroite avec des communautés microbiennes. La survie et la croissance des espèces végétales dépendent de cette symbiose, à tel point que les chercheurs envisagent de sélectionner ces communautés pour améliorer les plantes cultivées.



Manuel Blouin
PROFESSEUR EN ÉCOLOGIE À L'INSTITUT AGRO DIJON
Il est membre du laboratoire de recherche Agroécologie (Inrae - Institut Agro, université de Bourgogne).

« *On a souvent besoin d'un plus petit que soi* ». L'adage de Jean de la Fontaine trouve un écho inattendu dans un champ de recherche qui en est encore à ses prémices : l'amélioration des cultures végétales par la sélection de leurs partenaires microscopiques, ces communautés microbiennes du sol regroupant bactéries, champignons et archées qui forment le microbiote racinaire.

Prenons *Brachypodium distachyon*, une graminée modèle utilisée pour étudier la croissance des céréales en raison de son court cycle de vie. Notre équipe a démontré l'improbable : après cinq générations de sélection infructueuse du microbiote racinaire corrélé aux plantes les plus productives, la communauté microbienne finit par se stabiliser, et la croissance des plantes s'améliore significativement. Pour s'assurer du rôle exclusif du microbiote dans ce processus, nous avons transplanté celui-ci de génération en génération sur un même lot de graines : le microbiote évolue, mais pas la plante hôte. Et pourtant, l'effet positif du microbiote sur la croissance des graminées devient héritable et s'amplifie au fil des générations (1).

Dès 2000, des biologistes américains prouvent que l'on peut accroître la biomasse des plantes en sélectionnant leur microbiote racinaire (2). La recherche sur cette « sélection par le microbiote » connaît aujourd'hui un fort engouement : depuis 2012, de nombreux spécialistes de biologie végétale ont mis en évidence tour à tour que la sélection du microbiote des plantes suffisait à augmenter leur tolérance à la sécheresse ou au sel, à modifier leur date de floraison ou encore à améliorer leur croissance ! À l'origine de ce changement de perspective agronomique, une meilleure connaissance des symbioses entre plantes et microorganismes du sol, fruit de plus d'un siècle de recherche.

En 1885, le botaniste Albert Frank décrit la première mycorhize, cette symbiose liant un champignon aux racines d'une plante. Cette associa-

D.R.



INRAE - BFC / JULIEN MARTINET

▲ *Les RhizoTubes®, en préservant le végétal, permettent de caractériser le système racinaire des plantes et la résultante des interactions entre plantes et microorganismes.*

tion est répandue : 80 % des plantes terrestres développent des endomycorhizes, interactions intimes où les filaments du champignon se glissent entre paroi et membrane plasmique des cellules racinaires. Cette symbiose est obligatoire pour le champignon : il ne peut vivre sans la plante. La plante mycorhizée alloue 20 % du carbone fixé par la photosynthèse à « ses » champignons mycorhiziens. Un bon investissement quand on sait que les mycorhizes multiplient par 1 000 la surface d'échange de la plante avec le sol (3) ! Ainsi, jusqu'à 80 % de l'azote et du phosphore qu'elle assimile provient de ses symbiotes fongiques. Apparue il y a 450 millions d'années, la symbiose mycorhizienne s'est révélée cruciale pour que les plantes colonisent la terre ferme, à une époque où elles n'avaient pas de vrai système racinaire.

Les mycorhizes : un réseau complexe qui permet un échange nutritif, informatif et énergétique entre les plantes

Ces associations entre plantes et champignons ne s'arrêtent pas là : les mycorhizes forment un réseau complexe où chaque champignon relie les racines de plusieurs plantes qui échangent par ce biais nutriments, informations et énergie. Des plantes ayant perdu leur capacité de photosynthèse se développent ainsi grâce aux filaments fongiques, qui leur amènent à partir d'autres espèces végétales des molécules produites par la photosynthèse.

DES BACTÉRIES, SOUTIEN DES PLANTES

Si certains champignons du microbiote racinaire sont devenus indispensables aux plantes, ils ne sont pas les seuls : les bactéries sont tout aussi importantes. Chez les légumineuses, la fixation d'azote atmosphérique est réalisée dans des structures appelées nodules qui hébergent des bactéries du genre *Rhizobium*. Lorsque *Rhizobium* colonise une racine, celle-ci développe des nodules. À l'intérieur, les bactéries sont confinées dans des vésicules sans dioxygène, ce qui optimise l'activité de l'enzyme bactérienne fixant l'azote atmosphérique, la nitrogénase. Vite identifiée puis cultivée, *Rhizobium* sera rapidement diffusée sous la forme d'inoculums auprès des agriculteurs qui l'utilisent, par exemple, pour aider à fixer l'azote de leurs légumineuses, un facteur de croissance important. Étonnamment, les mécanismes moléculaires responsables de structures aussi différentes que les mycorhizes ou les nodules reposent sur l'activation initiale de gènes communs à des familles botaniques éloignées.

UN RÔLE IMMUNITAIRE DE L'INTERACTION

Les symbioses entre bactéries du sol et végétaux ne se limitent pas à la fixation d'azote atmosphérique. Chaque plante émet des molécules par ses racines appelées exsudats qui attirent des microorganismes capables de lui fournir les minéraux dont elle a besoin. Azote, phosphore, potassium… Ces nutriments sont véhiculés soit par diffusion passive, soit par le flux d'eau qui va du sol vers la racine quand la plante transpire. Les biofilms bactériens qui recouvrent la surface racinaire permettent en outre à la plante de mieux supporter la sécheresse.
En plus de cette fonction nutritive, les symbioses entre plantes et bactéries du sol revêtent une fonction immunitaire, puisque les exsudats peuvent stimuler l'activité et la quantité de microorganismes protecteurs. Un des cas les plus étudiés concerne la protection du blé contre le champignon pathogène *Gaeumannomyces graminis,* responsable de la maladie appelée piétin-échaudage. Des études ont souligné l'efficacité de l'inoculation du sol par la bactérie *Pseudomonas fluorescens* dans la protection du blé contre cette maladie, probablement grâce au fait que la bactérie produise de nombreux antibiotiques (4).
Enfin, certaines hormones végétales, comme les auxines, sont émises par des bactéries du sol et influencent la croissance racinaire, facilitant leur infection. À l'inverse, d'autres hormones tels que l'acide jasmonique, l'éthylène

Le précieux coup de pouce des vers de terre

Vers de terre, collemboles ou nématodes influencent le développement des plantes par la production d'hormones végétales telles que l'auxine, probablement du fait de la stimulation de bactéries du sol. Produite au sommet de la plante et circulant via la sève jusqu'aux racines, l'auxine est en effet synthétisée par 80 % des bactéries. En activant ces bactéries, les vers de terre permettent à des plantes mutantes



▲ *Les vers de terre aident certaines plantes à retrouver une croissance normale.*

– l'*Arabidopsis thaliana* –, incapables d'approvisionner leurs racines en auxine, de retrouver une croissance normale (1).
Comme dans les interactions plantes-microbes, l'unité de sélection semble dépasser la barrière de l'espèce dans les interactions plantes-animaux : nous avons montré qu'en plaçant seuls des plants de *Brachypodium distachyon* ou des vers de terre dans trois sols différents, chacun conservait toujours une même sous-communauté de microbes du sol, appelée core-microbiote (2).
Ce dernier était différent pour les vers seuls, pour les plantes seules… et dans l'association vers-plantes, qui développait son propre core-microbiote ! ■ M. B.

(1) R. Puga-Freitas *et al.*, *PLoS One, 7,* e49504, 2012.

(2) S. Jacquiod *et al.*, *Soil Biol. Biochem., 144*, 107754, 2020.

ou l'acide salicylique permettent aux plantes de mieux résister à des pathogènes en induisant une résistance systémique, comme le ferait un vaccin. Les plantes « n'écoutent » pas que les microorganismes, mais également des animaux, par exemple les vers de terre (lire l'encadré ci-dessus).

UN ENJEU ENVIRONNEMENTAL

À la lumière de la myriade de symbioses que tissent les plantes avec leur microbiote racinaire, l'amélioration des variétés cultivées jusqu'ici focalisée sur le génome de la plante pourrait élargir son champ d'investigation. Comme l'action des symbiotes ou pathogènes microbiens dépend très souvent des autres membres du microbiote auquel ils appartiennent, une nouvelle stratégie d'amélioration des plantes est de promouvoir ses communautés microbiennes racinaires les plus bénéfiques. Cette approche est d'autant plus pertinente en agronomie qu'un objectif majeur est de réduire l'utilisation des engrais de synthèse et des pesticides.
D'un point de vue plus fondamental, nos résultats font écho au concept d'holobionte. Ce terme désigne l'ensemble constitué par un hôte pluricellulaire (ici, la plante) et sa communauté microbienne associée, vu comme une unité de sélection (5). Cette proposition titille la théorie classique de l'évolution établie par Darwin en remettant en cause le fait de s'intéresser soit à la plante, soit à chacune des espèces de son microbiote comme unités de sélection. En se restreignant à l'échelle de l'organisme individuel, cette approche traditionnelle néglige le fait que la survie et la croissance de ces espèces reposent en grande partie sur leurs interactions symbiotiques. Dans cette optique, Éric Bapteste propose de suivre non plus l'évolution des espèces en tant qu'entités isolées, mais l'évolution des processus qui sous-tendent leurs interactions (lire page 24). En sélectionnant tout à la fois, les plantes et le microbiote de *Brachypodium distachyon* afin d'améliorer un trait végétal, nos prochains travaux participeront à tester la validité du concept d'holobionte. ■

(1) S. Jacquiod *et al.*, *Ecol. Lett., 25*, 189, 2022.
(2) W. Swenson *et al*, *PNAS, 97,* 9110 – 9114, 2000.
(3) M.-A. Selosse, *Jamais seul,* Actes Sud Nature, 2017.
(4) D.M., Weller *et al.*, *Annu. Rev. Phytopathol., 40*, 309–348, 2002.
(5) I. Zilber-Rosenberg *et al.*, *FEMS Microbiol. Rev, 32*, 723–735 2008.

MARYNA PLESHKEN / SHUTTERSTOCK

Plantes et microbiotes, un subtil équilibre

Comprendre comment des microbes colonisent une plante malgré son système immunitaire et identifier les gènes qui favorisent cette symbiose, tels sont les objectifs des recherches microbiologiques de pointe. Un enjeu scientifique qui va de pair avec la sécurité alimentaire : ces interactions bénéfiques appliquées aux cultures permettraient de limiter les intrants chimiques.



Cara H. Haney
MICROBIOLOGISTE, UNIVERSITÉ DE COLOMBIE BRITANNIQUE, VANCOUVER (CANADA)
Professeure à l'université et titulaire de la chaire canadienne des mécanismes moléculaires dans les interactions hôte-microbiome.

Passives les plantes ? Pas tant que ça ! Comme tous les êtres vivants, elles sont confrontées à un choix : coopérer ou pas avec d'autres organismes. La symbiose présente des risques mais également des avantages. Ainsi les plantes constituent des sources de nourriture potentielle pour de nombreux autres organismes, qu'il s'agisse de bactéries pathogènes microscopiques ou de grands animaux comme l'être humain. Mais parce qu'elles sont coincées sur place, elles ont évolué pour coopérer avec les champignons et les bactéries afin d'accéder aux nutriments du sol nécessaires à leur survie. Mieux comprendre ces mécanismes par lesquels les plantes coopèrent avec des microbes bénéfiques tout en limitant les pathogènes, c'est tout l'objectif d'un certain nombre de recherches, dont celles que nous menons au sein de mon laboratoire, à l'université de Colombie britannique (1). À l'enjeu purement scientifique s'ajoute celui d'assurer notre sécurité alimentaire. Faire la lumière sur ces mécanismes, c'est se donner les moyens, à terme, de savoir sélectionner les plantes cultivables le plus à même d'utiliser les microbes bénéfiques pour maximiser l'absorption des nutriments tout en résistant aux parasites et aux pathogènes tels que champignons, virus et bactéries. L'éventail est large. Ils peuvent être si dévastateurs qu'ils ont, parfois, façonné le cours de l'histoire. Ce fut le cas lors de la Grande famine qui frappa l'Irlande au milieu du XIX[e] siècle. En cause, le mildiou, une maladie due à des microorganismes. Les cultures de pommes de terre avaient été presque intégralement anéanties. En quelques années seulement, les décès et un exode massif réduisirent la population de l'île de moitié ! Aujourd'hui, cette menace persiste : les phytopathogènes dévastateurs sont encore présents un peu partout dans le monde et continuent de représenter l'une des plus grandes menaces pour la sécurité alimentaire (2).

Les plantes ont un système immunitaire inné qui leur fournit soit une barrière physique (des feuilles cireuses, par exemple), soit des récepteurs cellulaires capables de détecter des molécules étrangères ou de percevoir les dommages causés par les parasites et les agents pathogènes. Ainsi prévenue de la présence d'un envahisseur, une plante peut-elle activer des défenses chimiques sophistiquées (3) ? Le goût amer de certains légumes, tel le brocoli ou les épinards, en est une manifestation. Ces défenses ont évolué pour aider les plantes à éviter le parasitisme des bactéries, des champignons et des insectes pathogènes et nuisibles.

TUER L'ENNEMI SANS TOUCHER L'AMI

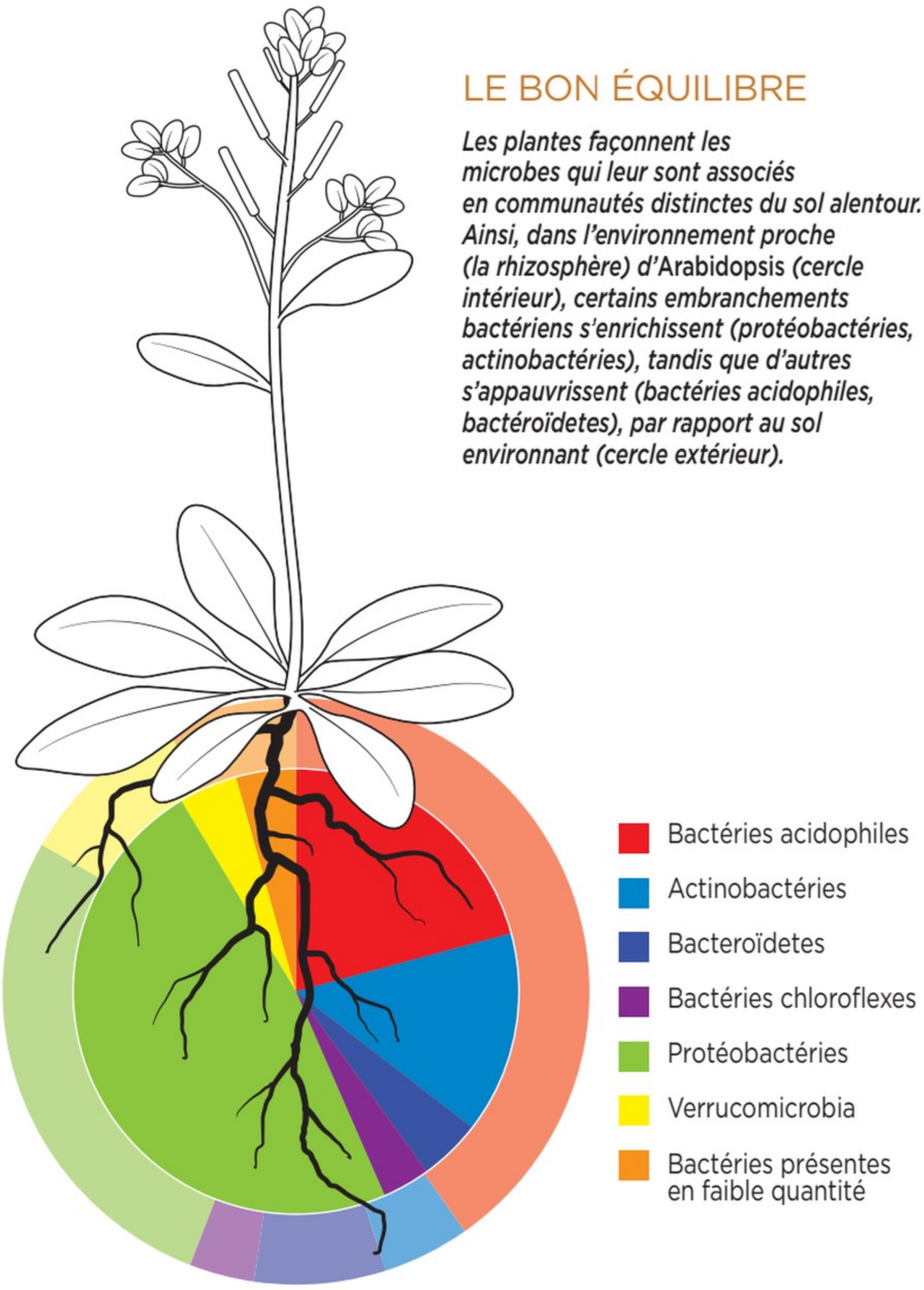
À l'opposé, les plantes ont élaboré des associations bénéfiques avec des communautés complexes de microbes, appelées « microbiotes ». Comment combattent-elles les agents pathogènes sans tuer en même temps ces microbes bénéfiques ? La question a suscité un fort intérêt ces dernières années ; nombreux sont ceux qui se sont penchés sur la limite parfois ténue entre ces deux comportements. Si les plantes affaiblissent trop leur système immunitaire, les microbes qui constituent le microbiome peuvent devenir des agents pathogènes opportunistes. Ils peuvent alors prendre trop de nutriments à la plante et l'affaiblir. À l'inverse, si la réaction immunitaire

PAUL JOSEPH

d'une plante est trop forte, elle peut induire une réponse auto-immune contre ses propres microbes, tuant ceux qui lui sont bénéfiques et, du même coup, se faire du mal. Par conséquent, les plantes doivent ajuster finement leurs réponses immunitaires et réguler la disponibilité des nutriments. Pour y parvenir, elles combinent deux éléments : la détection de la disponibilité des nutriments dans l'environnement et celle des microbes présents. S'ensuit un processus complexe de décision, afin de savoir s'il faut réduire les défenses (si les nutriments sont limités et qu'aucun agent pathogène n'est présent) ou au contraire les augmenter (si les nutriments sont élevés et que des agents pathogènes sont présents).

La manière dont les plantes distinguent les microbes amicaux des microbes inamicaux met probablement en jeu de multiples couches de détection et de contrôle. Les recherches sur ce sujet ont principalement été menées à l'aide de la plante modèle *Arabidopsis thaliana,* une petite plante à croissance rapide disposant d'outils génétiques et génomiques abondants. Si une plante détecte des microbes sans savoir s'ils lui sont bénéfiques ou nuisibles, elle n'augmentera que faiblement ses réponses immunitaires. En revanche, si les plantes sentent les microbes et savent qu'ils causent des dommages, leur réponse immunitaire sera plus robuste. Et si une plante détecte qu'un microbe lui apporte un avantage, comme de l'azote ou du phosphore supplémentaire, elle peut encourager activement ce microbe à rester. De cette façon, les plantes sont en mesure de tuer sélectivement les agents pathogènes, tout en s'engageant dans des relations de coopération avec les microbes bénéfiques.

LE BON ÉQUILIBRE



*Les plantes façonnent les microbes qui leur sont associés en communautés distinctes du sol alentour. Ainsi, dans l'environnement proche (la rhizosphère) d'*Arabidopsis *(cercle intérieur), certains embranchements bactériens s'enrichissent (protéobactéries, actinobactéries), tandis que d'autres s'appauvrissent (bactéries acidophiles, bactéroïdetes), par rapport au sol environnant (cercle extérieur).*

BRUNO BOURGEOIS

POURQUOI PESTICIDES ET ENGRAIS SONT-ILS DEVENUS INDISPENSABLES ?

Au cours de la domestication, les plantes ont été sélectionnées pour être plus grandes et plus nutritives que leurs parents sauvages. Toutefois, leur capacité à se défendre contre les agents pathogènes et à entrer en contact avec les microbes bénéfiques n'a jamais été prise en compte. C'est pourquoi, au fil du temps, un certain nombre de nos plantes cultivables ont perdu la capacité de leurs ancêtres sauvages à se défendre contre les pathogènes et à s'engager dans une relation avec des microbes bénéfiques. D'où leur besoin de pesticides et d'engrais pour remplacer ces interactions symbiotiques naturelles.

Les recherches que nous menons au sein de mon laboratoire canadien – ainsi qu'un certain nombre d'autres équipes à travers le monde –visent à comprendre comment les plantes maintiennent naturellement cette homéostasie, autrement dit cette stabilité symbiotique. À terme, nous espérons pouvoir réintroduire ces interactions bénéfiques dans nos cultures afin d'améliorer la sécurité et la durabilité tout en réduisant l'utilisation des intrants chimiques (4) ■

(1) D. Thoms *et al.*, *Mol. Plant-Microbe Interact.*, 34, 462, 2021.

(2) H. N. Fones *et al.*, *Nat Food,* 1, 332, 2020.

(3) C. H. Haney *et al.*, *Biochem.* (Lond), 36, 1, 2014.

(4) N. R. Wang et C. H. Haney, *Biochem.* (Lond), 42, 20, 2020.

La domestication des champignons du fromage

Les fromages affinés par les moisissures ont une belle croûte aux couleurs variées : blanche, bleu-gris, verte. Mais d'où viennent ces moisissures – ces champignons – que l'on retrouve sur ces mets très prisés des Français ? Comment se sont-elles adaptées ? Elles résultent d'un processus de domestication qui a abouti à améliorer le goût, l'odeur et l'aspect de ces produits affinés. Les analyses des génomes des champignons des fromages à pâte persillée et à pâte molle révèlent des histoires évolutives différentes.



▲ Penicillium roqueforti *(ici par micrographie électronique à balayage) est le champignon utilisé pour les fromages à pâte persillée.*

DENNIS KUNKEL MICROSCOPY / SCIENCE PHOTO LIBRARY / SUCRÉ SALÉ



Jeanne Ropars,
BIOLOGISTE, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY
Elle est chargée de recherche CNRS au laboratoire « Écologie, systématique et évolution » (ESE) (université Paris-Saclay - CNRS - AgroParisTech).



Tatiana Giraud,
BIOLOGISTE, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY
Directrice de recherche au CNRS, membre de l'Académie des sciences, professeure au Collège de France, adjointe à la direction du laboratoire ESE.

C'est à Charles Darwin, qui publie en 1859 la fameuse théorie de l'évolution par sélection naturelle, que l'on doit l'explication sur la façon dont les populations peuvent s'adapter et se diversifier : il existe ainsi une variabilité dans les populations, certains caractères héritables permettant aux individus qui les portent de mieux survivre ou de mieux se reproduire. Raison pour laquelle ces caractères augmentent en fréquence dans les populations. Charles Darwin avait utilisé la domestication des pigeons comme modèle afin de comprendre et expliquer la sélection naturelle. La domestication correspond en effet à une sélection humaine forte et récente pour des caractères d'intérêt, et souvent à une diversification rapide en multiples variétés.

Si on ne peut pas apparenter la domestication à une symbiose dans son acception habituelle, on peut toutefois constater les bénéfices retirés par les deux partenaires, l'être humain et l'organisme domestiqué. Chez les animaux, l'exemple emblématique est le chien ; la sélection humaine à partir du loup gris, entamée il y a plusieurs dizaines de milliers d'années sur des critères d'apparence et de comportement a abouti aux races de chiens actuelles. Cochons, poules et chevaux ont connu le même sort. Parmi les plantes, le maïs a été domestiqué depuis des millénaires à partir de la téosinte, cette graminée endémique du Mexique. La sélection humaine a donné des épis plus gros avec des grains non déhiscents (*). Pensons aussi aux arbres fruitiers : pommiers, poiriers, abricotiers, etc. Mais, dans cet inventaire, il n'est pas rare d'oublier… les microorganismes. Pourtant, nous les utilisons et consommons quotidiennement ! Pain, fromage, vin, miso, kéfir, kombucha et yaourt sont tous des aliments fermentés par des microorganismes (bactéries, levures et champignons filamenteux). Nous utilisons aussi les microorganismes pour nous soigner : la pénicilline est un antibiotique produit par un champignon du genre *Penicillium*. Là encore, le bénéfice pour les humains est clair.



▲ *Mise en culture, la moisissure* Penicillium biforme *apparaît gris-vert tandis que* P. camemberti *est blanche et d'aspect plus cotonneux.*

DR - PATRICK IMBERT / COLLÈGE DE FRANCE

LA FAIBLE DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE DE P. ROQUEFORTI DES FROMAGES

Revenons à nos fromages. Leurs champignons ont-ils été domestiqués, autrement dit les souches isolées du fromage sont-elles génétiquement et morphologiquement différentes des souches isolées d'autres environnements ? L'être humain a-t-il domestiqué les moisissures en sélectionnant celles qui donnaient selon lui les meilleurs fromages ? Pour répondre à cette question, nous avons étudié les fromages à pâte persillée et à pâte molle.

Penicillium roqueforti est la moisissure bleue inoculée au début du processus de fabrication des fromages à pâte persillée comme le roquefort, la fourme d'Ambert, le gorgonzola, le stilton… Mais ce champignon est aussi parfois trouvé dans le sol ou dans la matière organique en décomposition. C'est un contaminant très commun des produits alimentaires et des matières végétales, comme le fourrage fermenté pour sa conservation (ensilage). Des analyses de génomes entiers et de caractères morphologiques et métaboliques de *P. roqueforti* ont

(*) **La déhiscence** est une fonction de certains organes végétaux qui s'ouvrent spontanément, sans se déchirer, à certaines époques, pour libérer leur contenu (fruit, graine, pollen ou spore).

été réalisées par Émilie Dumas, chercheuse post-doctorante, dans le cadre d'un projet européen dirigé par Tatiana Giraud et d'un projet de l'Agence nationale de la recherche dirigé par Antoine Branca, maître de conférences au laboratoire Écologie, systématique et évolution (université Paris-Saclay-CNRS-AgroParisTech). Ces analyses ont révélé que les souches du fromage différaient génétiquement des souches isolées d'autres environnements, et qu'elles étaient divisées en deux groupes génétiques distincts : l'un trouvé uniquement dans les roqueforts et l'autre dans tous les autres bleus, français et étrangers (1).

La diversité génétique de *P. roqueforti* des fromages est nettement moins importante que celle des deux groupes génétiques correspondant à l'ensilage et aux contaminants alimentaires. La raison ? Une sélection d'un petit nombre de lignées, voire une seule lignée dans la population non-roquefort. Davantage de diversité a pu être conservée dans la population roquefort, probablement grâce à l'obligation d'utiliser des souches locales dans le cadre du cahier des charges de l'appellation d'origine protégée (AOP). Ces souches isolées de contaminants alimentaires pourraient-elles être des souches échappées de fromages ? En effet, les champignons produisent des spores qui volent facilement, et des contaminations pourraient se produire dans les frigos. Mais non ! Les contaminants alimentaires forment une population spécifique. On aurait pu aussi penser que les souches isolées de l'ensilage sont la population « ancestrale » des souches isolées de fromages. Mais là encore l'analyse des données génétiques montre que la population d'ensilage forme également une population spécifique, qui s'est différenciée très récemment de la population des contaminants alimentaires. Les différences morphologiques et physiologiques sont importantes entre les groupes génétiques trouvés sur le fromage, les fourrages d'ensilage et les contaminants alimentaires. Mais elles sont tout aussi importantes entre les deux moisissures des pâtes persillées. Thibaut Caron, dans son travail de thèse, a montré – grâce à des fromages expérimentaux réalisés au laboratoire Inrae d'Aurillac – que les deux populations de champignons du fromage produisent davantage de bleus et de bien meilleurs arômes que ceux des populations d'ensilage ou trouvés sur les contaminants (2). Et c'est surtout vrai pour les champignons du roquefort ! La population de moisissures non-roquefort pousse le plus vite sur un milieu type fromage et a une meilleure tolérance au sel.

Les champignons ne sont pas des bactéries

Les champignons, êtres vivants souvent microscopiques, génétiquement proches des animaux, très loin des plantes, eucaryotes (au contraire des bactéries), regroupent : les levures, les moisissures, les champignons macroscopiques, les lichens, les rouilles et les charbons. Ils peuvent être saprophytes, parasites ou symbiotiques et sont capables pour la plupart de se reproduire de manière sexuée et asexuée (propagation clonale). Présents sur l'ensemble de la planète, dans tous les milieux, formant l'un des plus importants groupes d'organismes, les champignons ont des rôles essentiels dans le fonctionnement des écosystèmes.

UNE DOMESTICATION EN PLUSIEURS ÉTAPES

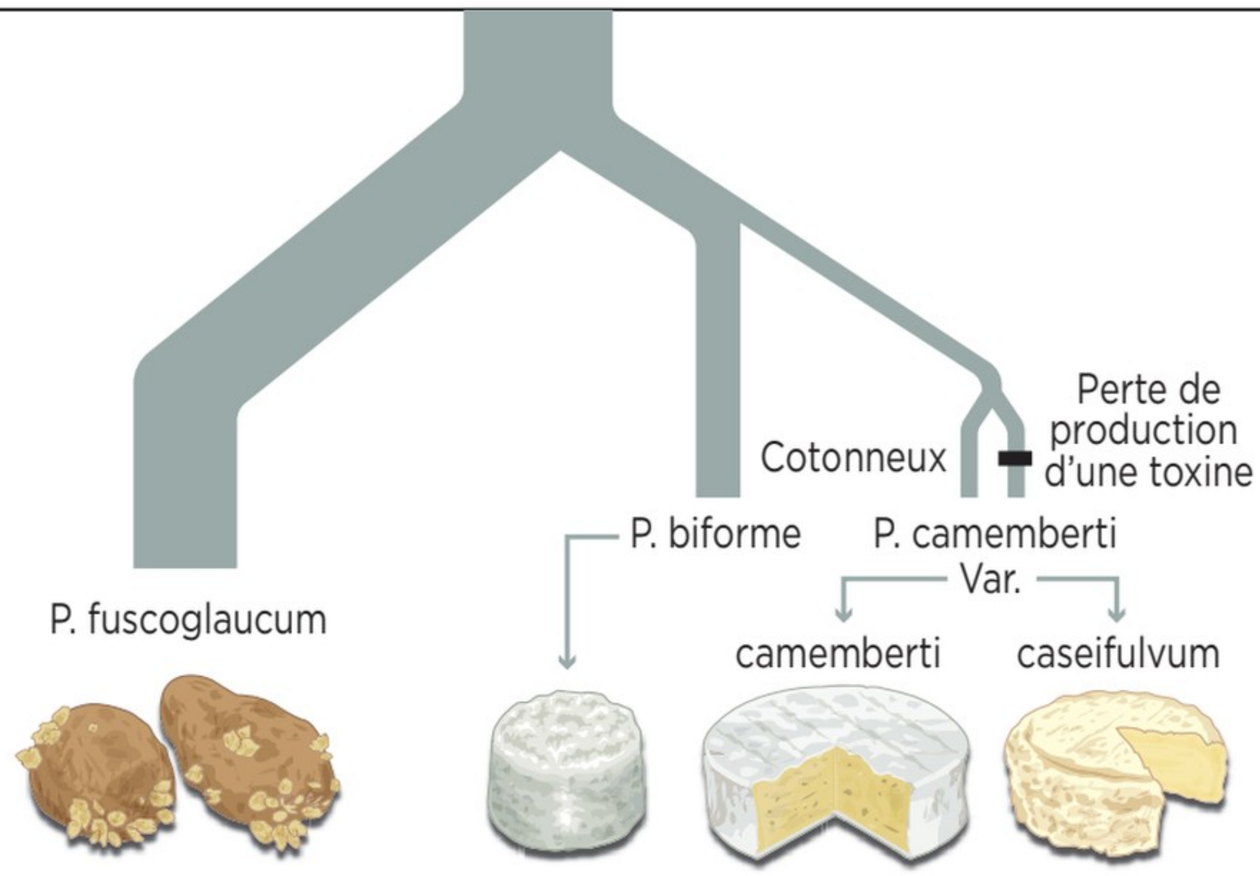
La moisissure des fromages à pâte molle, type camembert, neufchâtel et brie, *Penicillium camemberti,* résulte quant à elle d'une domestication en plusieurs étapes. Elle donne cette belle croûte blanche et cotonneuse. Avant le début du XXe siècle, le brie n'était pourtant pas blanc mais plutôt gris-bleu. C'est le biochimiste Georges Roger, à la demande de la Société d'agriculture de Meaux, qui a isolé en 1897 un *Penicillium* blanc d'un brie. Il a réussi à le cultiver en laboratoire, permettant d'inoculer le lait avec la « bonne » moisissure. L'espèce la plus proche génétiquement s'appelle *P. biforme,* aussi une espèce spécifique du fromage, de couleur gris-bleu, retrouvée sur d'autres types de fromages, tels que les crottins de chèvre frais ou les tommes. L'espèce sœur de ces deux espèces fromagères est *Penicillium fuscoglaucum,* de couleur encore plus vert foncé, et que l'on trouve dans des environnements naturels. Le séquençage de génomes de *P. camemberti* et des espèces proches réalisé par Jeanne Ropars a montré que les humains ont fait diverger plusieurs lignées l'une après l'autre, leur faisant perdre de plus en plus de diversité, mais aussi acquérir des caractères de plus en plus bénéfiques pour l'affinage (3). Un premier événement de domestication a conduit à l'émergence de *P. biforme,* et le deuxième, plus récent, a donné la lignée clonale blanche et cotonneuse *P. camemberti* (un seul individu originel multiplié par culture sans reproduction sexuée). Il y a encore eu très récemment une diversification de *P. camemberti* en deux variétés, utilisées pour affiner différents types de fromages, très proches génétiquement, mais avec des phénotypes très différents. La variété pour les camemberts et bries, de couleur blanche très cotonneuse, pousse peu horizontalement mais assez

haut verticalement, tandis que la variété utilisée pour les saint-marcellin est plus grise et moins duveteuse. Comme pour la sélection des comportements et des apparences spécifiques chez les chiens pour en faire différentes races, l'homme a sélectionné différentes moisissures pour différents types de fromages, aboutissant à plusieurs variétés.

UNE FORTE SÉLECTION FRAGILISE LA DESCENDANCE

La comparaison de génomes des différentes espèces de *Penicillium* a permis de détecter, pendant la thèse de Jeanne Ropars dirigée par Joëlle Dupont au Muséum national d'histoire naturelle, des transferts de gènes entre les différentes espèces des champignons du fromage, pourtant très distantes génétiquement (4). Ces transferts de gènes sont dits horizontaux, car ils se sont produits sans reproduction sexuée, probablement par fusion de mycélium (*). Les transferts de gènes très récents détectés chez les espèces du fromage impliquent notamment des gènes permettant de mieux utiliser le lactose, ou de mieux exclure d'autres microorganismes. L'incorporation de ces nouveaux gènes a donc probablement été sélectionnée pour améliorer l'affinage.

Ainsi, les deux champignons domestiqués pour obtenir les camemberts et les bleus l'ont été par une forte sélection. Les données génétiques montrent que les différents événements de domestication par cette sélection de *P. camemberti* et *P. roqueforti,* plus avantageuse pour l'affinage des fromages, ont causé une grande perte de diversité génétique. En effet, *P. camemberti* et la population non-roquefort de *P. roqueforti* proviennent de la sélection d'un unique individu. À court terme, la sélection d'un individu très performant paraît idéale pour les producteurs : c'est la certitude d'avoir un fromage réussi à tous les coups ! Mais la réduction de la diversité génétique qui en résulte empêche à long terme de continuer le processus d'amélioration variétale et de diversification, d'adaptation à de nouveaux usages. De surcroît, cette faible diversité entraîne à terme une dégénérescence, surtout chez les moisissures que l'on multiplie de façon asexuée. En effet, des mutations désavantageuses s'accumulent inexorablement dans le génome et ne peuvent pas être réparées ou remplacées en utilisant la diversité et la recombinaison comme dans une population naturelle qui se reproduit de façon sexuée. Chez nos deux champignons du fromage, nous remarquons déjà des traces de dégénérescence. Ainsi, les variétés de *P. camemberti* utilisées aujourd'hui produisent très peu de spores, ce qui pose des problèmes pour le repiquage et l'inoculation du champignon au début du processus de fabrication du fromage. De même, la population non-roquefort de *P. roqueforti* est désormais peu fertile (5). Nous essayons donc, au laboratoire ESE, de re-générer de la diversité génétique en croisant différentes souches par reproduction sexuée et en évaluant leurs potentiels fromagers. On devrait, comme pour les tomates ou les pommes, reprendre la culture des anciennes souches. Conservons à tout prix la diversité génétique de nos moisissures domestiquées avant qu'il ne soit trop tard ! ■



Une même souche ancestrale a donné trois variétés : fuscoglaucum, à part, resté *surtout dans des milieux non fromagers (racines) ;* biforme *domestiqué d'abord pour la production de fromage ; puis* camemberti, *divisé en deux sous-variétés,* Var. camemberti *et* Var. caseifulvum. *La perte de diversité génétique due à la sélection est figurée ici par l'épaisseur des branches. À mesure de cette domestication, on observe le changement de couleur, de croissance, d'aspect (plus cotonneux) et la perte de production d'une toxine.*

BRUNO BOURGEOIS

(1) E. Dumas *et al., Mol. Ecol.,* 29, 2639, 2020.
(2) Th. Caron *et al., Int. J. Food Microbiol.,* 354, 109174, 2021.
(3) J. Ropars *et al., Curr. Biol.,* 30, 4441, 2020.
(4) J. Ropars *et al., Curr. Biol.,* 19, 2562, 2015.
(5) J. Ropars *et al., Evolution, 70*, 2099, 2016.

(*) **Le mycélium** est l'appareil végétatif des champignons.

Une vie, une santé, une Terre

Les humains vivent en interaction avec des communautés microbiennes qui les colonisent mais aussi, à plus grande échelle, avec tous les êtres vivants, animaux et végétaux, qui les entourent. Dans une approche globale, prendre soin de sa santé passe par ces autres écosystèmes. Le programme mondial One Health tient désormais compte de toutes ces symbioses.



GETTYIMAGES/CHRIS TOBIN

▲ *Cette photographie d'un daim se tenant au milieu des Champs-Élysées suggère comment l'extension des villes pousse les animaux à quitter leur habitat naturel. Nos interactions avec tout ce qui nous entoure augmente. Une donnée à prendre en compte pour la santé humaine.*

Bactéries, archées, virus, champignons… Dès la naissance, notre organisme est colonisé par des milliards de microorganismes. Tout au long de notre vie, ce « microbiote » interagit avec nos cellules. En particulier, le microbiote intestinal aide à la digestion mais son exploration révèle, depuis une dizaine d'années, de nombreuses autres fonctions. L'un de ses spécialistes, Harry Sokol, gastro-entérologue à l'hôpital Saint-Antoine à Paris, précise : *« Vivre sans lui est quasiment impossible pour les humains. On n'en mourrait pas mais plusieurs de nos fonctions seraient très altérées, notamment celles de l'immunité. »* En clair, sans notre microbiote, notre système immunitaire serait moins apte à nous défendre. Le microbiote joue un rôle dans la stimulation et la maturation de notre immunité, dans l'intestin mais aussi dans l'ensemble de l'organisme. *« Il le fait indirectement, par l'intermédiaire de molécules synthétisées par des bactéries ou des champignons qui passent dans le sang et circulent jusque dans la moelle osseuse, siège de nos globules blancs naïfs, non éduqués »*, explique Harry Sokol. De petites molécules comme le butyrate – un acide gras à chaîne courte – directement sécrétées par les bactéries, jouent également un rôle de stimulant immunitaire en provoquant une réaction pas assez forte pour enclencher une réelle réponse de nos défenses, mais suffisante pour faire réagir nos globules blancs et permettre à notre organisme de contrôler l'infection.

Comme tout écosystème, le microbiote intestinal est fragile. *« Il est sensible à l'environnement auquel il est soumis. Les facteurs de perturbation les plus évidents sont les antibiotiques, une alimentation riche en graisse animale et en viande rouge, le fait de fumer ou encore l'endroit où l'on vit. Le mode d'accouchement est également considéré comme un facteur de perturbation »*, précise le gastro-entérologue. Ces perturbations peuvent être de deux types : elles induisent une diminution de la diversité du microbiote ou une modification de sa composition. Ces déséquilibres sont associés à diverses maladies, telles que des inflammations chroniques ou des cancers de l'intestin, et à des maladies métaboliques comme le diabète et l'obésité. Des travaux récents ont montré des associations avec des maladies neurologiques, dégénératives et neuropsychiatriques, qui ont aussi une composante immunitaire. Prendre soin de son microbiote est donc un enjeu de santé. Et à travers le monde de nombreuses équipes cherchent les moyens de rétablir un bon équilibre dans sa composition. *« Aujourd'hui, la solution la plus drastique consiste à transplanter du microbiote intestinal d'une personne en bonne santé à un malade. Mais la transplantation fécale reste une intervention compliquée à réaliser. Et pour le moment, celle-ci n'est validée que pour traiter les infections récidivantes à la bactérie* Clostridium difficile, explique Harry Sokol. *Il existe d'autres stratégies : on peut identifier dans le microbiote des bactéries ou des molécules bactériennes aux propriétés anti-inflammatoires et tenter de les administrer comme des médicaments.* » Ce sont les bactéries probiotiques et les molécules post-biotiques. Quelques bactéries suscitent des espoirs comme *Akkermansia muciniphila*. Sa présence dans le microbiote améliore certains paramètres métaboliques associés à l'obésité tels que la résistance à l'insuline, la stéatose hépatique (infiltration de lipides dans le foie). Une étude clinique sur un faible effectif de sujets en surpoids ou obèses vient de confirmer le rôle bénéfique de la supplémentation de *A. muciniphila* sur ces paramètres métaboliques (1).

62 %

DES AGENTS PATHOGÈNES émergents sont des virus et bactéries d'origine animale.

ÉVITER À TOUT PRIX LES ZOONOSES

À plus grande échelle, les êtres humains sont en lien avec leur environnement, en premier lieu par le biais de l'élevage et de l'agriculture. Prendre soin de tous les écosystèmes qui nous entourent revient aussi à préserver notre santé. C'est l'objectif du programme « One Health ». Amorcés sous le terme d'« Un monde, une seule médecine », en 1984, par l'épidémiologiste américain Calvin Schwab, c'est finalement en 2004, sous l'égide de trois organismes internationaux (*) que l'initiative et le terme d' « une santé » – ou *One Health* – prendront vie. *« L'approche One Health est issue du constat pratique*

(*) **Les trois organismes** sont l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE).

qu'on a longtemps entretenu une dichotomie entre santé animale et humaine, et cela pose problème parce que les maladies zoonotiques ne se cantonnent pas à la faune sauvage, bien au contraire! », explique Claire Lajaunie, juriste spécialiste du droit de l'environnement à l'Inserm. Mais les axes de recherche de One Health intègrent aussi les pathologies végétales, les questions relatives aux effets du changement climatique sur les organismes, ou encore l'antibiorésistance.

L'objectif de One Health : optimiser durablement la santé des humains, des animaux et des écosystèmes

Cette dernière est souvent mésestimée, alors que l'Organisation mondiale de la santé tire la sonnette d'alarme constamment. En effet, l'élevage intensif et l'agriculture extensive répandent dans les chaînes trophiques des molécules qui favorisent l'antibiorésistance et provoquent ainsi des hécatombes. Une étude parue dans *The Lancet* en ce début d'année révèle qu'en 2019 près de 5 millions de personnes dans le monde seraient mortes à cause de la résistance aux antibiotiques, dont 1,27 million directement lié à des bactéries (2). Et, d'ici à 2050, le nombre de victimes pourrait atteindre 10 millions.

Mais revenons-en aux zoonoses. En convertissant pour les besoins de l'agriculture des forêts, des prairies ou tout autre type de biotopes, les humains rognent des espaces naturels nécessaires au maintien de la biodiversité. La conséquence invisible, qui nous concerne en premier lieu, est l'augmentation des contacts entre humains et faune sauvage, et donc celle des zoonoses. « *L'exemple des chauves-souris est probant. Beaucoup sont frugivores, donc dès lors que leurs habitats sont détruits par nos exploitations, elles se rapprochent des villages où se trouvent des vergers. Elles y fientent, urinent et contaminent les animaux domestiques à proximité. Si elles sont porteuses de virus, alors ceux-ci passent d'une espèce à une autre, pour finalement se répandre chez l'humain* », explique André Parodi, directeur honoraire de l'École nationale vétérinaire d'Alfort. Ainsi émergent des maladies jusque-là totalement inconnues « *parmi lesquelles il y a eu la peste, par exemple* », continue le vétérinaire. Et bien sûr notre actuelle pandémie de Covid-19…



▲ *L'Amibiote® : fruit de plusieurs années de recherche, cette baguette contient des fibres végétales rigoureusement sélectionnées pour leurs effets bénéfiques sur le microbiote.*

PRÉSERVER POUR TRANSMETTRE

Le Sars-CoV 2 a mis le monde devant l'évidence que les pathologies animales continuent encore et toujours de nous atteindre. En effet, les bactéries et virus d'origine animale représentent 62 % des agents pathogènes émergents dont 72 % seraient directement issus de la faune sauvage sur les soixante dernières années. En pleine pandémie de Covid-19, One Health a pris une nouvelle dimension, sous l'impulsion du Programme des Nations unies pour l'environnement. En décembre 2021, un panel d'experts a défini unanimement ce programme comme étant une « *approche intégrée et unificatrice qui vise à équilibrer et à optimiser durablement la santé des personnes, des animaux et des écosystèmes* ». « *Cette vision est beaucoup plus holistique, moins anthropocentrique et un peu plus écocentrique. Avec cette nouvelle définition, on s'approche un peu plus de la notion de symbiose* », se réjouit Serge Morand, écologue au CNRS à l'université de Montpellier, et seul chercheur français dans ce panel d'experts. Nos interactions constantes avec notre environnement proche ont des conséquences à toutes les échelles du vivant, de nos sociétés, à nos microbiotes et cela jusqu'aux tréfonds de nos génomes. Il arrive par moment que l'on entre en conflit avec lui, mais le plus souvent l'environnement est bénéfique et contribue à la survie des organismes qui le peuplent. Comme le rappelle Serge Morand, « *Nous ne sommes pas propriétaires des écosystèmes mais plutôt ses usufruitiers. Et en tant que tels, nous nous devons de les préserver pour les transmettre aux générations futures… mais ce n'est pas gagné* ». ■

Mehdi Harmi

(1) C. Depommier *et al.*, *Nat. Med.*, 7, 1096, 2019.

(2) Antimicrobial Resistance Collaborators, *The Lancet*, *399*, 629, 2022.

CHRISTOPHE MAITRE / INRAE

Étoiles symbiotiques : un destin explosif

Longtemps cachées aux yeux des astronomes, les étoiles binaires sont le siège d'un important transfert de matière. Leur étude est riche d'enseignements sur les phénomènes d'accrétion qui donnent naissance aux novae et aux supernovae.

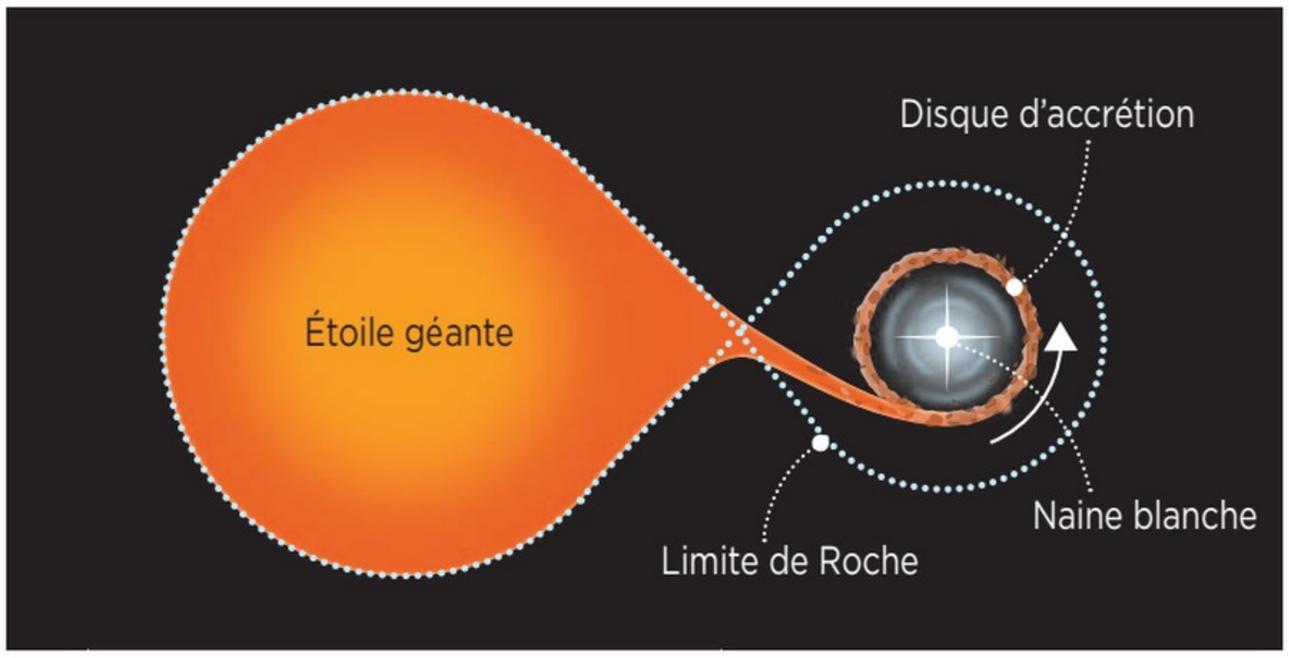
Alors qu'elle participe à la réalisation du catalogue Henry Draper, un important recensement d'étoiles et de leurs spectres lumineux, l'astronome américaine Williamina Fleming (1857-1911) est intriguée. Certains astres présentent des caractéristiques inconnues et pour le moins surprenantes : tout d'abord des raies spectrales d'absorption de molécules présentes dans les étoiles « froides » ; puis d'autres raies, d'émission cette fois, propres à des objets très « chauds ». À sa suite, une autre astronome américaine, Annie Cannon (1863-1941), obtiendra des spectres plus précis. Ils révèlent par exemple la raie de l'hélium II ionisé, ce qui implique – on le sait aujourd'hui – des températures de 50 000 kelvins, incompatibles avec la survie de molécules. Pourtant, personne ne s'attarde sur ces objets étranges. Il faudra attendre 1932 pour que deux astronomes américains, Paul W. Merrill et Milton L. Humason, de l'observatoire du mont Wilson en Californie, les redécouvrent avec le télescope Hooker de 2,5 mètres de diamètre, alors le plus puissant au monde. Merrill qualifie ces étoiles, qui présentent les caractéristiques de différents spectres, de « symbiotiques ». Sans encore percer le mystère de leur vraie nature…

(*) **Une binaire à éclipses** est un couple d'étoiles dont une passe dans la ligne de visée de l'observateur et occulte l'autre.

UNE LÉGION D'ÉTOILES DOUBLES

À cette époque, on est étonné par des étoiles qui présentent à plusieurs reprises de brusques augmentations de leur éclat, certaines semblant apparaître dans le ciel de manière récurrente : c'est le cas, par exemple, des novae RS Ophiuchi et T Coronae Borealis. « *Les astronomes d'alors ne connaissaient que les étoiles simples, et quelques rares étoiles dites binaires à éclipses* (*). *La binarité était marginalement évoquée pour expliquer des phénomènes étranges* », explique Ulisse Munari, astrophysicien à l'observatoire astronomique de l'université de Padoue (Italie). Dans les années 1950, les progrès des télescopes et des spectrographes permettent d'accéder plus aisément à ces différentes classes d'objets : il apparaît très vite que les étoiles doubles sont légion !

De fait, une étoile symbiotique est un couple d'étoiles. Pendant le plus clair de leur vie, les deux astres n'interagissent pas, se contentant de tourner autour de leur centre de masse commun. Puis, au fil de l'évolution stellaire, après que l'un d'eux a consommé tout l'hydrogène de son cœur, son enveloppe externe se dilate : l'étoile devient ce qu'on appelle une géante rouge. Sa température de surface est faible (2 000 à 3 000 kelvins contre 5 000 kelvins pour la surface du Soleil). Son « compagnon » est le plus souvent une étoile de petite taille baptisée naine blanche. Il s'agit d'un astre très dense, à la température de surface extrêmement élevée, jusqu'à 100 000 kelvins. Le rayon d'une géante



BRUNO BOURGEOIS

▲ *Formation d'une nova à partir de la matière éjectée par la géante rouge.*



▲ *Le télescope AAO de l'observatoire Siding Spring, en Nouvelle-Galles du Sud (Australie).*

rouge étant des centaines de fois supérieur à celui du Soleil, un certain volume est nécessaire dans le couple pour loger cet astre encombrant. D'où de longues périodes orbitales, qui vont d'une année à plusieurs siècles.

DE L'ACCRÉTION SEULE À L'EXPLOSION

La luminosité de ce système résulte d'un phénomène d'accrétion : la géante rouge transfère de la matière vers la naine blanche. Les astronomes ont pu distinguer deux types de processus. Dans le premier, seule l'accrétion engendre les phénomènes lumineux observés. Les deux astres possèdent chacun une « limite de Roche », c'est-à-dire une frontière au-delà de laquelle tout corps qui s'approche est détruit par les forces de marée gravitationnelle. Au cours de sa vie, la géante rouge émet un vent de matière qui emplit sa limite de Roche et finit par la dépasser. Tout le matériel éjecté par la géante rouge se déverse alors vers la naine blanche (voir illustration page 53). Cette « accrétion seule » est rapide et se traduit par une hausse de luminosité importante et caractéristique, dans les longueurs d'onde du visible, de l'ultraviolet et des rayons X : c'est une nova. « *Une centaine d'étoiles symbiotiques ainsi en accrétion seule a été découverte ces dix dernières années. C'est juste la partie émergée d'un énorme iceberg* », souligne Ulisse Munari. Mais il arrive aussi, qu'en plus de l'accrétion, la naine blanche brûle à sa surface le matériel issu de la géante rouge qui s'y est accumulé. Le résultat est une manifestation lumineuse bien plus brillante que dans le cas de l'accrétion seule. « *Tous ces objets nous en apprennent énormément sur les phénomènes d'accrétion. Nous pouvons reconstituer le circuit de la matière dans une étoile binaire, de son émission à son retour dans le milieu interstellaire* », continue le chercheur. Les étoiles symbiotiques joueraient ainsi un rôle crucial pour expliquer l'origine des supernovae de type Ia. Ce phénomène explosif, qui se traduit par une gigantesque éjection de matière et une intense émission lumineuse, est attribué à l'effondrement gravitationnel d'une naine blanche sur elle-même. Ces supernovae sont d'une grande importance en tant qu'étalon de mesure des distances dans l'Univers. Surtout, elles projettent dans le milieu interstellaire quantité d'éléments qui formeront de nouvelles étoiles. C'est donc un ingrédient clé de tous les modèles de formation des galaxies.

« *Il y a beaucoup de candidats potentiels pour les progéniteurs des supernovae de type Ia, mais aucun n'est identifié avec certitude. Les étoiles symbiotiques en font partie* », confirme Ulisse Munari. En effet, si la naine blanche d'un couple d'étoiles symbiotiques est capable d'absorber tout le matériau de la géante rouge, celle-ci peut arriver à la limite de masse au-delà de laquelle le phénomène de supernova se déclenche (la limite dite de Chandrasekhar, qui vaut 1,4 fois la masse du Soleil). « *La masse de la naine blanche de T Coronae Borealis est très proche de cette limite. Celle-ci pourrait exploser un jour en supernova* », imagine l'astrophysicien.

Aujourd'hui, son équipe et lui exploitent les données de Galah *(Galactic Archeology with Hermes)*, un vaste recensement d'étoiles réalisé dans l'hémisphère sud grâce au télescope AAO de 4 mètres de diamètre, situé en Australie. Son spectrographe Hermes peut décomposer la lumière de 400 étoiles simultanément. Près de 800 000 étoiles ont déjà été examinées. « *Nous avons découvert 34 étoiles symbiotiques de la variété "accrétion seule", doublant ainsi le nombre connu de ces objets. Le moment est venu où nous allons faire des statistiques,* se réjouit Ulisse Munari. *Nous pourrons ainsi déterminer des propriétés globales concernant le rôle des étoiles symbiotiques dans l'écologie des galaxies, l'évolution des étoiles binaires et les supernovae de type Ia.* » ■

Jean-François Haït

Pour Ulisse Munari, l'heure est venue de déterminer le rôle des étoiles symbiotiques dans l'écologie des galaxies

ANGEL LOPEZ-SANCHEZ/AAO

Humain-machine, des liens indéfectibles

Nos outils, machines, instruments et techniques doivent leur existence à notre activité. En retour, nous bénéficions de leur présence qui nous épargne bien des efforts. Peut-on pour autant parler de symbiose ? Assurément, car il nous est quasi impossible de couper notre dépendance envers ces systèmes.

Les symbioses interviennent dans le développement de nombreux organismes : en particulier dans celui de notre espèce qui abrite des milliers de milliards de microbes. Le rôle crucial de ces symbioses a conduit récemment à proposer de remplacer le terme d'« organisme » par celui d'« holobionte », devenu synonyme de toute association entre un macroorganisme et ses microbes associés. Mais si la formation et l'existence de l'être humain sont liées aux agents microbiens, en est-il de même avec les outils, les machines et les instruments ? Ne sont-ils pas essentiels à notre vie ? Toute technique ne doit-elle pas être considérée comme une forme d'organe extérieur, complétant et prolongeant nos organes intérieurs ?

Les techniques doivent leur existence à notre activité. En retour, nous bénéficions de leur existence, qui nous épargne bien des efforts. Toutefois, pour parler de symbiose entre les techniques et les humains, plus que des bénéfices mutuels, il faut une dépendance vitale, où la survie de chaque partenaire résulte de l'autre. En 1863, l'écrivain britannique Samuel Butler déclarait déjà que nos machines étaient devenues nos parasites : elles nous exploitaient, ponctionnant notre énergie vitale pour tirer leur propre subsistance. Nous étions devenus, disait Butler, leur « bétail » (1). Incontestablement, nous alimentons les machines et nous sommes leurs organes de reproduction. Mais notre dépendance à leur égard est-elle aussi bien établie ?

Un organisme fonctionnel peut se passer des machines, par opposition à un cyborg, être hybride dont la survie s'apparente au fonctionnement d'une greffe. Un état de fait qui paraît caractériser des personnes en situation de handicap mais qui s'applique en réalité à la manière dont notre vie ordinaire est attachée à de multiples techniques. Nous ne pouvons plus débrancher…

UNE DÉPENDANCE À LA MACHINE JUSQUE DANS NOTRE INTIMITÉ

Pour certains, la survie individuelle ne serait pas affectée si, demain, nous devions vivre sans téléphone portable ou sans automobile. Mais c'est une illusion : nous tendons à considérer ces artefacts comme des objets isolés, comme un marteau ou une pelle, que nous pouvons prendre et déposer à notre guise. En réalité, ces techniques sont câblées à des réseaux complexes. Notre survie est liée à de nombreux instruments (vêtements, climatisation, approvisionnement). Pouvons-nous vivre sans électricité ? Sommes-nous vraiment en mesure de rompre tout lien avec les réseaux techniques qui permettent notre existence ? Il nous est impossible de couper véritablement notre dépendance envers les machines, pour notre survie, mais aussi pour la naissance de générations futures.

Notre reproduction tombe en effet toujours plus sous la coupe des machines. Au cours de la gestation interviennent différentes techniques : extraction et mise en contact des gamètes (FIV), implantation des embryons, surveillance du développement du fœtus (échographies), techniques dans l'accouchement (péridurale, césarienne…), couveuses pour les enfants prématurés, etc. avec, à l'horizon, l'idée d'un utérus artificiel.

Les êtres humains tirent profit des machines et dépendent d'elles très étroitement et presque intimement. Nous vivons, par nature, en symbiose avec nos artifices. ■

(1) Samuel Butler, *Darwin parmi les machines*, Hermann, 2014.

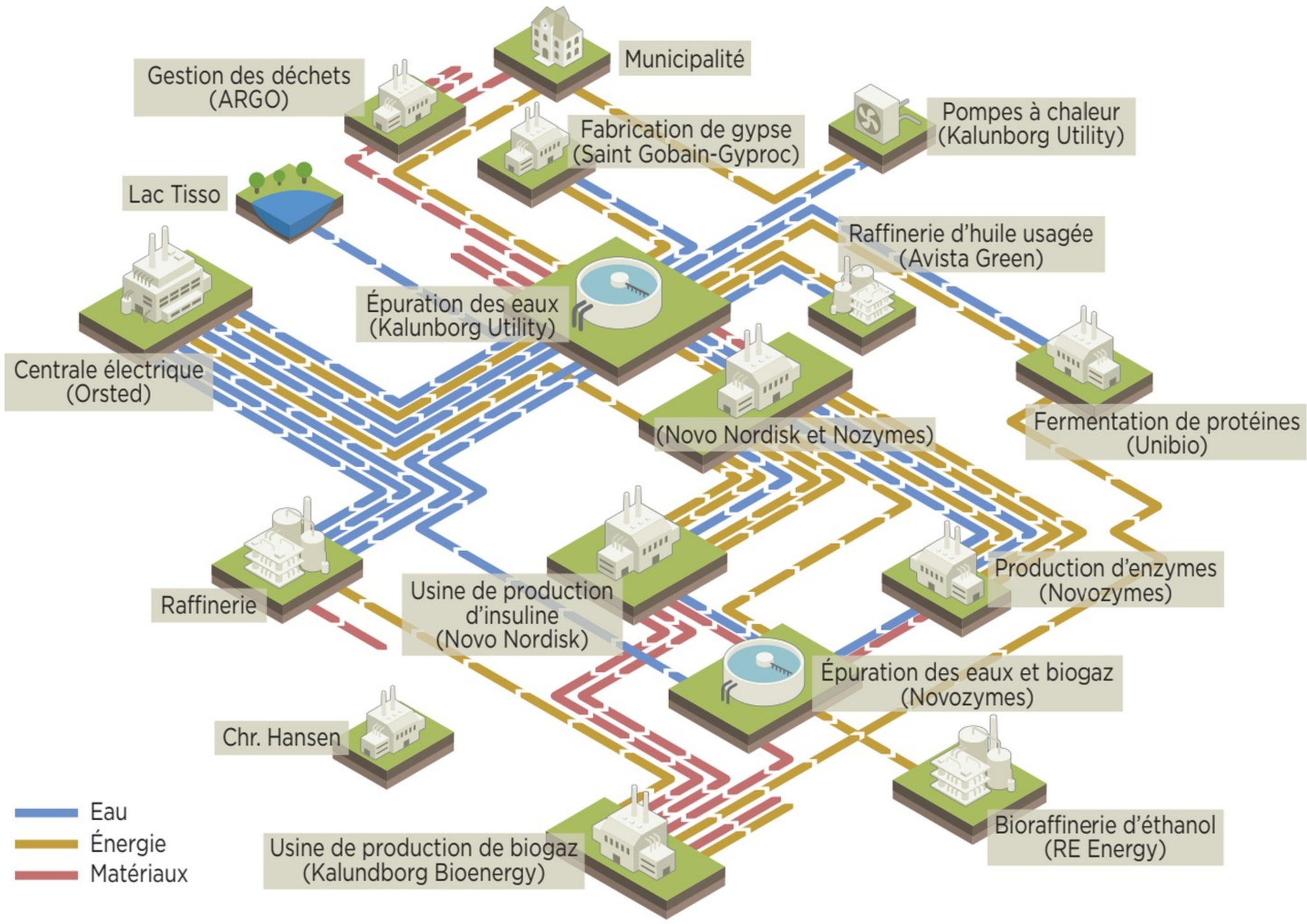


Thierry Hoquet
PHILOSOPHE, UNIVERSITÉ PARIS-NANTERRE.
Professeur des universités, membre de l'Institut de recherches philosophiques, il est spécialiste de la philosophie des sciences naturelles. Parmi ses œuvres : Cyborg Philosophie *(Seuil, 2011) et* Les Presque-Humains *(Seuil, 2021).*

BÉNÉDICTE ROSCOT

Les symbioses industrielles ouvrent une nouvelle ère économique

Les défis environnementaux et climatiques passent par des stratégies collaboratives dans lesquelles les solutions symbiotiques du type gagnant-gagnant s'imposeront de plus en plus. Si les symbioses ont longtemps été rattachées aux programmes de l'industrie du futur, elles font une entrée fracassante dans des domaines tels que les énergies renouvelables, les systèmes alimentaires et agroalimentaires ou encore les villes durables. Les symbioses industrielles se présentent ainsi comme des innovations sociales. Durabilité et économie circulaire sont les mots-clés.



▲ *Schéma du site danois de Kalundborg, le premier exemple d'industrie symbiotique, où les pôles interagissent les uns avec les autres.*

BRUNO BOURGEOIS



Arnaud Diemer
ÉCONOMISTE, CERDI, CLERMONT-FERRAND
Il est coordinateur scientifique du Centre d'excellence Jean-Monnet sur le développement durable (Erasme).



Manuel Eduardo Morales
ÉCONOMISTE, UNIVERSITÉ DE KAUNAS (LITUANIE)
Chercheur à l'École d'économie et de management, il est spécialiste du développement durable et de la dynamique des systèmes.

Sur la planète, l'accumulation des déchets et la pollution engendrées par le progrès technique conduisent à remettre en cause le modèle de développement des économies industrielles et à formuler la notion d'écosystème industriel. En l'espace d'une trentaine d'années, ce courant s'est structuré autour de plusieurs champs de recherche. En s'inspirant des écosystèmes et des espèces biologiques, il a permis de repenser les relations industrielles au sein d'un territoire. Les symbioses industrielles, comme on les appelle, témoignent de cet engouement pour les synergies et les interactions entre différentes organisations. Fondée sur le concept d'échanges symbiotiques biophysiques, la symbiose industrielle engage *« des entités distinctes dans une approche collective visant à tirer parti d'un avantage concurrentiel impliquant l'échange physique de matériaux, d'énergie, d'eau et de sous-produits »* (1). En travaillant ensemble, les entreprises s'efforcent alors de proposer une prestation collective supérieure à la somme des bénéfices individuels qui seraient obtenus par des actions indépendantes. Ces symbioses ont permis de reconsidérer bon nombre de stratégies : autrefois résidus indésirables du processus de production, les déchets sont par exemple devenus des coproduits pouvant être réintégrés localement en tant que ressources – donc valorisés économiquement – dans d'autres processus de production.

Les principales études sur les symbioses industrielles se sont concentrées sur les synergies potentielles en matière de déchets et de coproduits. Le but est que chaque industrie se nourrisse des rejets de ses voisins afin de minimiser les besoins en matières premières et de réduire les déchets produits. Dès lors, la symbiose industrielle n'est pas considérée comme une solution environnementale isolée, mais plutôt comme faisant partie d'un processus d'amélioration de la performance des entreprises individuelles et de l'entité collective. Les recettes de ce succès ? Une collaboration entre des partenaires qui ont des activités différentes ; l'importance d'une solution marchande (solution gagnant-gagnant qui revient à donner une valeur interne au déchet) ; la proximité géographique entre les participants (c'est le champ de l'écologie industrielle et territoriale) ; la volonté de travailler ensemble (forte complicité entre les responsables des différentes entreprises) et de partager des valeurs (confiance) ; une bonne communication entre les différents acteurs (les managers ont l'habitude de se rencontrer).

À L'ORIGINE, LE MODÈLE DANOIS

Née en 1972, la symbiose industrielle de Kalundborg, au Danemark, est aujourd'hui décrite comme un cas d'école. Élaborée localement comme une nouvelle façon d'organiser la production, elle constitue le modèle pionnier de l'écologie industrielle, et l'une de ses plus belles vitrines. Les relations symbiotiques y ont émergé de manière spontanée et ont créé différentes formes de coordination. Trois possibilités d'échanges de ressources ont été prises en compte : la réutilisation de produits ; le partage d'infrastructures ; la fourniture conjointe de services. L'accent est mis sur les stratégies

DR - DR

interentreprises. La dizaine d'entreprises participantes est ainsi liée par des échanges de déchets, d'eau, de vapeur, de chaleur ou d'autres formes d'énergie résiduelle, sur la base d'une dépendance contractuelle mutualisée.

En France, la symbiose industrielle de Pomacle-Bazancourt est un autre exemple modèle de l'écologie industrielle. Située à 9 kilomètres de Reims (Marne), il s'agit de la plus grande bioraffinerie du monde : elle est implantée sur 260 hectares, et 1 200 personnes travaillent directement dans les dix entreprises qui la composent. La principale source d'intrants pour les symbioses industrielles dans les bioraffineries est la biomasse (produits ou résidus destinés à l'alimentation humaine et animale) et d'autres coproduits (le CO_2, le résidu liquide des liqueurs alcooliques et le sirop de faible pureté). Ces intrants sont échangés au sein des entreprises de proximité, ce qui déclenche l'intégration de la chaîne d'approvisionnement. Cette symbiose industrielle se présente sous la forme de chaînes de valeur circulaires (gestion de l'approvisionnement en boucles fermées et relations de synergie) cherchant à utiliser la biomasse sur l'ensemble de son cycle de vie (de la récolte aux déchets).

Dans le cas de la bioraffinerie de Pomacle-Bazancourt, qui transforme chaque année 4 millions de tonnes de biomasse, l'organisation se fait à l'échelle territoriale et offre différentes options technologiques pour gérer les biodéchets, tels que la méthanisation (technologie basée sur la dégradation par des microorganismes de la matière organique, en conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène), le compostage (même principe de fonctionnement que la méthanisation, mais en milieu aérobie) et d'autres procédés innovants (bio-électrosynthèse ou production de microalgues).

D'autres symbioses industrielles existent avec succès sur l'échiquier international : celle de Dunkerque (Nord) autour de l'usine sidérurgique d'ArcelorMittal, celle du groupe Guitang en Chine (industrie du sucre et de la pâte à papier), et d'autres encore, au Japon, en Suède, en Australie (lire ci-contre). Malgré tout, elles peinent encore à trouver leur rythme de croisière. Le défi consiste à s'attaquer à tous les obstacles, qu'ils soient technologiques, socio-économiques ou environnementaux. Pour réussir à exploiter totalement le potentiel d'une telle entité, il s'agit surtout de prendre en compte les conséquences pour les réseaux énergétiques et les infrastructures s'y rattachant. Et ce dans des secteurs industriels divers et des environnements complexes. Par exemple, on récupère la chaleur résiduelle pour le chauffage urbain, on intègre de la chaleur dans les procédés chimiques, on transforme des déchets organiques en énergie via la méthanisation, et on incorpore des déchets verts aux eaux usées. C'est le cas à Dunkerque, où l'on récupère depuis 1986 la chaleur fatale (*) issue des hauts fourneaux d'Arcelor-Mittal, ce qui permet de chauffer 16 000 logements collectifs et bureaux et d'éviter ainsi l'émission de 30 000 tonnes de CO_2 par an.

Les symbioses industrielles dans le monde

Dans sa forme initiale, la symbiose industrielle a été proposée pour écrire les relations d'échanges de produits entre plusieurs entreprises situées près de la ville danoise de Kalundborg. La symbiose de Kalundborg est vite devenue une success story, déclenchant du même coup une profusion d'études de cas à l'échelle mondiale. On peut citer la symbiose de Kwinana en Australie (industrie minière), la symbiose urbaine et industrielle d'Eco-town au Japon, le complexe de Norrköping en Suède (biofuels, biogaz et fertilisants) et la symbiose de Kouvola en Finlande (industrie du bois et de la pâte à papier).

LE VERSANT SOCIÉTAL DE CETTE NOUVELLE ORGANISATION

Au fil du temps, les symbioses sont ainsi devenues des formes d'organisation qui ont cherché à conjuguer les grands principes de l'écologie et les enseignements de l'économie industrielle. Si ces approches ont permis de mieux appréhender le processus d'émergence de la symbiose, de mesurer les bénéfices économiques et environnementaux, ou encore d'identifier les contraintes et opportunités d'une stratégie interentreprises, elles présentent l'inconvénient de réduire la symbiose à sa plus simple expression. Or il ne s'agit pas seulement d'une organisation collective construite sur des synergies et au profit de ces seules synergies, car elle offre aussi d'énormes possibilités en matière d'efficience énergétique et de consommation de matières premières. Elle paraît même au cœur de la transition vers une économie circulaire, mobilisant des énergies renouvelables, réduisant les postes de chaleur perdue et les émissions de gaz à effet de serre, ou encore transformant les déchets en énergie autoconsommée. En insistant sur le fait que les symbioses industrielles sont un levier essentiel de la transition vers une économie circulaire, il n'y a qu'un pas à faire pour imaginer leur impact sur l'industrie du futur. Elles s'inscrivent dans un processus historique de trajectoire industrielle, qui a

(*) **La chaleur fatale** correspond à l'énergie thermique produite indirectement et qui n'est ni récupérée ni valorisée.

débuté au XIXe siècle avec la mécanisation et la standardisation du travail et s'est prolongé au XXe siècle avec le concept d'une industrie intégrant les échanges de données. L'étape suivante – et le défi sociétal – consiste à la fois à réinjecter de l'humain dans la production industrielle et à conduire les industries vers une stratégie de durabilité forte, notamment en utilisant l'économie circulaire comme structure organisationnelle dans les nouveaux modèles d'affaires, via les symbioses industrielles (2).
Ce changement de perspective permet de considérer les symbioses industrielles comme des formes d'innovation sociale qui peuvent répondre aux huit défis suivants : positionner l'industrie au cœur de la durabilité ; définir l'écosystème industriel à l'échelle locale ; réintroduire l'industrie dans l'écosystème urbain ; introduire l'agriculture et les activités agricoles dans les symbioses ; développer des projets de bioéconomie en liant matière, énergie et information ; transformer le CO_2 en produits ; définir un cadre de référence pour les symbioses industrielles susceptibles d'identifier des îlots de durabilité ; repenser les dynamiques sociales accompagnant les différentes phases de la transition industrielle.

LES VILLES : UN ÉCOSYSTÈME LOCAL À EXPLOITER

L'importance de l'échelle locale peut s'observer dans les parcs éco-industriels ou corridors industriels qui sont inscrits dans l'écosystème urbain : ces entités ne cherchent pas à rejeter l'industrie et à la faire disparaître des limites d'une ville, mais à se fonder sur la recherche de synergies potentielles au sein de la ville durable. L'agriculture prend aussi une place importante, en particulier dans les symbioses urbaines (l'agriculture urbaine) et dans des projets bioéconomiques basés sur la biotechnologie, la thermodynamique et les sciences de l'information.
Fortes de leur succès et de leur ancrage dans l'économie circulaire et le développement durable, les symbioses industrielles ont attiré l'attention de la Commission européenne, qui voit à travers ces modèles d'organisations de proximité un puissant catalyseur de la transition énergétique et de l'adaptation au changement climatique (3). Depuis 2018, les symbioses industrielles sont même entrées dans les programmes de financement européens Horizon 2020 et Horizon 2021-2027 via le domaine de l'industrie durable (*Industrial Sustainability*). Il s'agit notamment d'une réflexion en matière d'industrie de transformation qui englobe le ciment, la céramique, le génie chimique, les minéraux et les minerais, les métaux non ferreux, l'acier et l'eau. Ensemble, ces secteurs constituent le socle de la base manufacturière européenne, représentant plus de 20 % de l'industrie de l'UE en termes d'emplois et de chiffre d'affaires. Ces secteurs se caractérisent par une forte dépendance vis-à-vis des matières premières et de l'énergie dans leurs technologies de production et de transformation. Celles-ci devenant de plus en plus rares, l'éco-efficacité des ressources est désormais un facteur clé de la compétitivité et de la transition vers une industrie européenne centrée sur l'humain, le durable sur le plan environnemental et la résilience.

Les symbioses industrielles seraient un puissant catalyseur de la transition énergétique

Ce passage aux symbioses industrielles dans la stratégie de développement durable de la Commission européenne doit être accompagné d'études d'impacts socio-économiques et environnementales quantifiables et significatives. Cette requête renvoie aux difficultés rencontrées par de nombreuses études à l'échelle nationale (Angleterre, Chine, Finlande, France, Australie, etc.) lorsqu'il s'agit de chiffrer les gains économiques et environnementaux réels des symbioses. Plusieurs impacts peuvent ainsi être identifiés. Au-delà des chiffres, il s'agit surtout de mieux comprendre les obstacles qui se dressent devant les symbioses industrielles (technologiques, socio-économiques et environnementales) et le potentiel de réplication de ces innovations sociales et organisationnelles à l'échelle des différents territoires. ■

(1) Nicolas Buclet, *Écologie industrielle et territoriale*, Septentrion, 2011.

(2) A. Diemer *et al.*, *Paradigms, Models, Scenarios and Practices for Strong Sustainability*, Oeconomia, 2020.

(3) A. Diemer *et al.*, *Sustainable Development and European Union : challenges and Prospects*, Oeconomia, 2017.

Paradoxes entre science et fiction

Qu'ils impliquent des espèces d'une planète fictive, telle Pandora dans le film *Avatar* ou qu'ils mettent en scène une espèce terrestre et une entité extraterrestre comme dans *Dune,* les êtres extraterrestres symbiotiques sont assez rares en science-fiction. Le parasitisme est plus fréquent et a marqué le genre, comme dans la série *Alien*. Dans tous les cas, les paradoxes alimentent des scénarios palpitants. Petit panorama.



▲ *Sur Pandora, dans le film Avatar, tous les êtres vivants forment un cerveau géant.*

Le monde du film *Avatar,* de James Cameron, illustre de manière frappante des associations symbiotiques que peuvent entretenir des êtres vivants dans un écosystème planétaire. Les Na'vi, habitants humanoïdes de Pandora, sont pourvus d'une natte qui est une extension de leur système nerveux. Elle peut être connectée à une structure équivalente présente dans une autre forme de vie, animale ou végétale. Dès lors, les Na'vi forment avec leurs montures, qu'elles soient terrestres ou volantes, des entités symbiotiques parfaitement coordonnées. De façon générale, tous les êtres vivants de Pandora sont potentiellement en réseau, et constituent un « cerveau géant ».

La science-fiction a souvent mis aux prises des humains avec des extraterrestres hostiles. On ne compte pas les monstres galactiques, humanoïdes ou insectoïdes, etc., auxquels notre espèce est violemment confrontée lorsqu'elle visite des planètes inconnues, ou qui se sont donné comme objectif de conquérir la Terre. La série B ne manque pas non plus d'extraterrestres consommateurs d'humains : une relation prédateur-proie bien peu durable…

De façon plus intéressante en termes d'interaction, les extraterrestres peuvent être des parasites, à l'instar de certains insectes dits parasitoïdes dont on connaît sur Terre une myriade d'espèces parmi les hyménoptères. Chez ces guêpes solitaires, la femelle capture et paralyse un autre insecte (ou une araignée) spécifique et pond ses œufs à l'intérieur ou à la surface du corps de cet hôte. Les larves se nourrissent de l'infortuné animal, maintenu en état de léthargie. Un scénario inspiré de ce comportement apparaît pour la première fois en 1950, dans le roman *La Faune de l'espace* d'Alfred E. Van Vogt. Le vaisseau spatial *Le Fureteur* (dans la version anglaise : *The Beagle,* tel le bateau du voyage de Darwin autour du monde) découvre inopinément Ixtl, un être étrange perdu seul dans le vide interstellaire. Une fois à bord, la créature improbable prend le contrôle de la fusée et dépose ses œufs sur le corps des humains capturés. *Alien, le huitième passager*, réalisé par Ridley Scott en

COLL. CHRISTOPHEL © TWENTIETH CENTURY-FOX FILM CORPORATION - GIANT STUDIOS - LIGHTSTORM ENTERTAINMENT

1979, reprend le même thème. L'extraterrestre, qualifié de « xénomorphe », pond un œuf donnant naissance à un stade larvaire, dit « étreigneur de visage ». Cette larve, pourvue de huit pattes articulées rappelant des doigts humains, introduit sa trompe dans la bouche de sa victime et lui injecte un embryon dans l'estomac. Ce dernier tue son hôte lors de sa sortie spectaculaire puis devient un xénomorphe adulte. Chez les hyménoptères parasitoïdes, l'hôte doit être paralysé car les larves se nourrissent de tissus vivants : elles ne pourraient pas se développer sur un cadavre. L'hôte doit être piqué de façon extrêmement précise au niveau de certains ganglions nerveux, afin d'induire une paralysie contrôlée et non la mort. Cette capacité experte du parasitoïde résulte d'une longue histoire co-évolutive. Le xénomorphe d'*Alien* se révèle pour sa part parfaitement capable de parasiter efficacement une espèce que ni lui ni ses ancêtres n'ont jamais rencontrée, une espèce originaire d'une autre planète que la sienne et avec laquelle il ne partage donc aucune forme de parenté, même extrêmement lointaine. Pourtant, pour que le corps endormi d'un humain puisse abriter et nourrir un embryon de xénomorphe, il faut que ces deux êtres partagent bien des points communs, en termes de métabolisme et de processus biochimiques de base. Le spectateur versé en biologie évolutive et perturbé par ce paradoxe pourra toujours imaginer que les xénomorphes ont des capacités d'adaptation à des métabolismes très variés (hypothèse peu satisfaisante) ou qu'ils sont « naturellement » les parasites d'une espèce extraterrestre qui, par convergence évolutive, ressemble beaucoup (mais alors vraiment beaucoup) aux humains.
Le même paradoxe se retrouve dans les quelques cas de symbiose vraie (à bénéfice réciproque) imaginée entre humains et extraterrestres. Dans la saga *Dune* de Frank Herbert, Leto II Atréides deviendra l'Empereur-Dieu, régnant 3 500 ans sur l'Imperium, à la suite de sa fusion symbiotique avec une créature autochtone. Dune est une planète désertique, sillonnée par des vers géants dont le stade larvaire est la truite des sables. En s'appliquant sur toute la surface du corps un exosquelette constitué de truites des sables, Leto deviendra une entité hybride (« *Ma peau n'est pas la mienne* », réalise-t-il juste après) qui se transformera en un être mi-humain, mi-vers géant. On sait que Herbert n'est pas vraiment un représentant de « SF dure », courant où les auteurs se contraignent à imaginer des mondes qui collent au plus près des connaissances scientifiques. Il laisse donc le lecteur avec la même question que nous pose le monstre d'*Alien* : comment des êtres qui n'ont aucune histoire évolutive commune peuvent-ils fusionner de la sorte ?



Bruno Corbara
ÉTHOLOGUE ET ÉCOLOGUE, UNIVERSITÉ CLERMONT-AUVERGNE
Spécialiste des sociétés d'insectes, des interactions plantes-fourmis et des micro-écosystèmes aquatiques tropicaux, il est directeur de publication de la revue Espèces.

INSPIRATIONS RÉCIPROQUES

Dans l'univers de *Star Wars* de Georges Lucas, « la force » est très puissante chez les êtres de la Galaxie qui possèdent une quantité importante de « midichloriens » dans les cellules de leur corps. C'est ainsi que, dans *La Menace fantôme,* le jeune Anakin Skywalker, futur Dark Vador, est identifié comme potentiel Jedi. Les midichloriens sont des microorganismes/organites symbiotiques intracellulaires, capables de s'intégrer aux cellules d'une très grande variété d'espèces d'origines planétaires différentes. Pour Lucas, comme pour maints auteurs, il semble bien que, par convergence évolutive, la plupart des formes de vie de la Galaxie ont des processus métaboliques et une biochimie de base similaire… Nul doute que les midichloriens ont été inspirés par les mitochondries, des organites d'origine bactérienne. La science est une source permanente d'inspiration pour la SF et vice-versa : en 2006, des biologistes ont ainsi nommé *Midichloria mitochondrii* une bactérie provenant de mitochondries trouvées dans les cellules ovariennes d'une tique et qui est un symbionte (1).
Si des formes de vie extraterrestre complexes telles que celles imaginées par la SF ont une chance d'exister quelque part dans l'Univers, il se peut qu'elles soient basées sur les mêmes principes d'évolution et de transition majeure. Autrement dit, si des genres de Na'vi, de xénomorphe ou de ver des sables existent sur d'autres planètes, ces êtres sont non seulement « multicellulaires » (quelle que soit la nature des cellules constituantes) mais ont aussi de fortes probabilités d'être symbiotiques comme tous les êtres vivants de la seule planète sur laquelle nous connaissons la vie, la Terre. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

■ Sylvie Estrela *et al.*, Curr. Opin. MIcrobiol., *31,* 191, 2016.
■ Samuel R. Levin *et al.*, *Int. J. Astrobiology,* 18, 1, 2019.
■ Maria Wilhelm et Dirk Mathison., *Avatar. An activist survival guide,* ItBooks, 2009.

(1) F. Stavru *et al., Cell. Microbiol., 22,* e13189, 2020.

D. R.

Start-up À la recherche de médicaments vivants

Nous hébergeons des centaines de bactéries et autres microorganismes. Dans notre intestin, contre le gîte et le couvert, ces locataires nous rendent service. On retrouve chez les plantes des échanges de procédés similaires. Tout comme la nôtre, leur santé dépend de la qualité de ces relations symbiotiques. Des start-up exploitent les dernières connaissances en la matière pour concevoir des remèdes visant à restaurer ou à améliorer ce dialogue.

NOVOBIOME
EXPLORER MÉTHODIQUEMENT L'AXE MICROBIOTE-INTESTIN-FOIE

- Créée en février 2020
- Effectif : 4
- Levée de fonds : mai 2021 (montant non communiqué)

L'exploration du microbiote humain, notamment intestinal, rendue possible par les progrès fulgurants du séquençage génétique haut débit, a mis en lumière des interactions complexes entre ces populations de microorganismes et de nombreux organes, relevant du système digestif et même au-delà. La jeune pousse Novobiome a pour objectif d'investiguer l'axe microbiote-intestin-foie, en valorisant des travaux menés à MetaGenoPolis (MGP), une unité de recherche de l'Inrae (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) située à Jouy-en-Josas et dédiée à la recherche sur le microbiote humain et animal.

Novobiome a été créée sous l'impulsion de Joël Doré, le directeur scientifique de MGP, déjà co-fondateur de plusieurs entités (comme Maat Pharma, voir encadré) consacrées au microbiote. Hervé Blottière en assure la direction scientifique, avec celle de la plateforme Metafun de MGP, et est également directeur de l'unité PhAN (Physiopathologie des adaptations nutritionnelles) de l'Inrae.

Une première bactérie d'intérêt, appartenant à la classe des Coriobactéries, a été identifiée à l'Inrae et fait l'objet d'un brevet. « *Sa population dans le microbiote intestinal décline lorsque la maladie hépatique s'aggrave*, explique Hervé Blottière. *Nous avons étudié cette bactérie, qui a des propriétés anti-inflammatoires, in vitro et sur un modèle animal reproduisant ce que l'on appelle la stéatohépatite non alcoolique (ou Nash,* pour *Non-Alcoholic SteatoHepatitis).* » L'idée de NovoBiome est donc de poursuivre l'étude de cette potentielle « bactérie médicament » à partir de laquelle elle a conçu un « produit biothérapeutique vivant » (ou LBP pour *Live Biotherapeutic Product*) : le ADC-001. Lequel vise à



▲ *La plateforme robotique de l'Inrae exploitée en partenariat avec Novobiome.*

rejoindre l'arsenal thérapeutique des affections hépatiques.

Parmi ces affections, la stéatose hépatique non alcoolique (dite maladie du foie gras) concerne un Français sur cinq et est aujourd'hui la cause la plus fréquente de pathologies chroniques du foie. Elle peut déboucher sur une forme plus grave, la *Nash*. Cette maladie chronique est caractérisée par une accumulation de graisses dans le foie (stéatose) associée à une inflammation de l'organe (hépatite) se compliquant par une fibrose. Non liée à une consommation excessive d'alcool, elle est plus fréquente chez les personnes atteintes d'obésité et/ou de diabète de type 2. Elle peut évoluer en cirrhose, elle-même facteur de risque de cancer. « *Notre ADC-001 a démontré de puissants effets thérapeutiques*

INRAE

in vitro et dans des modèles animaux, assure le chercheur. *Les essais cliniques devraient démarrer en 2022 ou 2023.* »
Plus généralement, au-delà de l'univers méconnu mais prometteur de la classe des Coriobactéries, NovoBiome vise plus loin encore. « *Un autre objectif,* indique Hervé Blottière, *est de développer une plateforme de criblage à haut débit visant à sélectionner des bactéries d'intérêt parmi des dizaines de milliers de souches cultivées dans des conditions imitant la physiologie intestinale humaine.* » Cette plateforme fait appel à la métagénomique fonctionnelle à haut débit, à des organoïdes intestinaux humains, à la microscopie confocale fluorescente à haute résolution, enfin à des outils relevant de l'intelligence artificielle. L'objectif est d'évaluer l'impact de milliers de souches de bactéries (on en connaît environ 50 000) sur des organoïdes intestinaux humains.
Certes, un automate de criblage remplace la main de l'homme pour une bonne part des manipulations, mais il faut en fin de course analyser les milliers d'images obtenues en microscopie… Des modèles de vision artificielle, entraînés par apprentissage profond, permettront d'optimiser le criblage en sélectionnant les clichés les plus prometteurs.
Cette plateforme de criblage doit notamment permettre de repérer des bactéries renforçant la perméabilité intestinale, par exemple des bactéries capables de rendre biodisponibles certains polyphénols – de puissants antioxydants présents dans les fruits et légumes –, qui jouent un rôle protecteur vis-à-vis de diverses pathologies comme les cancers, les maladies cardiovasculaires, inflammatoires et même neurodégénératives. Avec pour horizon le développement de médicaments vivants susceptibles de jouer un rôle dans le traitement de nombreuses pathologies. ■ **Pierre Vandeginste**

MYCOPHYTO
UN COCKTAIL DE MYCORHIZES POUR LA SANTÉ DES PLANTES



▲ *Le but : améliorer la production grâce à des champignons qui cohabitent avec les racines.*

■ Créée en octobre 2017
■ Effectif : 10
■ Levée de fonds : 1,4 M € en 2019

Les champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA) vivent en symbiose sur et dans les racines de plus de 80 % des plantes terrestres. Grâce à leurs filaments longs et minces, *« leur surface d'échange avec le sol est mille fois supérieure à celle de la plante elle-même »*, assure Justine Lipuma, la cofondatrice et présidente de la start-up Mycophyto, à Sophia-Antipolis. Contre un peu de sucres et de lipides, les mycorhizes fournissent à leur hôte de l'eau, des sels minéraux, notamment du phosphore, de l'azote et du zinc, et même des molécules organiques.
Mais toutes les cultures ne sont pas habitées par les mycorhizes qui leur feraient du bien. D'où l'intérêt de la banque de données de Mycophyto. Elle caractérise les mycorhizes, les amplifie sur des plantes qui les apprécient, et récolte les spores, par tamisage. Forte de son expérience et d'un peu d'intelligence artificielle, elle sait concocter au cas par cas un cocktail répondant à diverses demandes : résistance à la sécheresse, adaptation à un agresseur, amélioration de la productivité…
Double lauréate en 2021 des concours i-Nov et de l'Aide au Développement Deeptech, la start-up a récolté assez de fonds pour passer de la R&D et des opérations pilotes à l'industrialisation, et proposer des solutions aux problèmes des agriculteurs en minimisant le recours aux engrais et pesticides, et ainsi les accompagner dans leur transition agroécologique. ■ P.V.
■ mycophyto.fr

MYCOPHYTO.

En bref

Microbiote restauré
À la suite de bons résultats, Maat Pharma a interrompu l'essai clinique de phase Ib portant sur son candidat médicament destiné à restaurer un microbiote intestinal fonctionnel pour améliorer la survie de patients atteints de leucémie aiguë myéloïde sous chimiothérapie intensive. Ces patients éligibles à une greffe de cellules souches hématopoïétiques allogéniques ont montré « *une sécurité satisfaisante et une bonne colonisation, caractérisée par la présence d'unités taxonomiques microbiennes dans l'intestin qui n'étaient pas présentes avant le traitement* ».
La phase II/III devrait débuter au second semestre 2022.
■ www.maatpharma.com

Projet biostimulant
La start-up dijonnaise Inoculum Plus participe au projet européen H2020 Excalibur qui vise à « *améliorer les connaissances sur la dynamique de la biodiversité du sol et ses effets synergiques* ». Elle fournit notamment des biostimulants à base de champignons mycorhiziens.
■ inoculumplus.eu

L'exosquelette tendu ici à Amanda Boxtel, devenue paraplégique en 1992 après un accident de ski, a été conçu spécialement par la société américaine Ekso Bionics. Les exosquelettes sont l'une des techniques pour aider les paralysés à retrouver l'usage de leurs jambes.

Vers l'humain augmenté

Neuroscientifiques et ingénieurs ont fait de tels progrès en une décennie qu'ils peuvent désormais faire remarcher des patients tétraplégiques.

« Lève-toi et marche ! », pourrait être la devise de notre entreprise. Que de chemin parcouru depuis que nous avons fait remarcher des rats paralysés en 2012 (1) ! Aujourd'hui, à l'aide d'un nouvel implant placé au niveau de la moelle épinière lésée, nous sommes parvenus, après plusieurs mois de rééducation, à faire remarcher des patients tétraplégiques. Et pas seulement : ils ont pu aussi faire du vélo et du canoë. La clé, c'est que notre implant constitué d'un champ d'électrodes est spécialement adapté à la stimulation de la moelle épinière. C'est aussi le fait que nous ayons une compréhension fine de la manière de stimuler : les électrodes ne délivrent pas leurs impulsions en continu, mais à des instants précis (2). Pour ouvrir cette technologie au plus grand nombre, nous innovons en permanence et applicons les résultats à travers notre société Onward Medical. Nous avons également démarré une collaboration avec les chercheurs de Clinatec, le centre de recherche biomédicale à Grenoble. Leurs exosquelettes pour aider la marche restent à mon sens difficiles à utiliser dans la vie quotidienne. En revanche, l'implant cérébral qu'ils ont mis au point pour les commander est très intéressant. La prochaine étape sera de lier nos techniques d'électrostimulation à leurs implants. C'est le rêve de l'Américain Elon Musk *[avec sa société Neuralink, NDLR]*, sauf que c'est nous qui allons le concrétiser les premiers ! ■

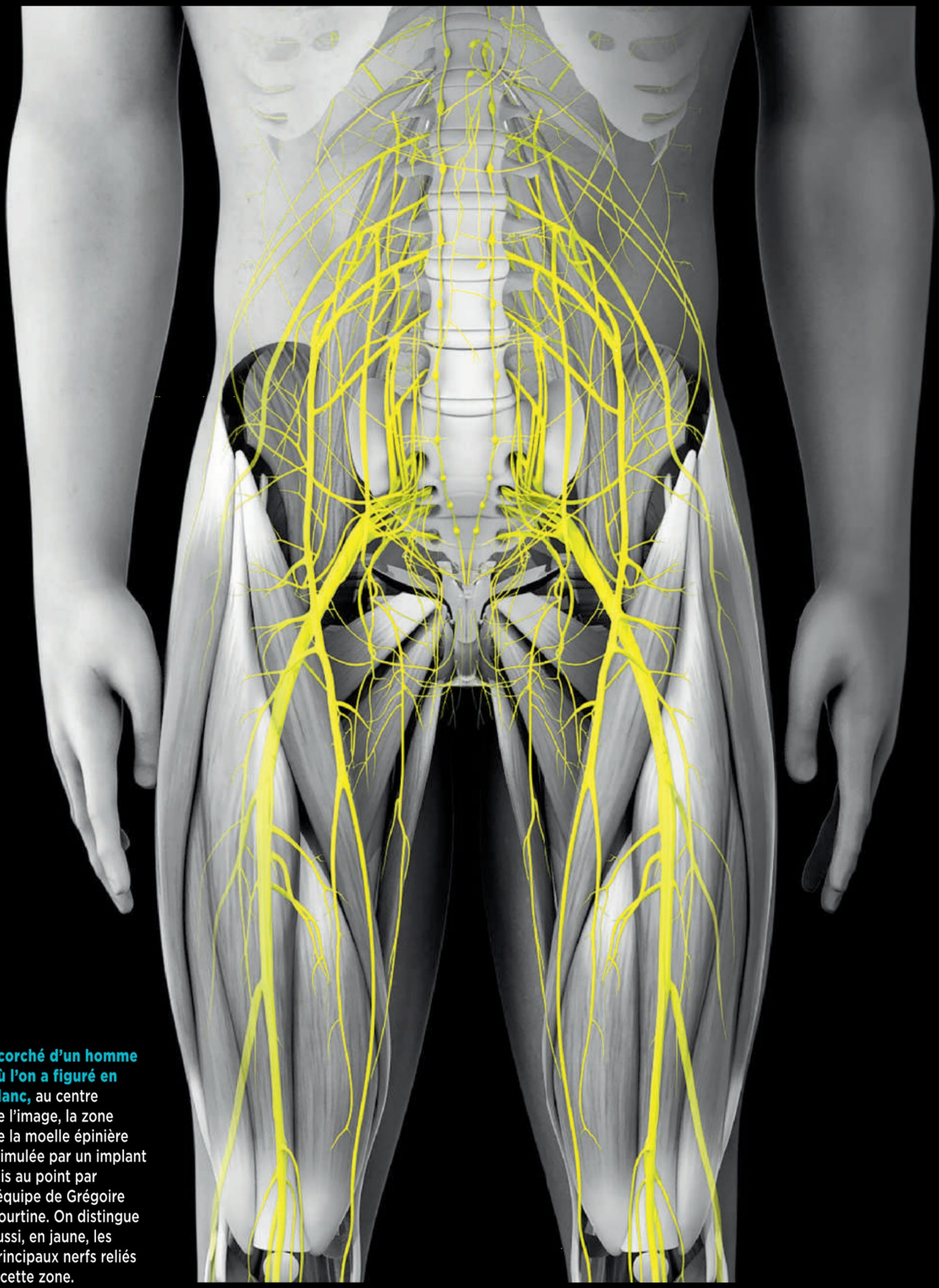
(1) N. Wenger *et al., Sci. Transl. Med., 6,* 255ra133, 2012.

(2) A. Rowald *et al., Nat. Med.,* doi : 10.1038/s41591-021-01663-5, 2022.

DAN KITWOOD / GETTY IMAGES - EPFL - ALAIN HERZOG



Grégoire Courtine,
PHYSICIEN ET NEUROSCIENTIFIQUE, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, SUISSE.
Son travail vise à améliorer la récupération des troubles neurologiques. Il dirige, avec la neurochirurgienne Jocelyne Bloch, le centre Neuro-Restore, au Centre hospitalier universitaire de Lausanne. Sa start-up GTX Médical est désormais cotée en Bourse sous le nom de Onward Medical.



Écorché d'un homme où l'on a figuré en blanc, au centre de l'image, la zone de la moelle épinière stimulée par un implant mis au point par l'équipe de Grégoire Courtine. On distingue aussi, en jaune, les principaux nerfs reliés à cette zone.

NEURESTORE / JIMMY RAVIER

REMARCHER GRÂCE À DES IMPLANTS



Grégoire Courtine lors d'une séance de rééducation aux côtés de David McZee, l'un des premiers patients à avoir reçu un implant en 2018. Si l'électrostimulation fonctionne dès la pose de l'implant, seul un travail d'entraînement et de rééducation de plusieurs mois permet d'en assurer la pleine efficacité.



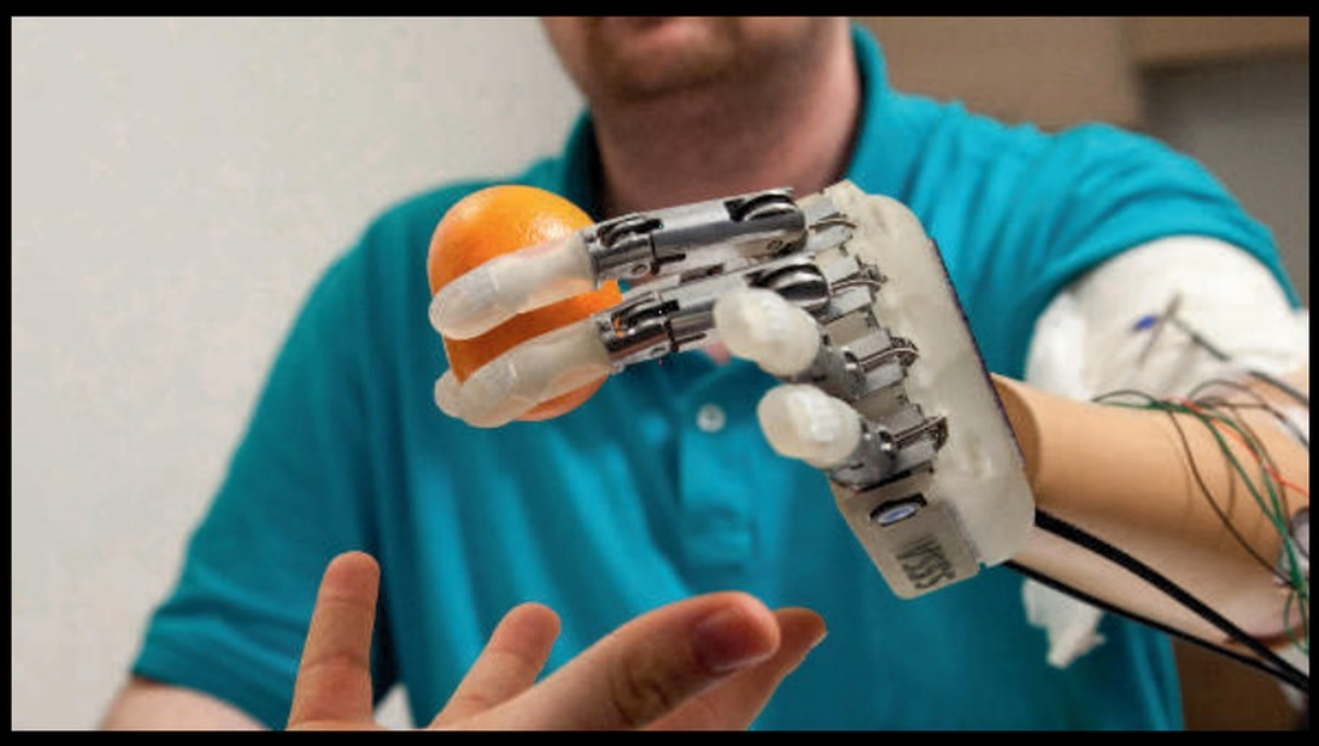
David McZee (à droite) déambule dans Lausanne en compagnie d'un autre patient ayant bénéficié, lui, du dernier implant mis au point par l'équipe de Grégoire Courtine.



Le centre biomédical Clinatec, à Grenoble, a élaboré un implant neuronal capable de commander un exosquelette. Il a fallu deux ans d'entraînement au patient pour parvenir à contrôler cette interface cerveau-machine et ainsi piloter les quatre membres de l'exosquelette. Le développement d'algorithmes d'intelligence artificielle a été indispensable à cette prouesse.

JULIETTE TREILLET - NEURORESTORE / JIMMY RAVIER - ROLEX / SÉBASTIEN AGNETTI

PROTHÈSES ET NEUROPROTHÈSES



C'est grâce à une prothèse de main sensible, mise au point à l'École polytechnique fédérale de Lausanne et à l'École internationale supérieure d'études avancées (Sissa), à Trieste (Italie), que le Danois Dennis Aabo Sorensen, amputé du bras gauche, a retrouvé des sensations tactiles lui permettant d'identifier ce qu'il touche, alors même qu'il a les yeux bandés.



Ce système d'exosquelette porté sur les chevilles est une aide à la marche. Les biomécaniciens de l'université Carnegie-Mellon, à Pittsburgh (États-Unis), ont mesuré ses performances afin de fabriquer des prothèses qui s'adaptent aux besoins de chaque porteur.



Plus petit exosquelette du monde, ce support, conçu par la société allemande Ottobock, soulage les articulations et réduit les effets de contact mécanique. Il est utilisé dans le domaine de l'assemblage et fait partie des systèmes destinés à alléger le travail manuel afin d'éviter les blessures.

XAVIER POPY/REA PHOTO - K. WITTE, K. POGGENSEE, P. FIERS, P. FRANKS AND S. COLLINS/CARNEGIE MELLON UNIVERSITY - LIFEHAND 2 / PATRIZIA TOCCI - ETH/ALESSANDRO DELLA BELLA



Main bionique du fabricant allemand Ottobock, utilisée ici dans le cadre du Cybathlon près de Zurich, en Suisse. L'idée de cette compétition est de confronter des handicapés dans la réalisation de gestes quotidiens [ici suspendre des feuilles], tout en permettant aux fabricants de montrer leurs dernières innovations.



Jeune femme avec un exosquelette motorisé permettant de porter des charges lourdes.

JANIECBROS / GETTY IMAGES

VERS DES EXOSQUELETTES PLUS MANIABLES

L'un des enjeux des recherches sur les exosquelettes est de rendre les systèmes plus légers.

Les exosquelettes humains consistent encore, pour l'essentiel, en des appareillages lourds, difficilement maniables. Conçus pour assister les opérateurs dans certaines tâches – porter des charges lourdes, être plus résistants –, ils sont encore peu utilisés dans l'industrie, notamment parce que beaucoup de ces tâches sont plus facilement réalisables par des robots…

À Zurich (Suisse), le chercheur Robert Riener a lancé en 2016 le Cybathlon, vitrine technologique visant à permettre à des personnes handicapées d'établir des performances sportives. Faute d'une technologie mûre, il a fallu attendre la seconde édition de cet événement, en 2020, pour que soit présenté le premier – et à ce jour le seul – exosquelette complet fonctionnant sans béquilles ; cet exosquelette auto-équilibré est l'œuvre de la société française Wandercraft. Reste que, pour les patients, ces systèmes demeurent souvent lourds. L'avenir est à la robotique « souple », où les systèmes sont plus légers et plus manœuvrables. ■ **Ph. P.**

Les militaires cherchent depuis longtemps à « améliorer » les soldats sur le terrain. Cet exosquelette motorisé Onyx, de la société américaine Lockheed Martin, se fixe au niveau du bassin et des jambes. Il réduit l'effort à la marche et à l'escalade.

LOCKHEED MARTIN

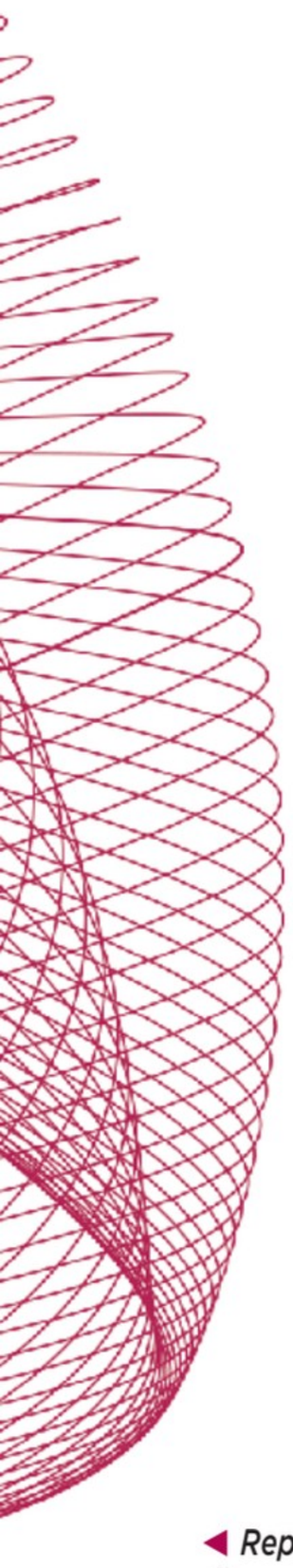
MAXIME CHUPIN/CERAMADE



Emmanuel Trélat
MATHÉMATICIEN, SORBONNE UNIVERSITÉ
Spécialiste des systèmes dynamiques et du contrôle optimal, il est professeur et directeur du laboratoire Jacques-Louis Lions (Sorbonne-université-CNRS).

Les courants de gravité : un ticket gratuit pour l'exploration spatiale

L'étude mathématique des trajectoires spatiales dans un champ gravitationnel créé par plusieurs corps massifs (étoiles, planètes) a permis la découverte des « courants gravitationnels », qui rendent possible un voyage sur de grandes distances dans le Système solaire, pour un coût énergétique quasi nul. La contrepartie : un voyage lent. On doit cette découverte aux progrès dans le domaine des systèmes dynamiques de ces dernières décennies et à la mise au point de méthodes de calculs numériques élaborées.



D.R.

◀ *Représentation d'une variété qui permet de visualiser les courants de gravité dans le Système solaire.*

Commençons par une aventure récente : celle du télescope spatial James-Webb de la Nasa lancé par une fusée Ariane 5 de la base de Kourou, en Guyane, le 25 décembre 2021. Entre cette date et fin janvier 2022, il a voyagé jusqu'à sa destination finale : le point de Lagrange L2 du système Soleil-Terre pour être opérationnel en juin 2022. À cet endroit du Système solaire idéalement situé pour scruter le cosmos, à 1,5 million de kilomètres de la Terre, il a rejoint la sonde Gaia, encore en activité, qui cartographie les étoiles de notre galaxie, et bien d'autres engins – Herschel ou Planck – qui fonctionnaient il y a encore quelques années. Pourquoi ce point à l'opposé du Soleil est-il si prisé pour l'observation astronomique ? Parce qu'il est loin de la Terre, et donc éloigné des rayonnements parasites de notre planète, mais aussi

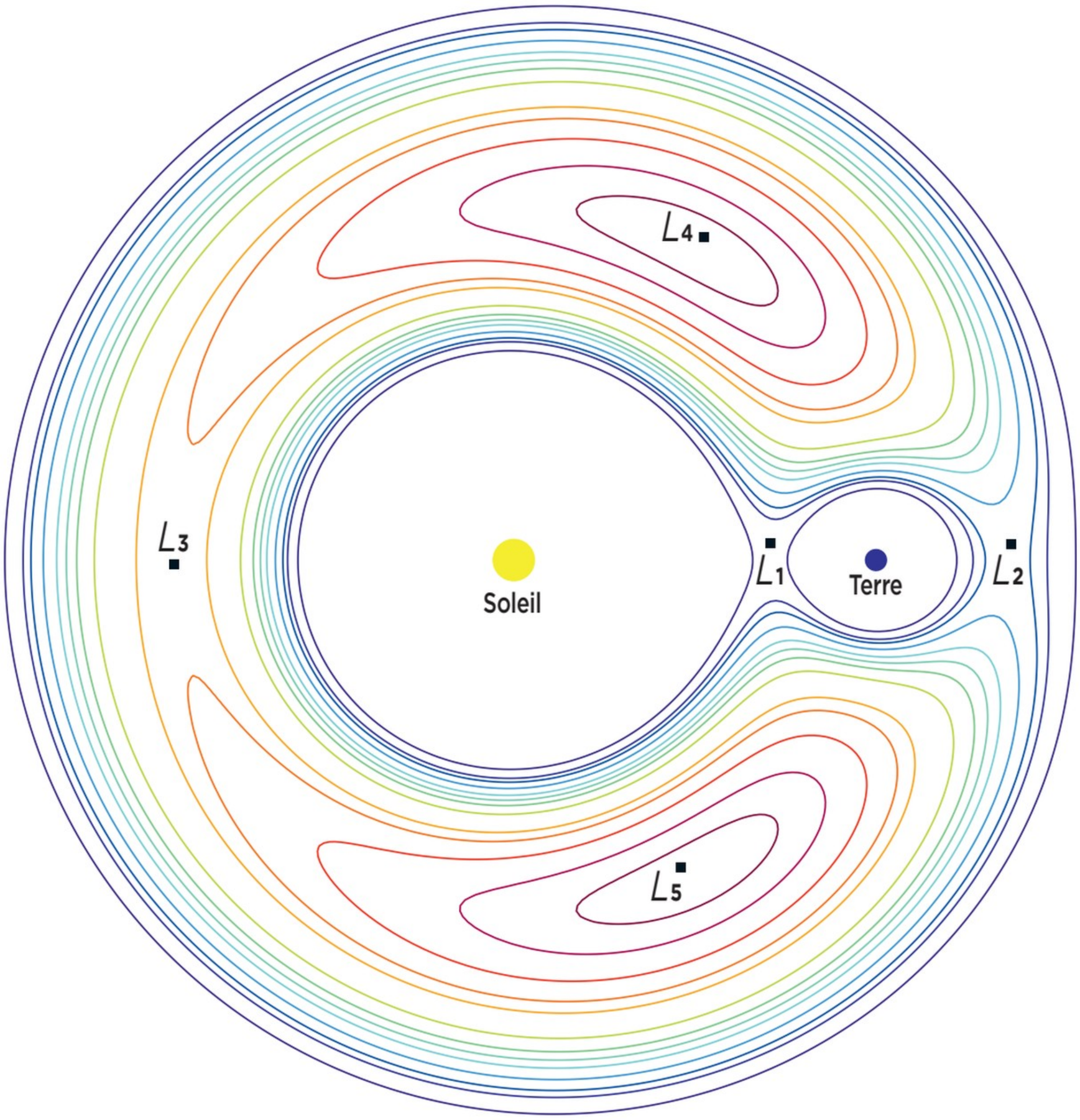
et surtout parce qu'il s'agit d'un lieu d'équilibre des forces gravitationnelles.
Ce point de Lagrange n'est d'ailleurs pas tout seul : il en existe d'autres dont la réalité découle tout simplement des lois établies par Isaac Newton dans son ouvrage *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* publié en 1687. Pour les identifier, les mathématiciens ont utilisé ces fameuses lois apprises dès le lycée, notamment la deuxième loi de Newton (le produit de la masse et de l'accélération est égal à la somme des forces exercées sur le système) et la loi de gravitation universelle (la force gravitationnelle qui s'exerce entre deux corps est proportionnelle au produit de leur masse et à l'inverse du carré de leur distance). Mais ils sont allés encore plus loin en utilisant la théorie mathématique des systèmes dynamiques ! En effectuant des études aux abords de ces points de Lagrange, ils ont mis en évidence, au cours des trente dernières années, l'existence de « courants de gravité » qui, à l'instar des courants marins dans les océans, sont capables de transporter un vaisseau spatial sans l'aide d'un moteur ! Ces courants se propagent dans des sortes de « tubes » invisibles qui traversent le Système solaire et relient les corps célestes. Ces découvertes et des calculs numériques élaborés permettent désormais aux agences spatiales de planifier des missions interplanétaires ne consommant quasiment aucune énergie. L'avènement du spatial à bas coût !

Les lois fondamentales de Newton s'associent à la théorie des systèmes dynamiques

Pour comprendre, revenons aux lois fondamentales et à ces points de Lagrange si utiles aux ingénieurs du spatial. En mécanique céleste, ils sont définis dans le cadre d'un problème à trois corps restreint. Les lois en jeu sont bien celles de Newton, et on considère trois corps dont deux sont très massifs (par exemple, le Soleil et la Terre, ou la Terre et la Lune), le troisième pouvant être un astéroïde… ou un engin spatial. L'essentiel est que la masse de ce dernier est négligeable par rapport à celle des deux autres. En écrivant les lois du mouvement dans un repère tournant où les deux corps massifs sont fixes, on aboutit à un système d'équations décrivant l'évolution temporelle du troisième corps. Dans ce repère tournant, le corps le plus léger est soumis à l'attraction des deux corps massifs et à la force centrifuge. Il se trouve que cette dynamique admet cinq points d'équilibre, ni plus, ni moins : ce sont les fameux points de Lagrange (dits L) où les trois forces se compensent exactement (voir figure ci-contre). Ils sont tous situés dans un même plan, contenant les deux corps massifs. Historiquement, les points alignés L1, L2 et L3 ont été découverts par le mathématicien allemand Leonhard Euler en 1764, raison pour laquelle on les appelle parfois les points d'Euler. Le Français Joseph-Louis Lagrange a découvert les deux derniers (L4 et L5) en 1772, son nom ayant été retenu pour la postérité. Le fait de disposer d'un point d'équilibre dans l'espace est intéressant car, en théorie, un objet qui y est placé – un téléscope pour l'observation du cosmos par exemple – n'en bouge plus. Toutefois se pose la question de la stabilité locale autour de ces points : un objet légèrement éloigné d'un point d'équilibre y revient-il (cas de l'équilibre stable) ou s'en éloigne-t-il (cas de l'équilibre instable) ?

À L'ORIGINE, « L'EFFET PAPILLON »

Pour étudier cette délicate question de la stabilité, il faut faire intervenir la théorie des systèmes dynamiques. C'est le Français Henri Poincaré (1854-1912), l'un des plus grands savants de l'Histoire, qui en fonde la théorie moderne. Sa motivation principale, identique à celle des scientifiques de son époque, est de comprendre la stabilité à très long terme du Système solaire. De manière plus générale, cette théorie mathématique s'intéresse aux effets des petites perturbations, ce qui a été



LIGNES DE POTENTIEL DU SYSTÈME À TROIS CORPS

Si l'on considère deux corps massifs – le Soleil et la Terre – en interaction gravitationnelle, et que l'on calcule les points d'équilibre d'un troisième corps, on trouve trois points le long de l'axe Terre-Soleil, qui sont instables (L_1, L_2, L_3), et deux points situés sur l'orbite de la Terre qui sont stables (L_4, L_5).

MAXIME CHUPIN/CERAMADE

popularisé sous le terme d' « effet papillon » : de minuscules déséquilbres à un endroit du globe (le battement des ailes d'un papillon) en engendrent de grands ailleurs (une tempête par exemple) après une longue évolution. C'est le principe d'un système chaotique ou de sensibilité aux conditions initiales. Henri Poincaré introduit la théorie du chaos et invente tous les outils toujours utilisés couramment par les mathématiciens de nos jours, comme cette application dite de premier retour de Poincaré, qui mesure l'écart à son point d'origine d'une trajectoire quasi périodique au bout d'un tour. Mais on peut aussi retenir les considérations de type énergétiques de son contemporain, le mathématicien russe Alexandre Liapounov (1857-1918), qui permettent d'établir l'analyse de la stabilité des systèmes dynamiques dans certains cas.

Toutefois, c'est vers le milieu du XXe siècle que trois scientifiques réalisent des avancées majeures : les Russes Andreï Kolmogorov (1903-1987), Vladimir Arnold (1937-2010) et l'Allemand Jürgen K. Moser (1928-1999). Ils poussent plus loin les théorèmes de leurs prédécesseurs, Poincaré et Liapounov, et donnent leur nom au théorème KAM (les initiales de leurs noms), l'un des plus fameux résultats en théorie des systèmes dynamiques. Ce théorème, profond et difficile, donne une compréhension fine des mouvements quasi périodiques et des petites perturbations qui apparaissent naturellement en mécanique spatiale. Et c'est grâce à des résultats de type KAM que l'on montre que les points L1, L2 et L3 sont naturellement instables alors que les points L4 et L5 sont stables. Cela veut dire que, en pratique, si l'on place un objet au voisinage de l'un des points L4 ou L5,

alors celui-ci va rester dans ce voisinage, un peu comme une bille qui tournerait à l'infini dans une cuvette, sans être amortie, car nous sommes dans l'espace ! Autrement dit, en chacun des points L4 et L5, existe un puits de potentiel gravitationnel stable. A contrario, si on place un objet à côté de l'un des points L1, L2 ou L3, alors celui-ci s'en éloigne, ces points étant dits instables. Certes, en théorie, si l'objet est placé exactement au point L1, il n'en bougera pas puisqu'il est en équilibre. Mais dans la pratique, la moindre perturbation – comme l'attraction gravitationnelle due à d'autres corps célestes ou la poussée du vent solaire par exemple – le fera quitter le point L1 et dériver à plus ou moins long terme. La situation est similaire à celle du pendule inversé : si l'on pose une tige verticale au creux de sa main, sans bouger et sans tricher, la tige reste en théorie exactement verticale s'il n'y a aucune perturbation. Mais parce que cet équilibre est instable, la moindre perturbation fait tomber la tige.

LES ZONES INSTABLES, UN GAGE DE SÉCURITÉ POUR LES ENGINS SPATIAUX

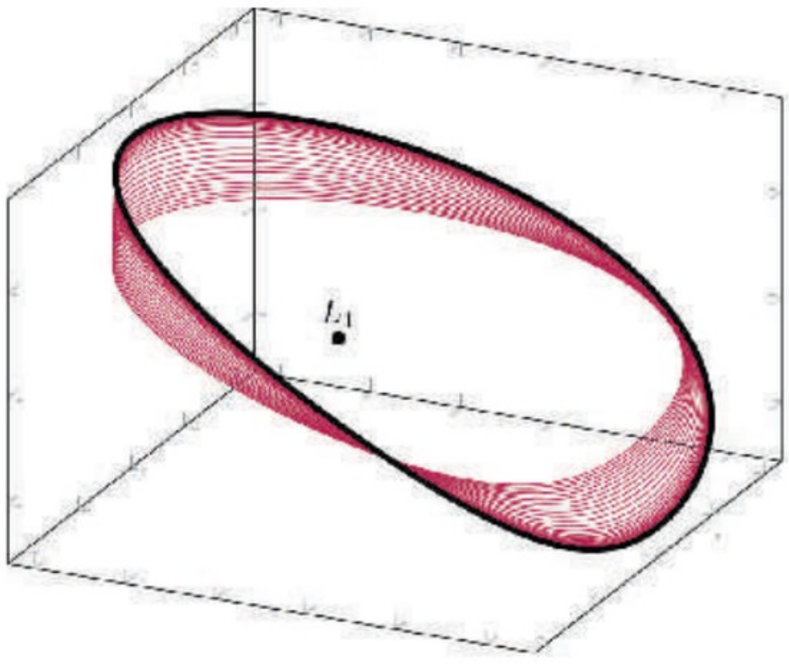
A priori, la propriété de stabilité autour de L4 et de L5 semble une bonne nouvelle puisqu'un engin spatial placé dans leur voisinage va y demeurer « naturellement », sans qu'il soit nécessaire de lui fournir de l'énergie. La stabilité a toutefois son revers : au gré des hasards astronomiques, ces puits de potentiels ont piégé quantité de poussières, de cailloux (parfois gros), rendant ainsi inenvisageable la présence d'un instrument qui serait détérioré en raison des inévitables chocs qui en découleraient. Et les points L4 et L5 sont naturellement encombrés… On le constate dans le système Soleil-Jupiter où l'on observe autour des points de Lagrange L4 et L5 de nombreux astéroïdes piégés – appelés les astéroïdes Troyens. Mais c'est également le cas dans le système Soleil-Terre où l'on trouve dans ces zones une accumulation de poussières et cailloux (les nuages de Kordylewski). Dans ces conditions, l'instabilité des points L1, L2 et L3 est finalement une bonne nouvelle car ce sont des sites « propres », naturellement déblayés de toute pollution aux poussières et autres astéroïdes qui pourraient abîmer les engins spatiaux ! Toutefois, pour maintenir ces derniers à proximité de l'un de ces points, il y a un prix (heureusement faible) à payer : il faut stabiliser l'engin, à l'instar de la tige au creux de sa main, que l'on maintient quasiment verticale au prix du petit effort d'avoir à la bouger de manière adéquate par des mouvements horizontaux. Ici, c'est la théorie mathématique du contrôle et notamment de la stabilisation qui permet de calculer des stratégies appropriées, peu consommatrices d'énergie au voisinage d'un point d'équilibre à l'aide de légères corrections. Nous avons mentionné le point L2 du système Soleil-Terre dans l'introduction, mais L1, dans la direction du Soleil est également utilisé. Ainsi, depuis 1996, le satellite SOHO s'y trouve dans une position privilégiée pour étudier la surface du Soleil, ses taches et ses éruptions.

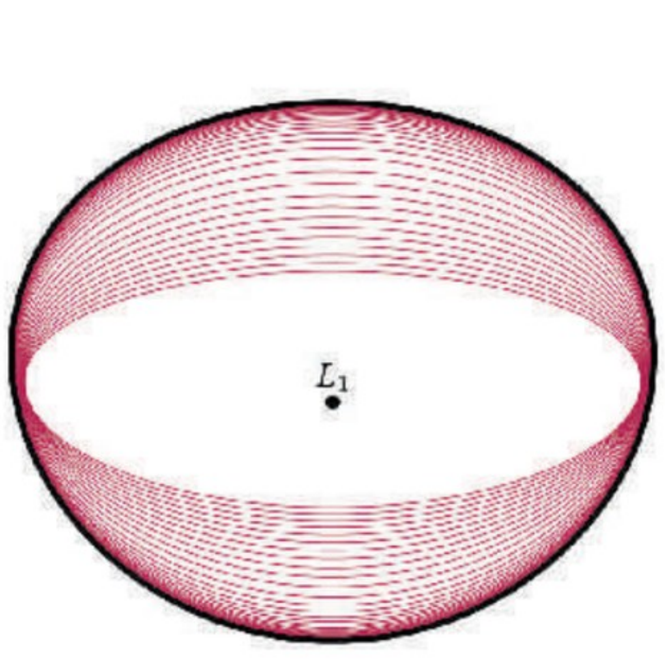
En ce qui concerne le voisinage de ces points

MAXIME CHUPIN/CERAMADE

FAMILLE D'ORBITES

Il s'agit de trajectoires périodiques qu'un corps peu massif peut parcourir sans propulsion autour des points de Lagrange du système Terre-Lune. Page de gauche : orbite de halo 3D et une projection ; page de droite : orbite de halo 3D et deux projections.





d'équilibre, les propriétés démontrées sont encore plus fascinantes. On prouve en effet qu'il y existe des familles de trajectoires périodiques et quasi périodiques, les plus courantes étant appelées orbites de halo (similaires à des cercles). Mais leurs formes peuvent être bien plus complexes. Elles dessinent ce que l'on nomme des orbites de Lissajous : en forme de 8, de triple 8, etc. Le satellite SOHO est ainsi placé sur une orbite de halo autour du point L1 dans le système Soleil-Terre. Cette orbite étant légèrement instable, il faut donc souvent recaler l'engin en effectuant de petites manœuvres de correction de trajectoire.

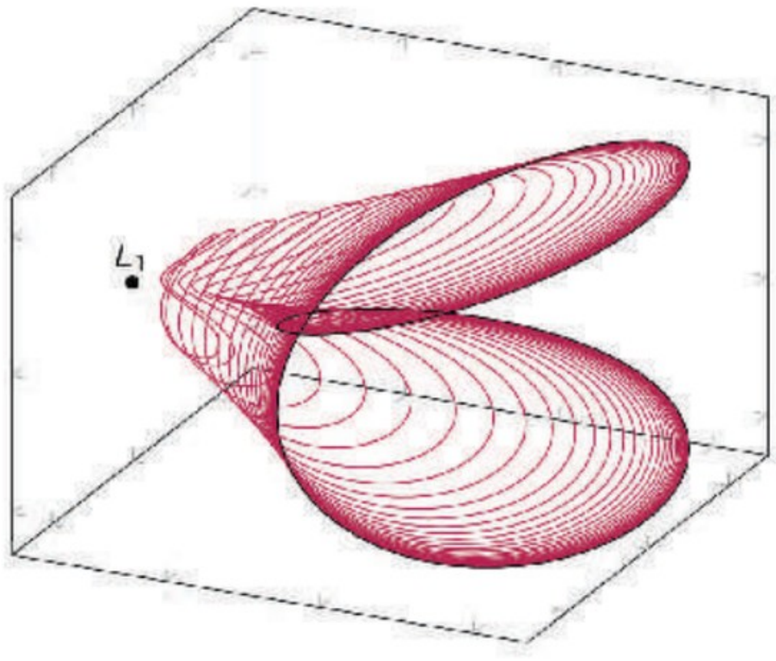
UN DÉPLACEMENT CONTINU MAIS LENT

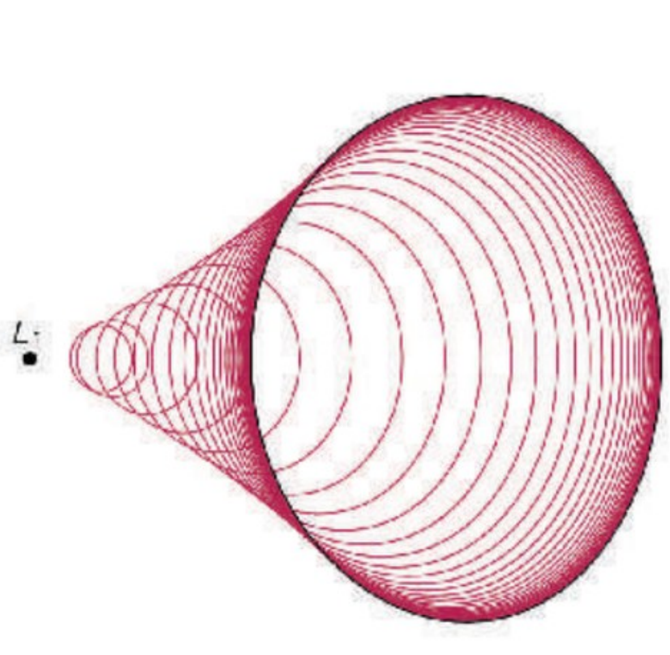
On en arrive au point mathématique qui est sans doute le plus fascinant. Il faut savoir qu'en théorie des systèmes dynamiques, tout point d'équilibre engendre des « variétés invariantes (*) » (stables et instables) : ce sont simplement les unions de toutes les trajectoires qui convergent asymptotiquement vers le point d'équilibre. À l'instar d'un point d'équilibre, chaque orbite périodique autour d'un point de Lagrange engendre aussi des variétés invariantes, qui sont des sortes de tubes émanant de chaque orbite périodique. Elles sont formées par l'ensemble de toutes les trajectoires qui convergent vers cette orbite en s'enroulant à la manière d'un tire-bouchon. Si l'on place un objet à l'intérieur de ces tubes, celui-ci se met alors à y dériver, en suivant un courant naturel. De surcroît, il y reste : en aucun cas l'objet ne peut quitter le tube, sauf à être soumis à une force extérieure. Mathématiquement, ces tubes sont un peu plus compliqués qu'il n'y paraît, car les calculs ne se font pas dans l'espace réel à 3 dimensions, mais dans un espace de phase : chaque point de cet espace est en dimension 6 (trois dimensions pour la position et trois dimensions pour la vitesse). De fait, il s'agit de cylindres de dimension 4 dont la base est une sphère de dimension 3… Pas facile à imaginer ! Sauf pour un mathématicien géomètre.

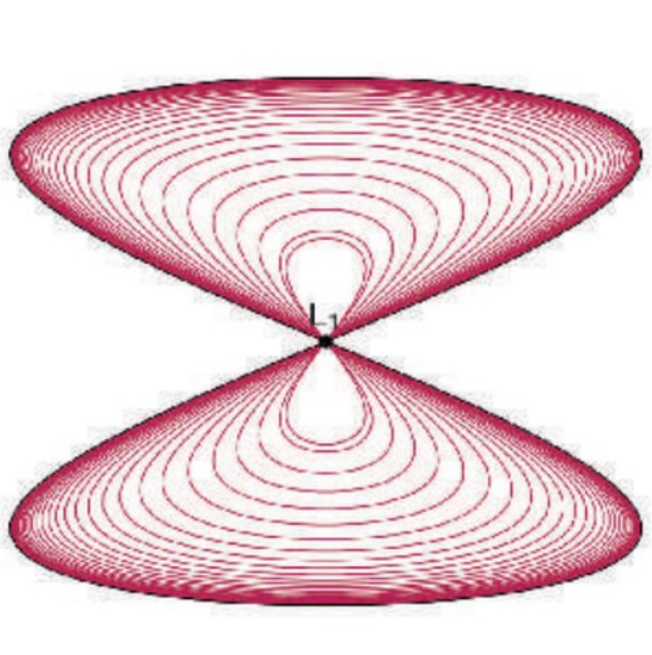
Un tube gravitationnel se comporte comme un tuyau dans lesquel circule un courant

Reste que l'image est valide : ces tubes se comportent un peu comme des tuyaux de plomberie, à l'intérieur desquels circule un courant, uniquement dû aux effets gravitationnels, capable de transporter des objets sans que l'on ait besoin de lui fournir de l'énergie. Raison pour laquelle on peut le comparer à un courant marin : il existe de manière naturelle, mais – tout comme le courant marin – il est assez lent. Lorsqu'on utilise ces courants gravitationnels, mieux vaut donc ne pas être trop pressé. Ou

(*) **Une variété** est le terme mathématique utilisé pour désigner de manière générique les espaces quelles que soient leurs dimensions. Une variété de dimension 1 est une courbe, et une variété de dimension 2 est une surface.







La performance du calcul numérique permet la cartographie des courants

alors, de la même manière qu'on mettrait une voile sur un bateau placé le long du Gulf Stream pour cumuler deux effets d'entraînement, on peut aider le déplacement de l'engin spatial le long du courant de gravité à l'aide d'une poussée supplémentaire due à un petit moteur (moteur ionique par exemple). Quoiqu'il en soit, et bien qu'ils se déplacent sans cesse au gré du mouvement des planètes, ces courants sont parfaitement prédictibles et calculables, d'autant qu'il existe peu de perturbations dans l'espace. Depuis quelques années, les progrès en calcul numérique haute performance – des techniques élaborées de calculs entrent en jeu – permettent d'en dresser une cartographie, avec notamment leurs croisements et ainsi prévoir des passages possibles d'une planète à une autre.

L'existence de ces tubes ouvre la voie à la conception de missions interplanétaires qui sont quasi gratuites en termes de consommation d'énergie. Toutefois, celles-ci sont forcément longues, ce qui réserve l'utilisation de tels courants à des missions robotisées. Un compromis est toujours à trouver entre le temps du voyage et l'énergie dépensée et, en pratique, il est fréquent de chercher à combiner l'usage de ces courants gravitationnels à d'autres effets. Par exemple, on ajoute parfois l'effet dit de fronde gravitationnelle, bien connu et déjà utilisé par la sonde américaine Voyager 2 qui, à ce jour, a pu ainsi quitter le Système solaire. Cet effet d'assistance gravitationnelle consiste à faire effectuer par l'engin quelques tours d'un astre donné, comme la Terre ou la Lune, afin de lui conférer une accélération supplémentaire. La sonde européenne d'exploration de la planète Mercure, BepiColombo, lancée en 2018, en profitera à plusieurs reprises : avant d'être en position d'observation, elle utilisera une fois l'assistance gravitationnelle de la Terre, deux fois celle de Vénus et six fois celle de Mercure. La contrepartie est que, pour faire des économies notables de carburant, il faut l'utiliser beaucoup, d'où des trajectoires longues : BepiColombo ne se mettra en orbite autour de Mercure que le 5 décembre 2025.

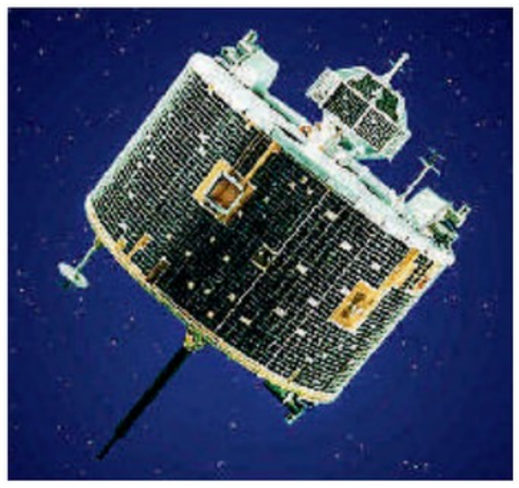
Ce n'est qu'au début des années 1990 que les mathématiciens et ingénieurs du spatial ont réalisé le potentiel de ces techniques de courant de gravité avec notamment le sauvetage de la sonde japonaise Hiten (lire encadré). Quelles destinations sont atteignables par ces techniques ? Au voisinage d'une planète ou d'une lune, l'économie de carburant est particulièrement significative, et ces tubes de gravité commencent à être utilisés pour des voyages peu coûteux en carburant.

ET UNE SEULE IMPULSION SUFFIT

Les courants gravitationnels ont été utilisés pour la première fois de manière spectaculaire par la sonde américaine Genesis, lancée en 2001 et dont l'objectif était de capturer des particules de vent solaire et de les ramener sur Terre. Leur utilisation a permis de diviser par 10 la quantité de carburant nécessaire à l'ensemble de la mission ! Comme SOHO, la sonde Genesis a été placée le long d'une orbite de halo autour du point L1 dans le système Soleil-Terre, durant un peu plus de deux ans afin d'effectuer sa collecte. À l'issue de cette période, et pour la rapatrier presque sans carburant, une très légère impulsion lui a été donnée afin qu'elle se place sur des courants gravitationnels la faisant passer du point L1 vers le point L2, situé à l'opposé de la Terre par rapport au Soleil. La sonde a fait une sorte de boucle autour de L2, astucieusement calculée de façon à la placer sur une trajectoire la faisant revenir sur Terre. Le tout grâce à quelques kilogrammes de carburant seulement pour effectuer les minimes corrections de trajectoire. Depuis, les courants gravitationnels sont couramment utilisés par des engins spatiaux au voisinage de la Terre ou

Le sauvetage gravitationnel d'une mission japonaise

En octobre 1991, les ingénieurs en astronautique ont pour la première fois utilisé les propriétés de stabilité gravitationnelle au voisinage des points de Lagrange pour sauver une sonde spatiale : la mission japonaise Hiten. Lancée en janvier 1990 vers la Lune, cette sonde était destinée à déployer en orbite lunaire le petit sous-satellite Hagoromo. Son objectif : tester diverses technologies afin d'acquérir une bonne maîtrise des techniques spatiales.
Le Japon devenait alors, après les États-Unis et la Russie, le troisième pays à envoyer une sonde vers la Lune. Toutefois, en raison d'un déficit d'injection – une vitesse trop faible fournie par le lanceur (50 m/s de moins) –, la sonde s'est retrouvée bloquée sur une orbite terrestre d'apogée bien plus bas que prévu. Cela a nécessité de multiples manœuvres afin de s'approcher suffisamment de la Lune et de pouvoir insérer Hagoromo en orbite lunaire. Hélas, l'émetteur d'Hagoromo est tombé en panne, le rendant inopérant. Par ailleurs, ces manœuvres ayant consommé beaucoup d'hydrazine – le carburant utilisé à bord –, il en restait trop peu à la sonde pour rejoindre elle-même une orbite lunaire par les techniques classiques de transfert d'orbite utilisées en astronautique spatiale (les transferts d'orbite de Hohmann).
Pour sauver la mission, et suivant une suggestion d'Edward A. Belbruno et James K. Miller, tous deux du Jet Propulsion Laboratory (JPL), à Pasadena Californie, une manœuvre audacieuse a été décidée. La sonde Hiten a été placée le long d'une orbite périodique passant près des points de Lagrange L4 et L5 du système Terre-Lune, observant au passage les nuages de poussière (nuages de Kordylewski) piégés autour de ces points. Cela n'a nécessité qu'une très faible propulsion et donc peu de carburant. En suivant cette trajectoire, Hiten est ainsi arrivée sans encombre, en février 1993, à seulement 422 kilomètres de la surface lunaire. Le reste d'hydrazine a alors été utilisé pour placer Hiten en orbite autour de la Lune, puis en avril 1993, pour la faire s'écraser à la surface de notre satellite naturel. Cette stratégie innovante de transfert à basse énergie, jusque-là jamais mise en œuvre, a été le point de départ des recherches de trajectoires à bas coût pour les missions spatiales, exploitant les propriétés dynamiques au voisinage des points de Lagrange. ■ E. T.



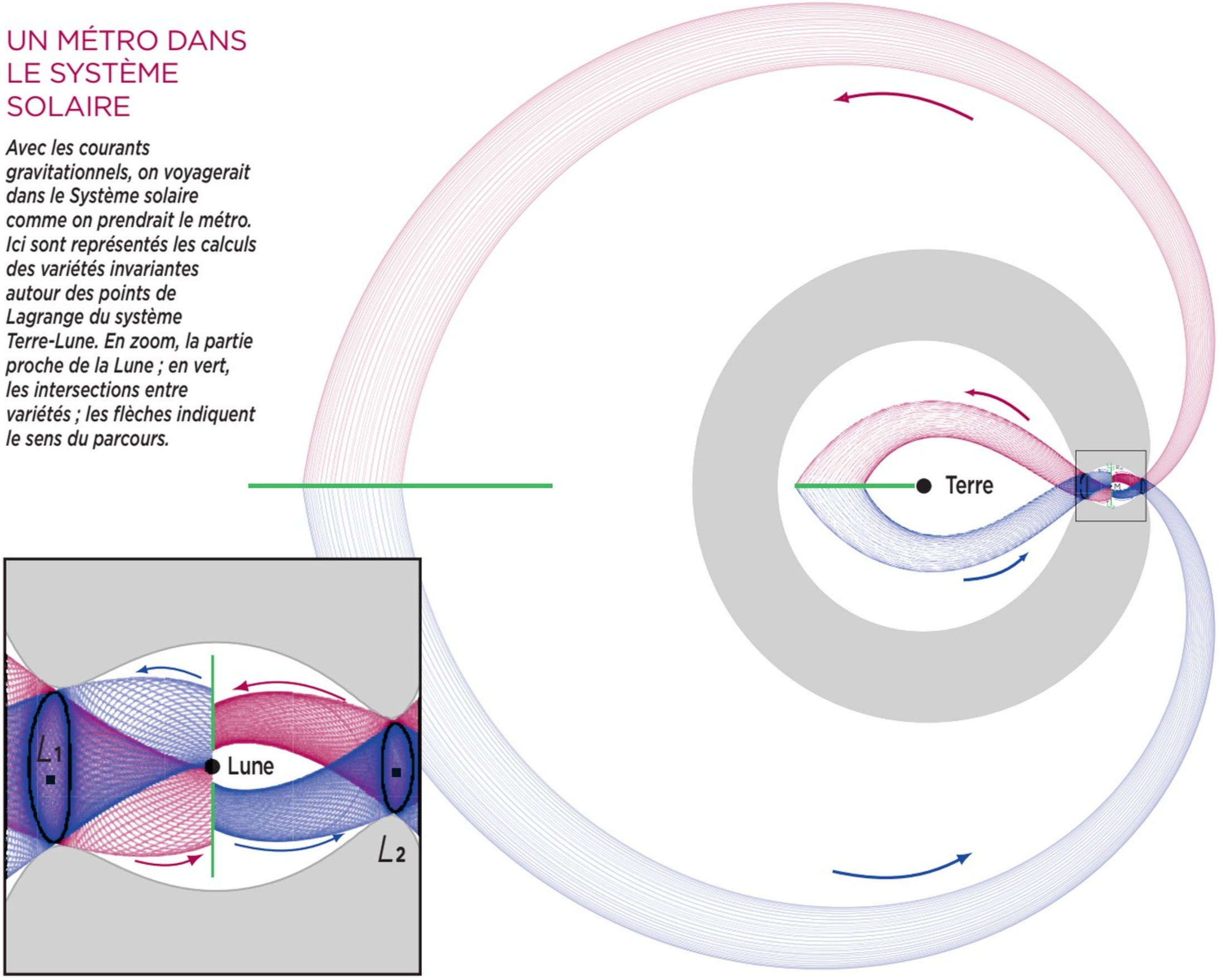
▲ *La sonde Hiten a été la première mission lunaire japonaise.*

JAXA

de la Lune, pour passer par exemple du point L1 du système Terre-Lune au point L2, ou, comme l'a fait la sonde chinoise Chang'e 2 en 2011, pour passer d'une orbite lunaire à une orbite de halo autour du point L2 du système Soleil-Terre.
À l'avenir, les courants gravitationnels pourraient être utilisés pour voyager entre les différentes lunes d'une planète comme Jupiter ou Saturne. Seules les corrections de trajectoire nécessitent de l'énergie. L'économie de carburant serait alors significative. Dans les années 2000, la Nasa avait élaboré un projet nommé *Jupiter Icy Moons Orbiter* (JIMO) : l'objectif était d'expédier un engin spatial chargé d'observer de près les lunes de Jupiter : Europe possède en effet des mers liquides sous sa surface de glace et pourrait abriter de la vie ; Ganymède et Callisto posséderaient aussi de l'eau liquide sous leur surface. Une mission spatiale utilisant les courants gravitationnels existant autour des points de Lagrange dans ces différents systèmes permettrait de naviguer lentement afin de favoriser des observations longues. Le projet JIMO a finalement été abandonné, en particulier faute de financement et en raison de la réorientation stratégique de la Nasa vers des missions habitées.
L'Agence spatiale américaine a cependant décidé en 2019 d'une nouvelle mission d'exploration. A priori, cette mission n'utilisera pas les courants de gravité : seules devraient être utilisées des assistances gravitationnelles autour

UN MÉTRO DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

Avec les courants gravitationnels, on voyagerait dans le Système solaire comme on prendrait le métro. Ici sont représentés les calculs des variétés invariantes autour des points de Lagrange du système Terre-Lune. En zoom, la partie proche de la Lune ; en vert, les intersections entre variétés ; les flèches indiquent le sens du parcours.



de la Terre, de Vénus et de Mars (pas de Jupiter car elle sera trop loin). La sonde Dragonfly sera ainsi lancée en 2027 avec pour objectif de se poser en 2034 sur Titan, la plus grosse lune de Saturne. L'intérêt de Titan avait déjà été révélé par la mission Cassini-Huygens entre 2004 et 2017, cet astre possédant un cycle du méthane semblable au cycle de l'eau sur Terre. Quant à Europe, elle va être explorée par la mission Europa Clipper qui devrait être lancée en 2024 pour une arrivée en 2030, et dont les détails de trajectoire ne sont pas encore tous décidés. En fait, comme pour Dragonfly, les ingénieurs font en priorité des manœuvres « rapides », de type classique ; ils sont conscients des possibilités ouvertes par les couloirs de gravité mais savent que cela ralentira considérablement la mission. Ralentir le vol est très bien si l'on veut survoler un astre pour l'observer sans se poser ; mais, là, en l'occurrence, l'idée est bien d'y atterrir.

De manière générale, le comportement des variétés invariantes après des temps longs n'a été que peu exploré. Depuis le début des années 2000, les mathématiciens sont en mesure d'étudier de manière plus approfondie les propriétés de stabilité ou d'instabilité de ces différents tubes même si l'étude en reste fort complexe. En effet, à cause de la rotation des astres, les couloirs de gravité ne cessent de bouger et de s'entrecouper différemment… Le mathématicien canadien Jerrold Marsden (1942-2010), spécialiste des systèmes dynamiques et qui a beaucoup étudié les courants de gravité, com-

MAXIME CHUPIN/CERAMADE

parait l'agitation de ces tubes aux courants créés par un arroseur de jardin un peu fou. On comprend dès lors qu'il est difficile de savoir dans quelle direction chercher pour trouver les meilleurs gains possibles. Mais, dans le même temps, c'est bien ce chaos et cette complexité qui offrent une mine de possibilités. Fin 2020, une étude très intéressante menée par Nataša Todorovic, de l'université de Belgrade (Serbie), a mis en évidence un immense et complexe réseau interconnecté de courants de gravité, s'étendant de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter, jusqu'à Uranus et même sans doute au-delà (1). Sa découverte, fortuite, s'appuie sur l'observation d'astéroïdes qui se sont déplacés bien plus rapidement que prévu et se sont retrouvés, en une dizaine d'années seulement, sur des orbites totalement différentes de celles qui étaient originellement prévues sans l'existence de ces courants gravitationnels. Les astronomes se sont ainsi rendu compte que l'existence des courants de gravité pouvait aussi expliquer le comportement en apparence erratique de certaines comètes. C'est la première fois que des observations astronomiques révèlent de manière concrète une action visible des courants de gravité sur de petits objets célestes.

TOUT PASSE PAR LA LUNE

Aujourd'hui, avant d'envisager de se rendre aux confins du Système solaire à moindre coût, les agences spatiales s'intéressent fortement à l'utilisation des points de Lagrange L1 et L2 du système Terre-Lune et aux courants de gravité qu'ils engendrent, afin de planifier de prochaines missions vers la Lune. En effet, si l'ambition affichée des prochaines décennies est d'envoyer des humains sur Mars, il faudra d'abord, pour atteindre cet objectif, revenir sur la Lune pour y construire une base qui servira de point intermédiaire et de centre de communication (au pôle Nord de la Lune). Construire une telle base nécessite d'amener de grandes quantités de matériel vers la Lune, ce qui peut être fait de manière complètement robotisée, sans aucun humain à bord : on parle alors de « missions cargo ». Quoi de mieux alors que ces courants gravitationnels ? Grâce à ses

Grâce à ces trajectoires spatiales, des missions de ravitaillement lentes mais à moindre coût

travaux de thèse, Maxime Chupin a démontré, en 2018, que l'on peut utiliser les tubes invariants en forme de 8 qui sont engendrés par des orbites de Lissajous en 8 autour du point L1 du système Terre-Lune (2). Ces tubes ont en effet la propriété remarquable de conserver cette structure sur des temps longs, contrairement aux tubes engendrés par les orbites de halo qui, rapidement, s'évasent comme une trompette (ils sont naturellement chaotiques) et sont donc inutilisables sur des temps trop longs ou sur de très longues distances. Ainsi, on sait aller de la Terre à la Lune de manière quasi gratuite, à ceci près qu'il faut bien sûr au préalable s'arracher de l'attraction terrestre (inévitable dépense de carburant pour lancer un engin en orbite). Une fois que l'objet a « attrapé » un courant de gravité, on le laisse dériver dans un tube en 8 et il arrive en trois ou quatre mois à presque tout point à 1 500 kilomètres seulement de la surface de la Lune.

Rien n'interdit de concevoir, dans le futur, des missions spatiales (probablement robotisées, à moins de savoir congeler des humains pendant une longue durée !) très lointaines, permettant de rejoindre des satellites de Jupiter ou de Saturne, et peut-être même d'aller au-delà. Il est remarquable que la simple théorie de la gravitation newtonienne, pourtant tout à fait déterministe, contienne dans les entrelacs de ses équations mathématiques cette richesse chaotique qui mène à ces applications dans le transport spatial que l'on ne soupçonnait pas il y a quelques décennies encore. ■

(1) N. Todorovic *et al.*, *Science*, *6*, eabd1313, 2020.

(2) M. Chupin *et al.*, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, *41*, 658, 2018.

Ammoniac : concilier qualité de l'air et apport nutritionnel aux plantes

Comment diminuer les émissions d'ammoniac tout en garantissant une agriculture suffisamment productive ?

93% de l'ammoniac (NH_3) anthropique présent dans l'air que nous respirons provient des activités agricoles et près de la moitié est imputable à la volatilisation suite aux apports d'azote nécessaire à la croissance des plantes cultivées. Améliorer la qualité de l'air tout en préservant la productivité de l'agriculture : un équilibre auquel tente de contribuer Sophie Génermont, chercheuse à Inrae depuis bientôt 30 ans, par ses travaux sur la mise au point de dispositifs de mesure et de développement d'outils d'aide à la décision.



© : INRAE

Travail de terrain de Sophie Génermont et son équipe.
Cette expérimentation a été faite dans le cadre d'un projet ADEME , le projet «PROLAB» (Ademe, 2013-2017).

Fort contributrices à la formation des particules fines connues pour leur impact sur la santé humaine, les émissions d'ammoniac atmosphérique sont particulièrement surveillées, notamment au début du printemps. Une saison où, pendant que la population profite des activités de plein air, les agriculteurs apportent de l'azote aux cultures en pleine reprise de croissance, alors que les conditions anticycloniques favorisent aussi l'arrivée de masses d'air « chargées » depuis le Benelux. Les premières prises de conscience datent des années 2000 : des pics de fortes concentrations en nitrate et sulfate d'ammonium interpellent la communauté scientifique, d'autant plus que l'ampleur de ces phénomènes n'avait pas été anticipée par les modèles de la qualité de l'air.

CADASTRE_NH_3, OUTIL PROCHE DE LA RÉALITÉ DE AGRICOLE

Proposer des solutions de réduction des émissions d'ammoniac d'origine agricole nécessite de disposer d'un outil capable de les évaluer avec précision et robustesse. C'est ce que permet l'outil Cadastre_NH_3 développé par des chercheurs d'Inrae et d'Agroparis-Tech grâce à un financement de l'Ademe (2010-2015). *« Cadastre_NH_3 peut indiquer la présence d'ammoniac émis en un lieu, à l'échelle d'un territoire sur un pas de temps horaire »*, explique Sophie Génermont. Ce nouvel outil intègre Vollt'Air, un modèle qu'elle avait initié dès sa thèse en 1996, pour prédire la volatilisation d'ammoniac après fertilisation avec des engrais de synthèse ou des produits résiduaires organiques (PRO). Ces PRO sont très majoritairement issus de l'élevage, mais proviennent aussi d'autres secteurs d'activité. A ce modèle mécanistique sont associées des bases de données temporalisées et géo-référencées concernant les sols, la météorologie et les modes de fertilisation azotée selon les types de cultures (date, dose et forme de l'engrais, mode de l'apport) : quelques centaines de milliers de combinaisons permettent de représenter de manière réaliste l'ensemble des conditions rencontrées dans la pratique agricole française pour une année culturale. Ces données spatio-temporelles



© : INRAE

sont complétées régulièrement. *« Ce n'est pas encore du « big data » tel que chez Météo-France, mais pour faire tourner nos modèles, nous avons des serveurs puissants, sans lesquels le système aurait délivré ses résultats en une semaine ! »*.

UNE MEILLEURE PRÉVISION DE LA QUALITÉ DE L'AIR

L'outil Cadastre_NH_3 peut être utilisé dans un chaînage d'outils avec deux grandes directions d'application : un meilleur raisonnement de la fertilisation azotée, d'une part, et une meilleure prévision de la qualité de l'air, d'autre part, comme cela est le cas dans le projet Amp'Air (Ademe, 2016-2021). *« L'anticipation des pics est facilitée et les alertes sur les périodes de dépassement de seuils sont affinées »*.

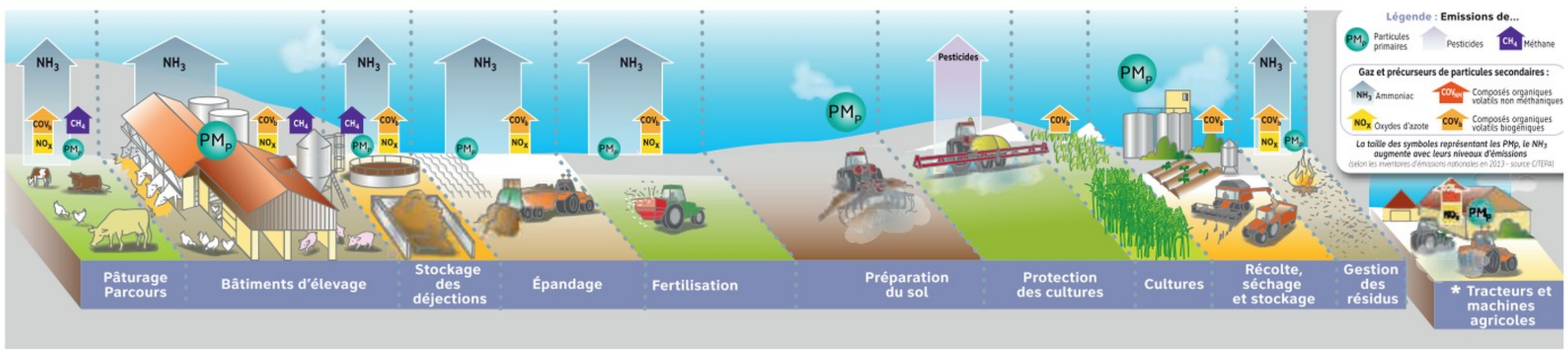
Il peut être mobilisé en appui à la mise en place de politiques publiques sur les pratiques agricoles : le projet PolQA (Ademe, 2016-2021) propose de faires des simulations à court et moyen termes. Comment changer les pratiques agricoles pour réduire les émissions ? Quelles règlementations mettre en place pour améliorer la qualité de l'air mais aussi optimiser la fertilisation azotée ?

La question de l'ammoniac est très sensible en agriculture. Poste budgétaire important et incontournable, les producteurs n'ont aucun intérêt à le voir s'envoler dans l'atmosphère au détriment de leurs cultures. Ces outils développés en collaboration par Sophie Génermont permettront de préconiser des conduites d'apport plus vertueuses zone par zone, en fonction du climat, des cultures et des ressources locales en ressources azotées : localisation, injection, décalage ou fractionnement des apports, incorporation rapide après épandage, etc. Un objectif à terme : améliorer durablement la qualité de l'air en réduisant la contribution de l'agriculture, et, plus ponctuellement, prévenir et contenir les pics de pollution printaniers, avec des propositions de mesures adaptées à chaque réalité ultra-locale et temporelle.

Sophie Génermont, experte des émissions d'ammoniac au champ

Sophie Génermont est chercheuse à Inrae (UMR Ecosys « Écologie fonctionnelle et écotoxicologie des agrosystèmes » à Grignon). Ingénieure agronome, elle cumule 30 ans d'expérience sur l'étude de la volatilisation de l'ammoniac d'origine agricole suite à la fertilisation azotée des cultures. Concilier qualité de l'air avec une diminution des émissions et apport nutritif suffisant aux plantes est une équation complexe. Son travail de recherche conjugue expérimentations de terrain, travail de laboratoire, analyses de données, modélisation ainsi que coordination et participation à des projets multipartenaires. La chercheuse participe actuellement à 3 projets de recherche appliquée financés par l'Ademe et l'Europe : travaux de caractérisation, typologie des émissions d'ammoniac des engrais, modélisation mécaniste et empirique, insertion de modules de volatilisation dans des outils d'évaluation multicritère des pratiques de fertilisation et de recyclage des produits résiduaires au champ, avec des approches « filières », intégration dans des modèles de qualité de l'air. Depuis 2 ans, elle est l'animatrice scientifique du réseau mixte technologique (RMT) « BOUCLAGE : recyclage, fertilisation et impacts environnementaux » : 45 organismes réunis pour assurer le lien entre la recherche et l'agriculture en délivrant des références, des méthodes et des outils d'aide à la décision adaptés aux réalités de terrain. Experte auprès des ministères de l'agriculture et de l'environnement et aussi à l'international Sophie Genermont a co-coordonné en 2019 l'ouvrage « Agriculture et Qualité de l'air » aux éditions Quae, également disponible chez Springer en version anglaise.

Les différents postes d'émission des polluants atmosphériques



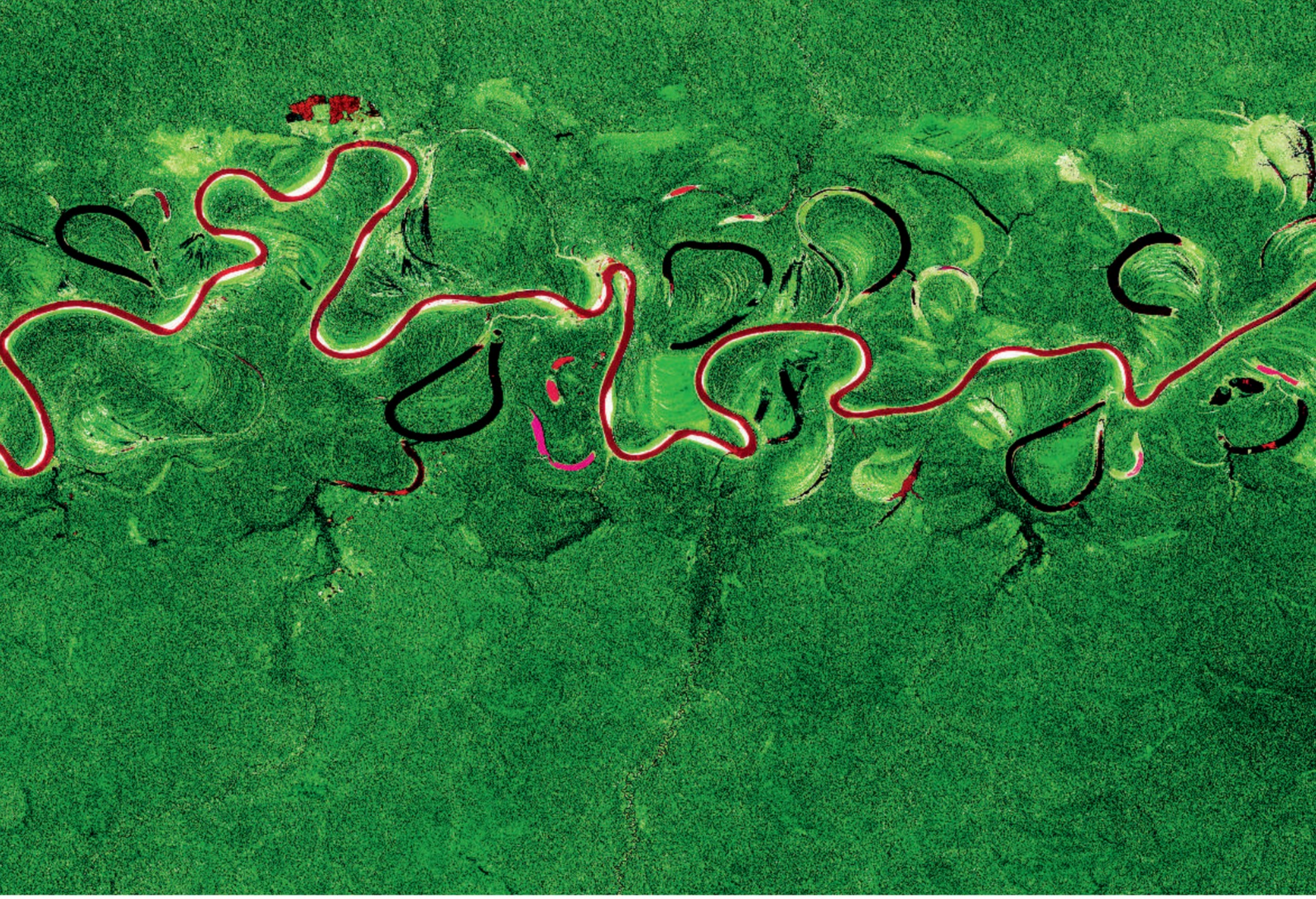
G.Castagnon / Source: Ademe

RETOUR AU SOMMAIRE



La géomatique pour rebattre les cartes de l'Amazonie

Immense par sa superficie, pluriel par le type de reliefs et de paysages qu'on y rencontre, multiple par le nombre de cultures qui y cohabitent, le massif amazonien est un espace géographique difficile à appréhender. La géomatique, ou science de l'information géographique, permet aujourd'hui, en manipulant et en combinant images satellitaires, jeux de données statistiques, relevés GPS, prises de vue aérienne par drone, corpus de textes ou de cartes anciennes, etc., d'obtenir des représentations spatiales inédites de l'Amazonie pour mieux en apprécier la diversité.



▲ *Composition colorée d'images du satellite Sentinel-2 de la couverture végétale de l'Amazonie. En marron magenta, le rio Juruá.*

D. R. - D.R. - COPERNICUS SENTINEL DATA / ESA

Pour beaucoup d'Européens, l'Amazonie a une dimension mythique qui oscille depuis le XVI[e] siècle entre le jardin d'Eden et l'Enfer vert. Nombre de cartes anciennes ont contribué à alimenter ces stéréotypes en relayant ou en amplifiant de célèbres mythes amazoniens : le lac Parimé, étendue d'eau légendaire, réputée pour être l'emplacement de la non moins légendaire ville d'El Dorado (supposée regorger d'or) ; Les monts Tumuc Humac, chaîne de montagnes imaginaire dont on pensait qu'elle était située au carrefour entre le Sud de la Guyane française, le Sud du Suriname et le Nord du Brésil, etc. Si les historiens ont bien montré les contextes politiques, culturels et sociaux de production de ces cartes anciennes, de nombreuses idées reçues demeurent. Encore aujourd'hui, la forêt amazonienne est assimilée tantôt à une jungle impénétrable, un espace sauvage et hostile, tantôt à un territoire vierge,



Matthieu Noucher
GÉOGRAPHE, CNRS BORDEAUX
Spécialiste des sciences de l'information géographique, il travaille sur les enjeux sociopolitiques de la cartographie numérique.



Laurent Polidori
SPÉCIALISTE EN CARTOGRAPHIE ET TÉLÉDÉTECTION SPATIALE, TOULOUSE
Il est aussi professeur à l´université fédérale du Para, à Belém (Brésil).

en grande partie inhabité, paradis d'une nature en sursis. Avec le tournant numérique, la cartographie a pourtant bien évolué et le développement de la géomatique permet désormais d'appréhender de manière plurielle et renouvelée ce massif forestier.

Contraction des termes « géographie » et « informatique », la géomatique ou science de l'information géographique (GIScience) couvre un vaste ensemble de savoirs, de méthodes et de technologies permettant l'acquisition, le stockage, l'analyse, l'interprétation et la diffusion de l'information géographique. Résolument interdisciplinaires, les recherches dans ce domaine permettent d'appréhender des espaces géographiques complexes et dynamiques – précisément comme l'Amazonie – en manipulant et en combinant des données numériques d'échelles spatiales et temporelles différentes : images satellitaires, jeux de données statistiques, relevés GPS, prises de vue aérienne par drone, corpus de textes ou de cartes anciennes, etc. Cette diversité de sources offre aujourd'hui des représentations spatiales inédites de cette région du monde pour en apprécier la diversité. Par exemple, en s'appuyant sur une campagne d'inventaire d'une trentaine de sites, couplée à l'exploitation d'images multispectrales des satellites SPOT et à un modèle numérique de surface issu de données radar, la cartographie des habitats forestiers pilotée par l'Office national des forêts a permis de révéler une grande diversité de paysages, d'habitats écologiques, et de faciès forestiers. Les difficultés sont pourtant nombreuses, car la région amazonienne concentre de multiples défis en matière de recherche en géomatique.

La palette des outils techniques permet des représentations spatiales inédites de la région amazonienne

UN TERRITOIRE BIEN MOINS UNIFORME QU'IL N'Y PARAÎT

Le premier de ces défis est lié au territoire lui-même, bien moins uniforme qu'il n'y paraît. Vaste plaine qui s'étend sur plus de 5 millions de kilomètres carrés, de la Cordillère des Andes à l'océan Atlantique, au nord du continent sud-américain, l'Amazonie n'est ni une *terra nullius,* espace vide d'habitants, ni une étendue homogène couverte d'une forêt uniforme. Loin de l'immense zonage vert que l'on trouve sur la plupart des planisphères ou du bloc monolithique à la texture de brocoli visible sur Google Earth, la zone est plurielle, habitée, travaillée, traversée de mille façons. Le Brésil occupe les deux tiers de cette vaste région, le tiers restant étant réparti sur la périphérie du bassin-versant entre huit pays voisins : la Bolivie, le Pérou, l'Équateur, la Colombie, le Venezuela, le Guyana, le Suriname et la France (via la Guyane française). Au-delà du strict périmètre du bassin-versant de l'Amazone, la région dite amazonienne s'étend également jusqu'au littoral des Guyanes, au nord du continent.

Sur place, le climat est chaud et humide et la couverture nuageuse importante pendant la majeure partie de l'année. Le relief est modéré et couvert de forêt dense. Les changements du paysage (croissance urbaine, hydrographie, déforestation…) sont rapides. Les conditions géologiques et climatiques sont à l'origine d'un milieu naturel exubérant à la biodiversité exceptionnelle. Hormis les deux mégapoles brésiliennes Belém et Manaus, capitales respectives des États du Pará et de l'Amazonas, la région est relativement peu peuplée, la population étant principalement localisée dans des centres urbains de taille moyenne et des communautés villageoises dispersées, essentiellement le long des rivières, qui exploitent les ressources locales (poissons, fruits…) et dont l'existence est rythmée dans le temps par les cycles hydrologiques naturels.

L'économie de la région est contrastée, entre l'économie locale de subsistance et l'exploitation minière, forestière et agricole, dont les produits sont transportés par la route vers le Sud du Brésil ou par voie maritime depuis les grands ports industriels situés dans l'estuaire de l'Amazone (Barcarena, Santana). Des groupes autochtones ont pu maintenir une présence effective sur des espaces importants comme, au Brésil, les Yanomami, dont le territoire s'étend sur 9,6 millions d'hectares. L'Amazonie est donc aussi un espace d'altérités où des pratiques culturelles différentes de celles des sociétés dominantes existent : des relations à l'espace, des visions du monde, des cosmogonies ainsi qu'un fort sentiment d'appartenance peuvent alors engendrer des conflits avec les métropoles qui tentent de les contrôler.

L'AMAZONIE, INÉPUISABLE TERRE DE SCIENCES

Objet d'une attention internationale pour son rôle écologique global et sa diversité biologique, l'Amazonie est une terre qui suscite une intense activité scientifique, au-delà de la convoitise qu'elle attise pour ses ressources naturelles au fort potentiel économique. La recherche y est menée par les universités et institutions scientifiques locales, le plus souvent en coopération internationale. Au-delà des questionnements purement scientifiques autour des herbiers et autres collections, cette recherche répond aux besoins des gestionnaires du territoire et aux entreprises qui ont besoin de connaître l'impact de leurs activités. Les observations récurrentes menées in situ (expéditions ou stations pérennes de mesure) ou par satellite contribuent aussi à alimenter des bases mondiales d'information, notamment pour la recherche sur le climat.

Les thématiques de recherche développées dans la région sont nombreuses. Les géophysiciens étudient notamment l'ionosphère (qui influence le positionnement par GPS) et le champ magnétique, qui ont un comportement particulier au voisinage de l'équateur. Les géologues émettent des hypothèses sur l'histoire complexe du Bassin amazonien, notamment dans sa phase quaternaire – la plus récente – qui combine ses effets avec ceux du climat pour produire des transformations spectaculaires de l'hydrographie sur des temps très courts, quelques siècles à peine comme l'atteste la cartographie postcoloniale.

Par ailleurs, l'eau est l'objet d'importantes recherches et de campagnes de mesure, compte tenu de son rôle dans le fonctionnement des écosystèmes, dans les événements hydro-météorologiques extrêmes, dans le transport de sédiments depuis les Andes jusqu'au littoral des Guyanes et dans l'organisation de la vie sociale des populations amazoniennes. L'impact des activités humaines et la vulnérabilité des milieux naturels constituent également une importante thématique de recherche, qu'il s'agisse de la pollution d'origine industrielle qui contamine l'eau et les sédiments des fleuves, ou de la déforestation, qui se propage au gré du marché du soja et de la viande de bœuf, détruit les sols et les habitats naturels et engendre des déséquilibres climatiques.

Enfin, les sciences humaines, de la linguistique à l'économie rurale, trouvent en Amazonie un champ d'études particulièrement riche compte tenu de la complexité du peuplement et de son rapport au milieu.

Au-delà de la quantité et de la diversité des thématiques de recherche développées sur place, il convient de souligner les passerelles qui les relient : l'étude des déformations de l'écorce terrestre sous le poids de l'eau en saison des pluies, le rôle des mangroves dans le renouvellement des ressources halieutiques,



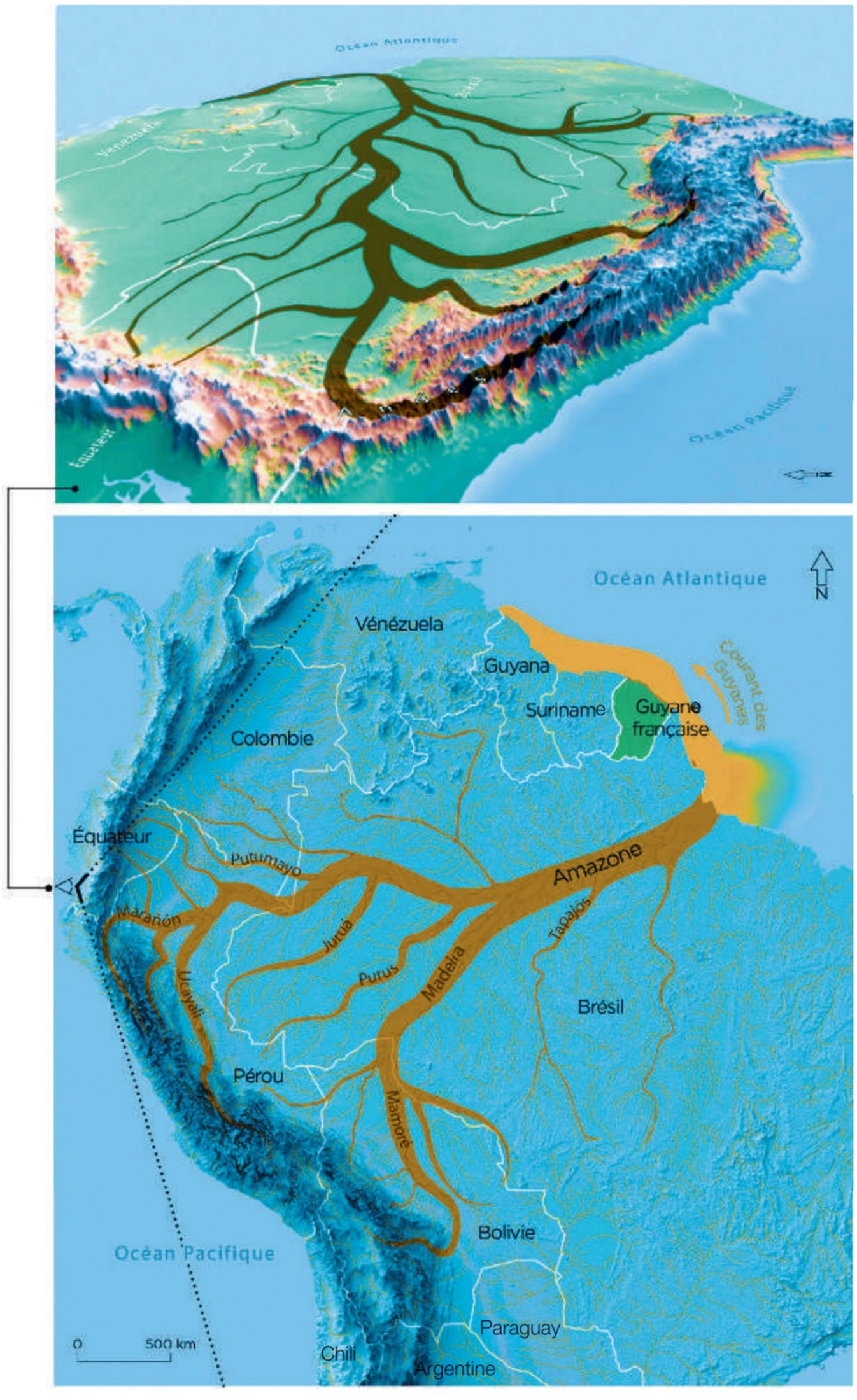
ORTHOPHOTOGRAPHIE CACL / EPFAG 2019, LIDAR TRIDEM ÎLE DE CAYENNE / DEAL GUYANE 2014 - MONTAGE : SÉBASTIEN LINARÈS, 2022.

▲ *La topographie du mont Paramana (Guyane française) : à gauche, vue aérienne ; à droite, la même vue, prise cette fois avec le Lidar, technique de télédétection par balayage laser, qui permet de percer le couvert forestier et de révéler le relief de manière exhaustive.*

POUR EN SAVOIR PLUS

- Matthieu Noucher et Laurent Polidori (dir.), *Atlas critique de la Guyane,* CNRS Éditions, 2020.
- Nepthys Zwer et Philippe Rekacewicz, *Cartographie radicale,* La Découverte, 2021.
- Juliette Morel, *Les Cartes en question,* Autrement, 2021.

- **https://tinyurl.com/illusion-cartographique**
Cycle de conférences qui visent à aborder la cartographie sous un angle critique.



DES ANDES AUX GUYANES

L'instabilité du littoral des Guyanes est due à la migration de bancs de vase (étudiée par les équipes du CNRS d'Antoine Gardel) souvent suivie d'une colonisation ou d'un démantèlement des mangroves. Cette simulation, réalisée à partir d'un modèle numérique de terrain, montre aussi le cheminement des matériaux arrachés par l'érosion de la Cordillière des Andes jusqu'aux plages des Guyanes.

l'effet de la déforestation dans l'apparition des épidémies, etc., exigent une approche résolument interdisciplinaire.

L'INDISPENSABLE RÔLE D'ARBITRE DE LA GÉOMATIQUE

Des verrous à ces travaux scientifiques existent néanmoins : l'extension du territoire, des difficultés d'accès sur des terrains impraticables, des conditions météorologiques défavorables. Par ailleurs, l'infrastructure géodésique (essentiellement la connaissance du champ de pesanteur terrestre et des réseaux de points de référence pour le calcul des positions et des altitudes), indispensable pour déterminer la géométrie des surfaces continentales, est moins précise et moins dense en Amazonie qu'ailleurs. Ces obstacles conduisent à des situations inconnues dans d'autres lieux, comme l'impossibilité de comparer l'altitude des deux rives de l'Amazone en raison de la largeur de ce fleuve (jusqu'à 40 kilomètres, avec de nombreuses îles qui le divisent en plusieurs bras et créent un réseau complexe de canaux). Il en résulte notamment une cartographie structurellement déficiente.

Or, une cartographie incertaine est non seulement un frein au développement régional, mais aussi une source d'impunité face aux dégradations et une condition propice aux conflits environnementaux, car elle impose des zonages rigides mal reliés aux visions du monde et aux systèmes d'usage de l'espace locaux, ce qui peut nourrir un sentiment croissant de dépossession territoriale de la part des habitants. De nombreux projets de cartographie participative tentent ainsi d'impliquer des collectifs autochtones pour prendre la main sur la représentation de leur territoire ou pour dénoncer des projets auxquels ils s'opposent. Face à la multiplication des projets extractivistes qui menacent les communautés autochtones, des contre-cartographies essayent de rendre visibles d'autres réalités de leur territoire. En Guyane française, par exemple, différents détournements cartographiques ont été réalisés pour dénoncer l'étendue du projet de mine d'or industrielle « Montagne d'Or » et ses effets potentiellement néfastes sur l'environnement.

RTM, FAO, SEDIMENTS AMAZON WATERS / JULIE PIERSON, 2020.

Dans ce contexte, les scientifiques et les gestionnaires du territoire ont utilisé, depuis plusieurs décennies, les outils de la géographie numérique, notamment la télédétection spatiale, pour une mise à jour plus rapide de l'information géographique dans des zones étendues et difficiles d'accès, et pour une représentation plus compréhensible de phénomènes dynamiques complexes comme la croissance urbaine, la déforestation ou les déformations du littoral.
Cependant, les difficultés qui font obstacle à toute activité scientifique dans cet immense territoire dégradent également les performances des outils géomatiques. C'est le cas, par exemple, de la photogrammétrie. Cette technique, qui a fait ses preuves depuis un siècle pour mesurer le relief à partir de photographies prises par avion ou par satellite, est utilisée dans le monde entier pour la cartographie officielle des territoires continentaux. Mais, en Amazonie, elle n'est viable que lors d'une courte saison sèche (quelques semaines), la couverture nuageuse obligeant, le reste du temps, à recourir à des méthodes moins précises comme le radar. Quant à la couverture forestière, elle masque le sol limitant la possibilité de cartographier le relief ou de modéliser l'hydrographie. Le Lidar, méthode de télédétection utilisant un capteur laser, permet alors de traverser la canopée et d'établir des modèles numériques de surface qui révèlent des micro-topographies : c'est ainsi que des vestiges archéologiques d'origine précolombienne sont régulièrement découverts. Mais cette technologie reste coûteuse, et la couverture des données est encore fragmentaire.

RELEVER TOUJOURS PLUS DE DÉFIS TECHNOLOGIQUES

Par ailleurs, compte tenu des transformations rapides des paysages, la carte une fois publiée est rapidement périmée. Par exemple, les alluvions charriées par l'Amazone depuis la Cordillère des Andes alimentent d'immenses bancs de vase qui font du littoral guyanais et surinamais l'un des plus instables du monde. Enfin, les systèmes d'information géographique gèrent facilement des paysages structurés, constitués de parcelles homogènes et discontinues que l'on peut représenter comme des polygones. Or, cette approche, bien que très efficace, est malheureusement, peu adaptée aux paysages plus complexes où l'on passe de manière progressive d'un écosystème à un autre, comme les vastes plaines marécageuses qui s'étendent le long de l'Amazone.
Ainsi, la géomatique, auxiliaire indispensable de la plupart des activités de recherche en Amazonie, se heurte elle-même, dans cet environnement rebelle, à des difficultés qui sont autant de défis méthodologiques à relever.

L'Amazonie, espace rebelle, est un territoire d'expérimentation de premier plan pour la géomatique

L'outil de la recherche devient donc lui-même un objet de recherche. Cette situation fait de l'Amazonie un territoire d'expérimentation de premier plan pour les sciences de l'information géographique.
On l'a dit, les difficultés d'accès obligent bien souvent l'observateur à céder la place au satellite, et l'immensité de la région oblige à traiter de gigantesques quantités de données et stimule le développement de méthodes automatisées. Mais il arrive que les satellites les plus performants puissent eux-mêmes être mis en échec et exiger des méthodes d'observation adaptées. D'une part, les variables environnementales, comme la turbidité (*) des fleuves ou la biomasse des forêts, qui sont supposées être estimées à partir de la mesure des satellites, atteignent en Amazonie des valeurs extrêmes

(*) **La turbidité** mesure la concentration de l'eau en matières qui la troublent. L'une des conséquences de l'orpaillage est de fortement augmenter la turbidité des cours d'eau en raison du creusement et de la destruction des sols. Sa valeur approchée peut être obtenue avec des images de télédétection optiques grâce à la corrélation entre la turbidité et la couleur de l'eau.

(*) **L'ADN environnemental** désigne une technique qui consiste à identifier des espèces – végétales, animales, microbiennes – à partir des traces d'ADN qu'elles laissent dans l'environnement.

qui peuvent sortir du domaine de validité des modèles classiques d'estimation, nécessitant des observations dans d'autres longueurs d'onde. D'autre part, l'observation directe peut se révéler impossible et nécessiter une identification par d'autres moyens : par exemple, un chantier d'orpaillage illégal peut être dissimulé par la forêt et donc être indétectable par satellite, mais trahir indirectement sa présence à travers la turbidité anormale observée en aval sur le cours d'eau.

UNE AIDE PRÉCIEUSE POUR LA RECHERCHE SPATIALE

Par ailleurs, la modélisation de phénomènes continus à partir de données éparses sollicite la mise en œuvre de méthodes géostatistiques, comme l'interpolation spatiale des données – cartographier une variable à des positions où aucun échantillon n'est disponible à partir des données disponibles – en tenant compte de la variabilité du phénomène. On peut penser ici au calcul et à la spatialisation de l'aire de répartition d'une espèce à partir de la collecte ponctuelle d'ADN environnemental (*). Enfin, les controverses sur des phénomènes à fort enjeu, nourries de données incomplètes et difficiles à vérifier, imposent un travail rigoureux de validation de l'information. C'est le cas de la déforestation qui, dans le cas du Brésil, est suivie par satellite depuis quarante ans : l'évolution du phénomène est rendue publique avec une inévitable incertitude, qui est évaluée de manière transparente.

Les acteurs de cette recherche méthodologique ne s'y trompent d'ailleurs pas. Par exemple, les agences spatiales qui conçoivent les satellites d'observation de la Terre ont souvent testé sur des sites amazoniens des concepts instrumentaux ou algorithmiques nouveaux, destinés à être mis en œuvre dans le cadre de futures missions spatiales. C'est notamment le cas du radar, un capteur particulièrement adapté aux environnements tropicaux, dont le potentiel a été évalué à partir des années 2000 sur des images acquises lors de survols aériens ou de vols expérimentaux de la navette spatiale, notamment sur la Guyane française et l'Amazonie brésilienne, pour des applications aussi variées que la cartographie des mangroves, le calcul de la biomasse forestière ou la mesure du relief à travers forêt.

RENDRE VISIBLE LA DIVERSITÉ DU MONDE

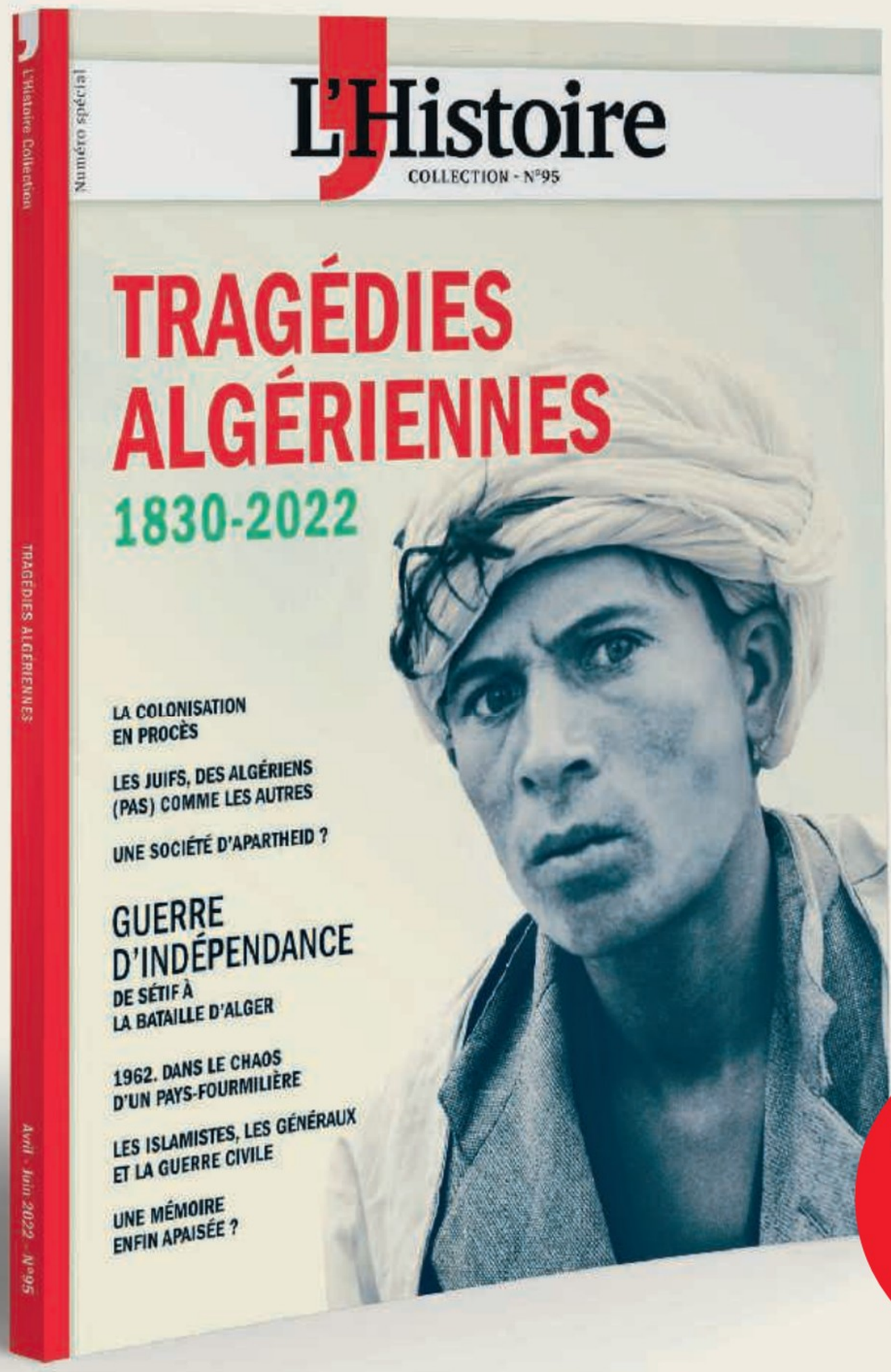
Enfer vert ou paradis perdu, crainte ou vénérée, l'Amazonie est l'archétype de la forêt « vierge » et de son pendant scientifique la forêt « primaire ». Mais derrière cette apparente simplicité, ces notions ambigües sont chargées de mythes et d'idéologie, et caractérisent un espace en recul qui fait une place croissante à l'agriculture. Ces forêts ne sont donc ni primaires, ni vierges, ni figées, et elles sont loin de couvrir tout l'espace amazonien. La géomatique rend compte de l'histoire écologique, sociale et culturelle de cette région, permettant d'en apprécier la diversité et la complexité. Mais les données scientifiques issues de cette boîte à outils sont, plus qu'ailleurs, chargées d'incertitudes, et l'Amazonie garde sa part de mystère. ■

La recherche en géomatique en France

Au carrefour de la géographie et de l'informatique, mais mobilisée également en histoire, écologie, archéologie, etc., la géomatique est un domaine de recherche pluridisciplinaire fédéré en France au sein d'un réseau national : « Méthodes et applications pour la géomatique et l'information spatiale » (GDR CNRS Magis). Regroupant, depuis 2009, plus de 350 chercheurs répartis dans une cinquantaine de laboratoires, ce réseau accompagne une communauté scientifique qui développe et utilise une grande variété d'approches, de méthodes et d'outils permettant de mieux appréhender l'espace géographique et ses dynamiques à partir de données numériques spatialisées.

Analyses spatiales, modélisations spatio-temporelles, géovisualisations dynamiques, simulations 3D, observatoires scientifiques sciences-sociétés, infrastructures de données géographiques, ontologies spatiales ou encore graphes de connaissances sont autant de champs d'investigation qui appellent des collaborations interdisciplinaires. ■ M. N. et L. P.

http://gdr-magis.imag.fr



LE NOUVEAU
magazine-livre
des passionnés
d'histoire

Trimestriel
132 pages

Chez votre marchand
de journaux
et chez
votre libraire

Les meilleurs historiens retracent ici le temps long de l'Algérie : les violences de la conquête et du régime colonial, les huit ans d'une guerre qui déchira tous les camps, mais aussi les drames qui ont suivi l'indépendance en 1962. Raccommoder les mémoires implique de regarder en face cette histoire partagée.

L'Histoire
COLLECTION





François Passelègue,
MÉCANICIEN DES ROCHES, GÉOAZUR, UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR, NICE.



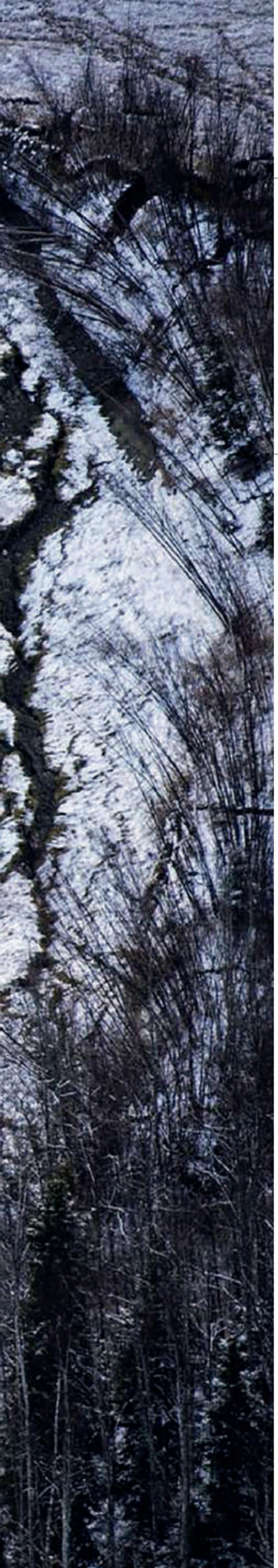
Federica Paglialunga
ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE, LAUSANNE
En thèse, dirigée par François Passelègue et Marie Violay.



Alexandre Schubnel,
MÉCANICIEN DES ROCHES, ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE (ENS), PARIS

La rupture de failles, l'inconnue

La rupture des failles présentes dans la croûte terrestre déclenche des séismes. Mais les failles sont impossibles à étudier dans la nature dans toute leur richesse et leur complexité. Les géophysiciens exploitent donc des modèles en laboratoire. En bardant ces failles de capteurs et en étudiant leur comportement, ils obtiennent des résultats analogues aux tremblements de terre naturels. Demain, on utilisera des méthodes d'apprentissage profond de l'intelligence artificielle pour analyser les données de sismicité obtenues au laboratoire sur des failles de grande dimension, afin de tester les prévisions physiques qui ne seront plus uniquement fondées sur les probabilités.



MARC LESTER/AP/SIPA - DR - EPFL - DR

◀ *La Vine Road, à Wasilla, au sud de l'Alaska (États-Unis), le 30 novembre 2018, après un séisme de magnitude 7 et d'une profondeur de 41 kilomètres, suivi de nombreuses répliques. La région connaît une forte activité sismique : en 1964, un séisme, parmi les plus forts au monde, y a été enregistré, de magnitude 9,2 ; le plus récent a eu lieu en août 2021, de magnitude 8,2. Quand sera le prochain ?*

À cause de l'ampleur des dégâts humains et matériels que provoquent les séismes, leur prédiction reste aujourd'hui l'un des plus grands défis des géosciences et des sciences en général. Toutefois, contrairement aux phénomènes météorologiques qui prennent place dans l'enveloppe externe de la Terre, les rendant accessibles à l'observation directe, les tremblements de terre naissent et se propagent dans l'enveloppe interne de notre planète, à des profondeurs qui restent à ce jour hors d'atteinte (*). La compréhension, l'imagerie et la prédiction de ces phénomènes sont fort complexes. Plus de 100 000 séismes de magnitude (*) supérieure à 3 sont enregistrés chaque année sur le globe. Heureusement, seuls les plus puissants d'entre eux, beaucoup plus rares, comptent parmi les catastrophes naturelles, tel le tremblement de terre de Sumatra qui a eu lieu en décembre 2004 au large des côtes indonésiennes (magnitude 9,1 à 9,3), ou celui de Tohoku-oki (magnitude 9,1) qui s'est produit en 2011 au large des côtes nipponnes. Lors de ce dernier événement, la rupture d'une grande longueur de faille a entraîné un déplacement du sol d'une vingtaine de mètres par endroits, engendrant un tsunami dévastateur faisant plusieurs dizaines de milliers de morts et entraînant l'explosion des réacteurs de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Si le séisme a été annonciateur du tsunami, aucun signe n'annonçait la rupture de la faille.

Pourquoi la Terre est-elle une planète sismique ? C'est en raison des lents déplacements des plaques tectoniques accumulant des contraintes dans les roches qui se relâchent de temps à autre. Il s'agit bien d'un phénomène déterministe. Mais les paramètres sont tellement nombreux, et la réalité des failles tectoniques dans la nature tellement complexe – failles multiples de différentes tailles, avec des géométries variées en trois dimensions, présence de fluides – qu'on ne peut pas prévoir la survenue d'un tremblement de terre. Au mieux, les sismologues en sont réduits à des considérations probabilistes : sachant où, sur le globe, se sont produits les séismes passés, ils peuvent juste donner une probabilité qu'un séisme d'intensité donnée s'y produise à nouveau.

Mais la physique même de la rupture, qui relève de la mécanique des matériaux, est également complexe. À partir de quelle contrainte une faille de géométrie très simple – plane – se casse-t-elle ? Existe-il des lois universelles qui permettent de connaître le comportement des failles modèles ?

CONNAÎTRE LE TYPE DE CONTRAINTE QUI DÉCLENCHE UN TREMBLEMENT DE TERRE

À la fin des années 1960, alors même que les géophysiciens commencent à comprendre les mécanismes de la tectonique des plaques, deux physiciens des roches américains travaillant à l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), William F. Brace (1926-2012) et James D. Byerlee (1927-2015), proposent le mécanisme de glissement saccadé – *stick-slip* en anglais – comme un bon analogue des tremblements de terre. À l'aide d'expériences où ils tentent de faire glisser deux morceaux de granit l'un sur l'autre, ils montrent en effet que le glissement n'est pas continu, mais qu'il se produit par à-coups (1). Ce phénomène est attribué à la résistance et à la friction des matériaux, qui représente bien l'accumulation des contraintes causée par la dérive des continents, ainsi que la réactivation des failles et le glissement sismique au niveau de l'interface. Les tremblements de terre, eux, sont associés à la phase de glissement.

Le glissement saccadé est bien connu en physique. Il peut se reproduire en faisant glisser son doigt avec une certaine force sur une table

(*) **Les séismes** se classent suivant leur profondeur :
- séismes superficiels : 0 à 30 km
- séismes intermédiaires : 30 à 70 km
- séismes profonds : au-delà de 70 km et jusqu'à 700 km

(*) **La magnitude** est une échelle ouverte donnée par le logarithme de l'énergie libérée. Un accroissement d'une unité de magnitude correspond à 30 fois plus d'énergie libérée. Le plus fort séisme enregistré avait une magnitude de 9,5.

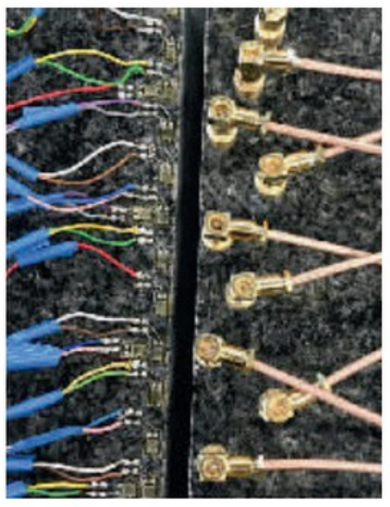
par exemple : par moments, le doigt glisse et à d'autres moments, il s'arrête, « collé » par les forces de frottement. Ce sont justement les forces de frottement qui semblent contrôler ce phénomène. Dans les années 1970, James Byerlee poursuit au MIT une série d'expériences où il montre que, si la contrainte est faible, la friction des roches dépend fortement de leur état de surface tandis que, à l'inverse, lorsque la contrainte est relativement forte, c'est-à-dire équivalente aux conditions supposées dans la partie de la croûte sismogénique, la friction est quasi indépendante de la rugosité de surface ou du type de roche. Ainsi, en menant un grand nombre d'expériences de glissement saccadé avec beaucoup de roches différentes et plusieurs types de contraintes jusqu'à la phase ductile – en augmentant la température, la roche devient moins cassante et présente un comportement plus plastique –, il s'est rendu compte que l'interface se rompt lorsque la contrainte appliquée est d'environ 0,6-0,85 fois la contrainte normale (2). Autrement dit, si l'on veut faire glisser un bloc de granit de 100 kilogrammes sur une table, il faut lui appliquer une force cisaillante équivalente à un poids de 60 kilogrammes (600 newtons). Ce résultat confirme les travaux précurseurs de Léonard de Vinci, qui avait stipulé dès 1508 que la force de frottement d'une interface est proportionnelle à sa charge, et qu'elle est indépendante de l'aire de contact (même si de récents résultats montrent que cela n'est pas tout à fait exact, cela reste vrai au premier ordre).

Ce critère dit de Byerlee rend possible en principe de prédire, connaissant la contrainte normale exercée sur une faille, quelle sera la contrainte cisaillante nécessaire pour rompre la faille, et donc déclencher un tremblement de terre. Peut-on prédire la survenue d'un tremblement de terre à partir de cette donnée ? Non, car on ignore les contraintes qui s'exercent sur les failles dans la nature, et ce pour plusieurs raisons. D'une part, parce que les failles ne sont pas équipées de capteurs qui permettraient de connaître cette grandeur – il y a des dizaines de milliers de kilomètres de failles à la surface du globe ; d'autre part, parce que dans la nature, la présence de fluides – sources hydrothermales notamment – modifie localement ces valeurs de contraintes. Dans un second temps, le fait qu'une faille entre en mouvement ne signifie pas forcément qu'un séisme va se produire. Effectivement, lors du démarrage d'un glissement, la vitesse de celui-ci augmente le long de la faille où la rupture se déclenche. Des études récentes ont montré que la friction dynamique des roches change avec la vitesse de glissement, et que certains types de roches ont des propriétés frictionnelles qui promeuvent les séismes, car la friction s'affaiblit avec l'augmentation de la vitesse de glissement ; à l'inverse, d'autres types de roches empêchent les séismes, car la friction croît avec l'augmentation de la vitesse de glissement. La complexité de ces phénomènes rend à ce jour la prédiction des ruptures des failles difficile, aussi bien dans le temps que dans l'espace.

A posteriori, après un tremblement du sol, il est possible d'évaluer l'énergie qui a été libérée par le relâchement de contrainte, de sorte qu'on est en mesure de calculer la variation de contrainte qui a eu lieu durant le séisme. Cela reste toutefois une entreprise délicate. Il existe même un débat entre sismologues sur la valeur réelle des contraintes sur les failles naturelles. Certains pensent qu'elles sont très faibles, de sorte qu'une toute petite perturbation, par exemple une marée, peut déclencher des séismes. D'autres, en revanche, estiment que la contrainte exercée est beaucoup plus grande et que c'est bien une force importante liée à la tectonique des plaques qui induit la rupture des failles.



▲ *Roche en biseau. En variant le type de matériau, on étudie le rôle des aspérités sur la rupture de faille.*



▲ *Vue d'une interface d'un échantillon équipé de capteurs de contraintes (à gauche) et de capteurs acoustiques (à droite).*

LES VOIX DE LA TERRE RETENTISSENT

Les expériences qui avaient été menées au MIT à la fin des années 1960 et dans les années 1970 ont jeté les bases de cette mécanique de la rupture des failles. Mais les moyens expérimentaux étaient limités. Notamment, les seules mesures réalisables alors en laboratoire étaient celles des forces et des contraintes, de sorte que l'on ne pouvait comprendre que les rapports de force qui permettent de déclencher les séismes. Dans les années 1990, David Lockner, de l'Institut des études géologiques des États-Unis (USGS), montre, en collaboration avec

FRANÇOIS PASSELÈGUE

Des caractéristiques identiques pour des séismes enregistrés en laboratoire ou sur site

des scientifiques russes, que les failles et les fractures qui se produisent dans la plupart des matériaux et pour une grande variété de températures et de pressions induisent la croissance d'un réseau de microfractures qui s'accompagne d'émissions acoustiques (3). On entend les séismes ! Ces émissions sont donc un phénomène universel qui peut être mis à profit pour les expériences. Lockner et d'autres ont ainsi créé de petits capteurs acoustiques qui résistent à la pression et qui permettent d'enregistrer la sismicité. Ces instruments sont des sortes de microphones qui enregistrent les ondes sismiques de laboratoire.

À l'aide d'un dispositif expérimental modernisé, nous avons revisité les expériences de Brace et Byerlee menées dans les années 1960, afin de mieux comprendre la physique des séismes. Nous sommes partis d'échantillons de roche variés en forme de cylindre. Ce cylindre est coupé en deux pour y créer une interface. Puis il est « appareillé », c'est-à-dire qu'on le munit de capteurs de déformations et de capteurs piézoélectriques acoustiques – de petites céramiques produisant un courant électrique quand elles entrent en vibration sous l'effet des ondes sismiques. Enfin, l'échantillon est placé dans une presse triaxiale qui le maintient et avec laquelle on applique une contrainte verticale jusqu'à atteindre le critère de Byerlee. Tout au long du processus, on enregistre les contraintes et les ondes sismiques.

En 2013, nous avons ainsi montré que ces séismes de laboratoire étaient très similaires aux séismes naturels (4). Au facteur d'échelle près – puisque nos failles expérimentales sont bien plus petites que les failles de séismes naturels et que les glissements durent moins longtemps –, les tremblements de terre que l'on enregistrait au laboratoire avaient les mêmes caractéristiques sismiques, la même forme d'onde, que les séismes enregistrés sur le globe. Nous avons également mesuré la vitesse de propagation de la rupture sismique, autrement dit à quelle vitesse « la fermeture Éclair », qui se propage le long de l'interface et qui vient débloquer la faille, se déplace. Nous avons ainsi mis en évidence l'existence de séismes « super-cisaillants » qui se propagent plus rapidement que les ondes de cisaillement. Ces séismes induisent localement de fortes perturbations d'onde sismique et donc créent d'importants dégâts pour les constructions humaines. Or, si ce type de séisme avait été vu expérimentalement en utilisant des matériaux plastiques – du polycarbonate –, les physiciens pensaient qu'ils étaient beaucoup plus rares dans les roches. En fait, à l'échelle du laboratoire, nous avons constaté que ces séismes super-cisaillants sont très communs dans les roches, dès lors que la contrainte à l'interface dépasse les 30 à 50 mégapascals (ou millions de newtons par mètre carré), soit la pression qui règne à 1 ou 2 kilomètres de profondeur.

CONNAÎTRE LA PUISSANCE DU SÉISME

Dans la nature, ces séismes sont assez rares. La première observation d'un tel séisme date de 1979 avec le tremblement de terre d'Imperial Valley, en Californie – d'autres ont été mis en évidence depuis, notamment en Alaska. Cette rareté s'explique entre autres par le fait que, pour le tremblement de terre réel, il y a de nombreuses hétérogénéités induisant des variations très locales de contraintes qui peuvent réduire la vitesse de croisière moyenne de la rupture. Prédire cette évolution de la vitesse de rupture au cours du tremblement de terre est de première importance car celle-ci contrôle à quelle vitesse l'énergie est relâchée au cours du séisme, autrement dit la puissance du tremblement de terre.

Dans cette direction, le développement de la théorie de la mécanique de la fracture a mis en exergue le fait que les grandes étapes d'un tremblement de terre, – la nucléation,

Magnitudes

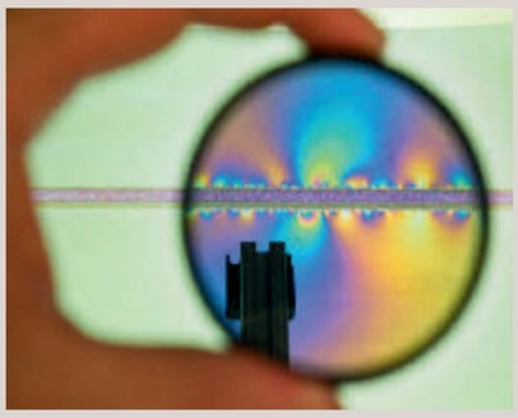
Plus les failles rompent sur des grandes longueurs, plus les magnitudes des séismes correspondants sont élevées, mais plus ces événements sont rares. En moyenne, on compte 150 séismes par an à la surface du globe de magnitude supérieure ou égale à 6 et, statistiquement, leur nombre décroît à mesure que la magnitude augmente :

- **M⩾6 : 150 séismes/an (en moyenne)**
- **M>7 : 15 séismes/an**
- **M>8 : 1,5 séisme/an.**

L'intelligence artificielle, une aide à la prédiction

Les séismes naturels de forte intensité sont rares. Comment alors entraîner les algorithmes d'apprentissage statistique ? En utilisant les données de failles expérimentales en laboratoire, équipées de nombreux capteurs. Un succès encourageant.

Prédire les séismes à partir de signes avant-coureurs est un vieux rêve de sismologue. Avec les techniques d'intelligence artificielle qui s'invitent dans toutes les sciences, il convenait de voir ce que l'apprentissage automatique pourrait apporter. Nous avons tout d'abord fondé ce qu'on nomme les « précurseurs ». Avant les séismes naturels, mais encore plus clairement dans les failles étudiées en laboratoire, il se produit des microséismes, des sortes de microglissements, avant que la faille ne casse complètement. Est-ce que ces précurseurs pourraient être annonciateurs de séisme ? Dans cette étude, grâce à une analyse statistique de ces petits précurseurs, on essayait d'estimer s'il allait y avoir un moyen de trouver un motif dans les données, signes avant-coureurs de l'arrivée des plus gros séismes. Cela a été un échec. Nous nous sommes alors rendu compte, par hasard, que la prévision fonctionnait mieux si, au lieu des précurseurs, nous étudions le bruit sismique (1), c'est-à-dire l'ensemble des signaux des ondes sismiques enregistrés autour de la faille, même en l'absence de glissement ou de fracture. En utilisant des algorithmes d'apprentissage statistique sur les données de bruit issu de failles expérimentales, nous sommes parvenus à de bonnes prédictions. Ce fut une assez grosse surprise. On ne s'attendait pas du tout à ce que l'étude du bruit, qui n'est pas vraiment lié au séisme lui-même, nous fournisse ce type d'information. Pour avoir des modèles robustes – pour des prédictions fiables –, il a fallu entraîner les algorithmes sur quelques dizaines de séismes de laboratoire. Nos premières expériences utilisaient des failles constituées de billes de verre comprimées dans une presse biaxiale. Ensuite, nous avons refait ce même type de manipulations avec des failles expérimentales constituées de deux surfaces de granit en contact.



▲ *Séismes de laboratoire : à travers une lentille polarisée, on peut visualiser l'augmentation de contrainte au fur et à mesure du glissement des plaques tectoniques analogues le long d'une ligne de faille artificielle (au centre).*

Peut-on étendre ce type de prédiction à des séismes naturels ? La difficulté : les gros séismes sont rares, et donc les données pour entraîner les modèles manquent. Toutefois, il existe des séismes dits lents qui, contrairement aux séismes classiques dont la rupture dure entre quelques secondes et quelques minutes, peuvent glisser pendant des semaines, voire des mois. Au Canada et aux États-Unis, la faille de Cascadia est sujette à de tels glissements : il s'y produit des séismes assez importants, de magnitude autour de 6 ou 6,5, tous les 14 mois environ. La région est équipée d'instruments de mesure (sismomètres) depuis les années 1990, et nous avons pu entraîner notre algorithme de prédiction avec les données d'une quinzaine de ces séismes. Là aussi, nous sommes parvenus à estimer le moment de la rupture, avant que les techniques d'analyse classiques ne la détectent (2).

Comme pour les gros séismes, plus rares, nous ne disposons pas suffisamment de données pour exercer les modèles, nous allons maintenant étudier si les modèles entraînés sur des failles expérimentales de laboratoire peuvent être transférés à des séismes naturels. ■

(1) B. Rouet-Leduc *et al.*, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9276, 2017.

(2) C. Hulbert *et al.*, *Nat Commun.*, 11, 4139, 2020.

D. R. - LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY



Claudia Hulbert
GÉOPHYSICIENNE

Elle vient de soutenir sa thèse sur l'étude des modes de glissement de failles à partir de techniques d'apprentissage automatique (ENS). Son travail se focalise sur l'identification et la détection automatique de signes avant-coureurs permettant de prédire la survenue de séismes en laboratoire, et sur l'estimation de motifs caractéristiques associés aux cycles sismiques dans la Terre et les simulations.

le déclenchement, la propagation et l'arrêt – sont contrôlées par une énergie caractéristique appelée énergie de fracture (5). Cette dernière est l'énergie nécessaire pour qu'une rupture sismique commence à se propager le long d'une interface. En mécanique de la fracture, cette énergie est imposée comme constante dans tout le processus de rupture : elle est supposée identique au cours du glissement sismique. Cette définition semble incompatible avec les récentes observations sismologiques, qui tendent à montrer qu'à l'échelle des failles naturelles, cette énergie augmente avec la taille des séismes, remettant en question son influence sur les différentes phases des séismes.

REPRODUIRE TOUJOURS MIEUX LES CONDITIONS NATURELLES

À l'aide d'expériences menées sur des matériaux plastiques, nous avons mis en évidence ce que les sismologues et les mécaniciens des roches soupçonnaient, à savoir que l'énergie de fracture varie au cours du glissement (6). Ainsi, on ne peut plus l'imposer comme une constante, comme les modèles le faisaient jusqu'alors. Il y a bien une énergie de déclenchement – qu'on appelle l'énergie de nucléation – qui, elle, est constante. Mais, dès lors que le séisme démarre, l'énergie de fracture augmente avec le glissement sismique, et cette évolution contribue à la dynamique de la rupture. La contrainte durant le glissement sismique converge lentement vers une valeur minimale, car le matériau se met à fondre en raison des frottements. Cette fusion avait déjà été observée avec des frottements entre des roches granitiques par exemple, mais dans des expériences dépourvues de rupture sismique (7). L'influence de cet affaiblissement thermique sur la dynamique du front de rupture restait donc, jusqu'à ce jour, hypothétique, et débattue au sein de la communauté. Dans quelle mesure ces expériences de laboratoire s'approchent-elles de ce que l'on rencontre dans la nature ? L'une des principales différences est que nos expérimentations sont des ruptures complètes dans un milieu fini. Or, on sait bien qu'à la surface des plaques tectoniques, les failles et le milieu ne sont pas limités (en tout cas, le milieu est très vaste). Une idée pour répondre à cette critique consisterait à étendre ces expériences sur des failles

TABLE D'EXPÉRIENCE

En cours d'installation entre l'École polytechnique fédérale de Lausanne et le laboratoire Géoazur, à Sophia-Antipolis, cette table permettra d'étudier des failles de laboratoire de 2,5 mètres de longueur. On ajoutera des plaques avec les failles, en plastique.



■ La contrainte normale exercée sur l'interface se fera à l'aide de ce réseau de vérins hydrauliques.

■ L'interface de faille sera composée d'une zone de fluage représentant la partie ductile de la croûte en profondeur (zone en rouge). La partie sismogénique comportera des aspérités de différentes tailles.

■ Des vérins hydrauliques pousseront tangentiellement la faille, jusqu'à induire le glissement saccadé de l'interface.

FRANÇOIS PASSELÈGUE

beaucoup plus grandes. Idéalement, il faudrait mettre en œuvre des expériences de laboratoire avec des failles rocheuses de l'ordre du kilomètre… ce qui est hors de portée. Toutefois, en utilisant du plastique plutôt que du granit ou du quartz, on peut bénéficier d'un facteur d'échelle qui fait qu'une faille de 2 mètres de long avec des matériaux plastiques se comporte comme une faille rocheuse de 2 kilomètres de long. Ayant proposé un projet en ce sens, nous avons obtenu en janvier 2022 un financement européen (ERC) sur cinq ans qui va permettre de monter ce type d'expériences au laboratoire Géoazur à Sophia-Antipolis (université Côte d'Azur - Observatoire de la Côte d'Azur - CNRS - IRD - Sorbonne Université). L'objectif est de tester au laboratoire quelles sont les informations requises pour prédire, d'un point de vue physique ou statistique, la sismicité le long d'une faille expérimentale, dans le temps et dans l'espace.

BIENTÔT DES EXPÉRIENCES À TAILLE RÉELLE

Plus précisément, dans un premier temps, il s'agira de vérifier que notre faille de laboratoire de 2 mètres de long se comporte bien comme une faille naturelle. Ensuite, avec nos mesures très précises issues de tous les capteurs que nous avons développés (capteurs de contraintes, capteurs acoustiques), nous tenterons de comprendre quelle fréquence d'acquisition est nécessaire, à quelle distance de la faille il faut placer des capteurs afin d'imager sur des failles de la croûte terrestre toute cette physique que l'on parvient à comprendre en laboratoire.

Le deuxième objectif est de voir si l'on peut faire mieux que les prédictions statistiques classiques. Le principe consiste à analyser la distribution de la sismicité dans le temps et l'espace sur un très grand nombre d'expériences. Ensuite, à partir d'un instantané tridimensionnel des données de sismicité, nous voulons parvenir à calculer son évolution. Autrement dit, il s'agira de calculer l'évolution de sismicité sur un cycle sismique, entre deux gros tremblements de terre. Parviendra-t-on à prédire s'il va y avoir un gros tremblement de terre et quand il va se produire, au moins sur des failles de laboratoire ? C'est bien l'espoir de ce projet. En tout cas, nous obtiendrons des réponses sur les données minimales requises pour espérer une prédiction, qu'elle soit déterministe ou statistique.

Prédire le moment et la puissance d'un séisme : l'espoir des chercheurs

Une voie de recherche complémentaire concerne les mesures directes sur le terrain. Frédéric Cappa et Louis de Barros, du laboratoire Géoazur, en collaboration avec d'autres scientifiques français et internationaux, cherchent à utiliser des failles, bien que difficiles à contrôler, existantes, équipées de capteurs. Ce sont des failles bien connues, limitées en taille, ce qui permet de s'assurer que l'on ne va pas déclencher des séismes destructeurs. Pour ce faire, on injecte du fluide dans une faille de surface, jusqu'à provoquer de petits glissements. La contrainte est relativement faible, de sorte que la propagation reste limitée. Ce genre d'expérience permettra, dans un futur proche, une fois la physique des phénomènes bien comprise à l'échelle du laboratoire, de tester nos résultats à une échelle intermédiaire, sur des failles naturelles, dans l'espoir de pouvoir, un jour, obtenir les connaissances requises pour contraindre au maximum l'aléa sismique des grandes failles sismogéniques. ■

(1) W. F. Brace et J. D. Byerlee, *Science,* 153, 990, 1966.

(2) J. Byerlee, *in Rock friction and earthquake prediction, Birkhaüser,* 615, 1978.

(3) D. Lockner, *Int. J. Rock Mech. Min.,* 30, 883, 1993.

(4) F. Passelègue *et al., Science,* 340, 1208, 2013.

(5) Lambert. B. Freund (dir.), *Dynamic fracture mechanics,* Cambridge University Press, 1998.

(6) F. Paglialunga *et al.,* arXiv : 2104. 15103, accepté dans *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2022.

(7) A. Tsutumi et T. Shimamoto, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 699, 1997.



▶ *Gaston Lagaffe, l'anti-héros de Franquin, est pris à longueur de pages par des vagues d'endormissement, dans des situations souvent incongrues (comme ici). Simple philosophie de vie ou souffrirait-il lui aussi de narcolepsie ?*

DUPUIS / DARGAUD-LOMBARD, 2022



Christelle Peyron,
NEUROSCIENTIFIQUE, LYON
Directrice de recherche au CNRS, elle codirige le laboratoire du sommeil au Centre de recherche en neurosciences de Lyon.



Silvia Melzi,
NEUROSCIENTIFIQUE, UNIVERSITÉ LYON 1
Sa thèse, dirigée par Christelle Peyron, porte sur la narcolepsie, maladie dont elle est atteinte.

La narcolepsie, trouble assommant

Somnolences inattendues en pleine journée, sommeil nocturne très perturbé, hallucinations, paralysies… tels sont les symptômes de la narcolepsie. Après des années de recherche, on sait désormais que cette pathologie handicapante est due à la destruction de neurones spécifiques dans une région à la base du cerveau, l'hypothalamus. Mais la cause de leur destruction n'est pas encore élucidée. Des travaux récents utilisant des outils de transcriptomique donnent l'espoir de lever le voile sur ce mystère afin d'aboutir à des traitements autres que symptomatiques.

« Q*ue je défaillis de pitié comme si je mourais, et je tombais comme tombe un corps mort* » sont les mots utilisés par le poète italien Dante Alighieri (1265 - 1321) dans son chef-d'œuvre *La Divine Comédie* pour décrire un état physique et émotif que certains chercheurs ont identifié comme de la cataplexie, cette perte brusque de tonus musculaire, symptôme le plus spécifique de la narcolepsie. Bien qu'il soit possible que Dante ait été atteint de narcolepsie, d'après la description des endormissements et des « évanouissements » provoqués par de fortes émotions qu'il dépeint tout au long de son œuvre, il ne pouvait pas être conscient de sa pathologie : cette maladie a en effet été décrite pour la première fois en 1877 par le neurologue allemand Carl Westphal. Le terme narcolepsie (du grec *narkê* « sommeil », et *lêpsis* « action de prendre ») a été créé peu après, en 1880, par le médecin français Jean-Baptiste Gélineau.

La narcolepsie est une maladie du sommeil. Nous avons l'habitude de « contrôler », de « gérer » notre sommeil : nous choisissons l'heure à laquelle nous nous couchons, à laquelle nous nous levons ou faisons une sieste. Ce qui n'est plus vrai quand on évoque les maladies du sommeil et plus particulièrement la narcolepsie. Ce trouble du sommeil appartient à la famille des hypersomnies (du latin *som-*

D. R. - HUGO CAYLA ET SILVIA MELZI

SYMPTÔMES

- **Somnolence diurne excessive**
- **Sommeil de nuit perturbé**
- **Hallucinations à l'endormissement**
- **Paralysie du sommeil**
- **Cataplexie (narcolepsie de type 1)**

nus « sommeil », et du grec *hyper* « au-dessus, au-delà »), terme indiquant un besoin exagéré de dormir. Son symptôme le plus connu consiste en des attaques de sommeil incontrôlables qui surviennent durant la journée. Nous avons tous ressenti des moments de fatigue durant la journée et des moments de brefs endormissements involontaires – lors d'une conférence, en regardant un film, ou pire, au volant. Mais pour les patients narcoleptiques, ces types d'endormissements sont ordinaires et pas forcément liés à des situations d'ennui, de manque de sommeil ou… de digestion. Plusieurs de ces épisodes peuvent survenir au cours d'une journée, et même en situation active, comme lors d'un repas, en faisant du vélo ou en discutant avec quelqu'un.

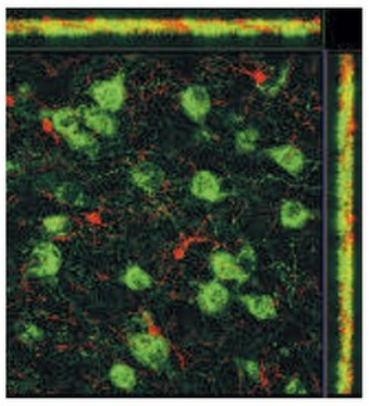
Outre l'endormissement soudain, le symptôme le plus particulier de la narcolepsie est cette absence de tonus – la cataplexie (du grec *kataplexis* « étonnement, consternation, effroi, stupeur ») – évoquée plus haut. Celle-ci est un état physique caractérisé par une perte brutale du tonus musculaire, sans perte de conscience, déclenchée par une émotion vive ou par une sensation inattendue, typiquement le rire ou une surprise positive. Une blague ou l'idée même de formuler une remarque drôle sont des facteurs qui peuvent activer une attaque de cataplexie. La crise, d'une durée de quelques secondes à quelques minutes, peut concerner les muscles du visage et du cou et éventuellement les bras (dans ce cas, le sujet ne peut plus parler ou tenir des objets) ; elle peut aussi être beaucoup plus globale et entraîner une chute. On parle alors de narcolepsie de type 1, sujet de notre article. Toutefois, certains patients n'ont pas du tout de cataplexie. On dit alors qu'ils sont atteints de narcolepsie de type 2, plus rare encore que celle de type 1 et beaucoup moins bien connue – entre autres car sa cause est inexpliquée.

Outre les crises de cataplexie, les symptômes de la narcolepsie incluent un sommeil de nuit perturbé et une forte sensation de fatigue au réveil matinal. L'hypersomnolence diurne s'accompagne en effet d'une importante fragmentation du sommeil nocturne avec de nombreux éveils qui peuvent être assez longs (une à deux heures). Ce symptôme longtemps négligé est aujourd'hui bien décrit et s'avère extrêmement fréquent. Au total, le bilan net des heures de sommeil sur une journée pour un patient narcoleptique n'excède pas celui d'un sujet sain, mais leur répartition diffère.

À ces trois symptômes principaux – la somnolence diurne excessive, la cataplexie et la fragmentation du sommeil de nuit – s'ajoutent des symptômes secondaires que sont les hallucinations qui surviennent au moment de l'endormissement (dites hypnagogiques) et la paralysie du sommeil chez 50 à 60 % des patients. Pris isolément, ils ne sont pas spécifiques de cette pathologie. On estime en fait que chaque personne, narcoleptique ou non, aurait déjà éprouvé au moins un de ces symptômes au cours de sa vie (1). Les hallucinations hypnagogiques ou hypnopompiques (au moment du réveil) consistent en des visions ou des « rêves les yeux ouverts » qui peuvent faire intervenir des sensations visuelles, auditives ou tactiles. Par exemple, les patients ont la sensation que quelqu'un est présent dans la chambre, ils les entendent ou les voient. La paralysie du sommeil est l'incapacité de se mouvoir durant quelques secondes à quelques minutes au moment du réveil, le sujet étant déjà conscient, les paupières ouvertes ou fermées. Ces deux symptômes sont souvent associés et créent des situations désagréables ou effrayantes quand le contenu des hallucinations est angoissant ou que la paralysie dure.

DES INDICES SUGGÉRANT UNE ORIGINE AUTO-IMMUNE DE LA NARCOLEPSIE

Quelle est la cause – ou quelles sont les causes – de cette maladie ? En 1998, deux équipes de neuroscientifiques, travaillant sur deux sujets différents, identifient ce qu'elles pensent d'abord être deux neurotransmetteurs différents : l'hypocrétine et l'orexine. Luis de Lecea, de l'université Stanford (États-Unis), et ses collègues mettent en évidence une nouvelle molécule localisée dans l'hypothalamus, région du cerveau connue pour être impliquée dans la régulation du sommeil. En raison de sa similarité avec l'hormone intestinale, la sécrétine, ils nomment « hypocrétine » ce nouveau neurotransmetteur (2). L'autre équipe,



▲ *Les hypocrétines/orexines (ici visualisés en vert, au microscope, dans les neurones de l'hypothalamus) sont les neurotransmetteurs, identifiés en 1998 par deux équipes distinctes, et mis en cause dans la narcolepsie.*

CENTRE DE RECHERCHE EN NEUROSCIENCES-UNIVERSITÉ LYON 1

Le bon traitement pour combattre les symptômes

Des traitements pharmacologiques de la narcolepsie existent, avec différents niveaux d'efficacité selon les symptômes : des stimulants qui agissent sur les systèmes d'éveil (comme les systèmes dopaminergiques et histaminergiques) en réduisant la somnolence diurne, d'autres molécules plus efficaces sur la cataplexie (en augmentant, par exemple, le tonus noradrénergique) et d'autres encore qui peuvent améliorer le sommeil nocturne. Comme l'étendue des différents symptômes et leur sévérité peut changer beaucoup d'une personne à l'autre, il est essentiel de suivre l'avis des médecins spécialistes afin de trouver le traitement le mieux adapté à chaque patient.
Si la thérapie pharmacologique aide à gérer les symptômes, un contrôle optimal de la maladie peut être atteint uniquement si traitements symptomatiques et thérapie comportementale sont combinés. Planifier des courtes siestes durant la journée, respecter des horaires de sommeil réguliers, avec une prise de médicaments, empêchent des attaques de sommeil inattendues. Autres facteurs de succès : la compréhension des contraintes de la maladie par son entourage et la possibilité d'organiser son propre temps de travail ou d'étude. Dans mon cas, deux courtes siestes pendant la journée, une prise d'un médicament pour bien dormir la nuit et la possibilité d'organiser mon temps de travail grâce à un entourage conscient de ma condition, me permettent de bien vivre mes journées et d'être également efficace dans mon travail. ■ S. M.

animée par Takeshi Sakurai, de l'université de Tsukuba (Japon), choisit le nom d'orexine (du grec *orexis* « appétit »), ayant constaté la capacité de la molécule à augmenter l'appétit et la prise de nourriture lors de son administration chez les rongeurs (3). Assez vite, les chercheurs prouvent qu'il s'agit en fait d'une seule et même molécule, mais les deux noms historiques ont été conservés.

Depuis cette découverte, l'orexine/hypocrétine a attiré une attention croissante dans la communauté scientifique en raison de son implication dans la régulation d'importantes fonctions physiologiques dont, au premier rang, le sommeil et l'appétit. Les découvertes se sont alors succédé : il a ainsi été montré que ce neurotransmetteur est produit par une petite population des neurones située uniquement dans l'hypothalamus, qu'il joue un rôle fondamental dans la régulation du cycle veille-sommeil en promouvant l'état d'éveil et que c'est bien lui qui est en cause dans la narcolepsie.

En effet, au début des années 2000, une équipe internationale comprenant l'une de nous (Christelle Peyron) a établi que les cerveaux de patients narcoleptiques sont dépourvus d'orexine (4). C'est donc la perte des neurones produisant l'orexine, normalement destiné à promouvoir l'état d'éveil, qui provoque l'ensemble des symptômes typiques de la maladie. La création de modèles animaux, notamment de souris « narcoleptiques », a confirmé que l'ablation du gène nécessaire à la production d'orexine ou la destruction des neurones spécifiques sont suffisantes pour causer l'apparition de symptômes très proches de ceux des patients narcoleptiques : endormissement durant la période de veille, attaques proches de celles de la cataplexie (curieusement exacerbé par l'ingestion du chocolat, la course sur la roue et les relations sociales chez les souris) et une dérégulation du cycle veille-sommeil.

Mais pourquoi les neurones à orexine sont-ils perdus chez les patients narcoleptiques ? Après une vingtaine d'années de travaux, les indices penchent pour une maladie auto-immune (5). Le système immunitaire, normalement entraîné à reconnaître des « marqueurs » des agents pathogènes (antigènes) – tels les virus et les bactéries – identifie par erreur des antigènes de notre organisme et déclenche une attaque vers l'un de nos propres organes. Dans le cas de la narcolepsie, ce sont les neurones à orexine qui seraient ainsi attaqués et détruits par

le système immunitaire. Quels sont les indices qui suggèrent une origine auto-immune de la narcolepsie ? C'est l'association entre une prédisposition génétique et un facteur environnemental déclenchant. En effet, il a été constaté que 98 % des patients narcoleptiques sont porteurs d'une mutation sur le gène HLA (HLA-DQB1*0602). Or ce gène code une structure protéique qui permet au système immunitaire de distinguer ce qui est propre ou étranger à l'organisme, ce qu'on nomme le complexe majeur d'histocompatibilité. Cette structure joue en quelque sorte le rôle de « présentoir » de corps étranger à l'organisme. À cette prédisposition génétique s'associent des facteurs extérieurs : la grippe pandémique H1N1 de l'hiver 2009 et le vaccin Pandemrix (un type spécifique du vaccin contre cette grippe des laboratoires GSKVaccines) ont respectivement augmenté l'incidence des cas de narcolepsie en Chine et en Europe du Nord entre 2009 et 2011, chez les personnes porteuses du gène HLA-DQB1*0602 (6). D'autres associations entre des prédispositions génétiques (toujours liées à des gènes du système immunitaire) et des facteurs environnementaux (comme des infections bactériennes) ont aussi été liées à la narcolepsie, mais moins fortement.

Ainsi, l'ensemble des études biologiques, cliniques et épidémiologiques suggèrent fortement l'implication du système immunitaire dans l'apparition de la maladie. Cependant, cela ne suffit pas pour valider le lien de causalité. Il reste en effet à comprendre comment le système immunitaire attaque les neurones à orexine. Quel composant ou quelle partie de ces neurones sont attaqués ? Quel type « d'arme » le système immunitaire lance-t-il contre la cible ? Pour mieux comprendre le mécanisme impliqué, notre laboratoire s'est associé avec l'équipe de Roland Liblau, de l'Institut toulousain des maladies infectieuses et inflammatoires, afin de créer un modèle animal. Il s'agit d'une lignée de souris génétiquement modifiées pour que leurs neurones à orexine produisent un antigène viral (appelé hémagglutinine, ou HA). Ces neurones présentant à leur surface cette molécule étrangère deviennent des cibles potentielles pour le système immunitaire. Nous l'avons vérifié en injectant à ces souris des lymphocytes capables de reconnaître et de tuer ces neurones. L'expérience a montré que ces lymphocytes sont capables de pénétrer dans le cerveau, de trouver les neurones à orexine dans l'hypothalamus et de les détruire (7). Il est donc plausible que ce genre de cellules soit l'arme lancée de façon erronée par le système immunitaire contre les neurones à orexine dans le contexte de la narcolepsie.

98 %

DES PATIENTS NARCOLEPTIQUES

sont porteurs d'une mutation sur le gène HLA qui code une structure protéique permettant au sytème immunitaire de jouer son rôle ou pas.

IDENTIFIER PLUS PRÉCISÉMENT LE OU LES COMMANDITAIRES DE L'ATTAQUE

Dans cette expérience, nous avons utilisé artificiellement une cible (l'antigène viral HA) pour faire réagir le système immunitaire.



Mais, en réalité, chez les personnes narcoleptiques, quelle est la molécule présente sur les neurones à orexine, reconnue et attaquée par erreur ? Serait-ce l'orexine elle-même ? Une équipe suisse (université de Suisse italienne et ETH Zurich) a récemment identifié, cette fois chez des patients narcoleptiques, la présence de lymphocytes autoréactifs à l'orexine (8). Mais il n'est pas encore établi si ces cellules sont responsables de l'attaque qui cause la mort des neurones à orexine ou si elles ont simplement pour rôle d'éliminer les débris de ces neurones endommagés d'une autre façon par le système immunitaire. Il est donc crucial d'identifier plus précisément la ou les molécules qui déclenchent la réaction des lymphocytes. Pour cela, nous nous intéressons tout particulièrement aux neurones à orexine. Ont-ils, en plus de la production d'orexine, une particularité par rapport à leurs neurones voisins qui expliquerait leur destruction ? Répondre à cette question est très complexe. L'hypothalamus est un tissu constitué de plusieurs milliers de neurones appartenant à des dizaines de populations différentes. De plus, ces populations sont très mélangées les unes aux autres, rendant difficile toute étude individuelle.

UN OUTIL RÉVOLUTIONNAIRE POUR ANALYSER LA FONCTION DES NEURONES

Heureusement, une nouvelle technologie nous aide à franchir cet obstacle : la transcriptomique sur cellules uniques. Grâce à elle, nous sommes en mesure d'analyser précisément ce que font les neurones et les protéines qu'ils produisent. Pour synthétiser des protéines, chaque neurone transcrit en effet dans son noyau l'information contenue dans ses gènes (ADN) en ARN messager. L'ARN messager sort du noyau et est ensuite traduit en protéines. Le transcriptome correspond à tous les ARN messagers présents dans une cellule en activité. Il équivaut à une sorte de livret d'instructions. Or la transcriptomique sur cellules uniques permet d'identifier les livrets d'instruction spécifiques à chaque cellule dans un échantillon en contenant une dizaine de milliers ! Grâce à cet outil révolutionnaire, nous serons à même de comparer ce que font précisément les neurones de l'hypothalamus, et identifier les protéines spécifiquement synthétisées par les neurones à orexine.

Grâce aux études dans notre laboratoire, nous avons ainsi l'espoir de découvrir la ou les protéines qui servent de cibles pour les lymphocytes, et ainsi le mécanisme qui déclenche la maladie auto-immune. C'est une étape fondamentale pour parvenir peut-être un jour à guérir les malades de cette atteinte handicapante. Les traitements actuels agissent en effet uniquement sur les symptômes en réduisant les attaques de sommeil pendant la journée, ou en améliorant la qualité du sommeil de nuit. Ils ne stoppent pas la destruction des neurones à orexine.

La narcolepsie continue donc à réduire lourdement la qualité de vie des malades et reste, hélas, encore peu connue, y compris dans le domaine médical. Cela engendre une errance constituée de longs délais diagnostiques – dix ans en moyenne ! La narcolepsie est souvent aussi confondue avec l'épilepsie, la dépression, le trouble du déficit de l'attention, la schizophrénie, etc. À cela s'ajoutent les nombreux préjugés que les malades subissent dans leur vie quotidienne. En effet, on a tendance à considérer celui ou celle qui s'endort pendant la journée comme une personne paresseuse. Même si on attend de nouvelles réponses sur l'origine de la narcolepsie de la part de la communauté scientifique, on peut toujours, en attendant, diffuser les informations, les découvertes et la compréhension sur les maladies du sommeil. Plus largement, on pourrait davantage communiquer sur l'importance du sommeil pour notre santé. Ces dispositons amélioreraient non seulement la qualité de vie des patients narcoleptiques, mais également celle de toute la population. ■

Diffuser la connaissance de la narcolepsie : un enjeu de santé publique

POUR EN SAVOIR PLUS

■ **https://pariscience.fr/symbiose-edition-2021/**
Silvia Melzi a réalisé, avec Hugo Cayla et Simon Zhou, un court-métrage pour expliquer ses travaux. Elle a été lauréate de la compétition « Symbiose » du Festival international du film scientifique Pariscience 2021.

(1) B. A. Sharpless et J. P. Barber, *Sleep Med. Rev., 15,* 311, 2011.

(2) L. De Leca *et al., PNAS, 95,* 322, 1998.

(3) T. Sakurai *et al., Cell, 92,* 573, 1998.

(4) Ch. Peyron *et al., Nat. Med., 6,* 991, 2000.

(5) C. L. A. Basseti *et al., Nat. Rev. Neurol., 15,* 519, 2019.

(6) Y. Dauvilliers *et al., Brain, 136, 2486,* 2013.

(7) R. Bernard-Valnet *et al., PNAS, 113,* 10956, 2016.

(8) Latorre *et al., Nature, 562,* 63-68, 2018.

DUPUIS / DARGAUD-LOMBARD, 2022

Édito

Formation, Recherche et Innovation ont la part belle en Provence-Alpes-Côte d'Azur

La région PACA fait partie des régions les plus dynamiques en matière de recherche et d'innovation. Elle se situe au quatrième rang national par le nombre de ses chercheurs et de ses dépenses de R&D.

Elle compte 5 131 187 habitants au 1er janvier 2022. Son PIB est de 166,4 milliards d'euros. Deux académies, Aix-Marseille et Nice, la composent. Pour l'année scolaire 2020-2021, 177 421 élèves étaient inscrits dans l'enseignement supérieur. En 2019-2020, 31 420 apprentis ont été formés. Les dépenses d'enseignement de la Région pour l'enseignement supérieur et la recherche s'élevaient à 21 millions d'euros en 2021.

Les grands organismes nationaux de recherche sont présents en PACA et y développent des programmes de recherche de haut niveau en s'appuyant sur les universités dynamiques. Les établissements d'enseignement supérieur et de recherche sont principalement regroupés autour des pôles d'Aix-Marseille et de Nice-Sophia Antipolis qui travaillent en réseau et de façon structurée et en complémentarité avec les universités d'Avignon et Toulon, elles aussi positionnées sur des projets d'excellence. Outre les nombreux PIA remportés, deux initiatives d'excellence (IDEX), pérennisées permettent à la région de s'affirmer toujours davantage en France et à l'international : A*MIDEX autour d'Aix-Marseille Université et JEDI (Joint Excellent and Dynamic Initiative)-UCA, à l'Université Côte d'Azur.

La région s'est structurée autour de quelques domaines d'activité pour lesquels elle bénéficie d'un niveau de compétitivité internationale : Aéronautique et spatial, Chimie, Microélectronique, Photonique, Optique, Imagerie,Télécommunications, Multimédia, Industrie du contenu, Énergie et fusion nucléaire, Sciences et technologies marines, Sciences du vivant, Santé, Nutrition, Biotechnologies. ■

Dossier réalisé par DUOMEDIAS.
Gilles Baron 06 82 84 11 02 – gbaron@duomedias.fr – Rédaction : Guillemette de Bayser – Maquette : Sylvie Bisson

UNIVERSITÉ DE TOULON

Mer Méditerranée et Université de Toulon : une alliance source d'excellence

L'Université de Toulon a fait de la mer le cœur de ses recherches, de ses formations et de son excellence. Preuve en est sa récente sélection parmi les cent meilleures mondiales au palmarès annuel sur la recherche océanographique de Shanghai.

Autour de cette matrice identitaire des sciences de la mer et des sociétés méditerranéennes, des disciplines variées font sa spécificité : l'aménagement du littoral, la préservation de la biodiversité, l'environnement marin, l'électronique embarquée, les données et systèmes en milieu maritime, la robotique marine et maritime intelligente, la géopolitique méditerranéenne, la défense.

L'université travaille étroitement avec son écosystème local. La Marine, la DGA, Naval Group, ECA mais aussi l'IFREMER qui accueille des étudiants et des enseignants-chercheurs ; le Parc national de Port-Cros et le Sanctuaire Pelagos ; Toulon Var Technologies / TVT Innovation, l'agence de développement économique de la Métropole TPM... Ses formations sont liées aux besoins locaux en compétences. Par exemple, en 2020, a été créé le Campus des Métiers et des Qualifications Excellence (CMQE), économie de la mer préparant les métiers de demain avec une base totem de formation située dans la rade.



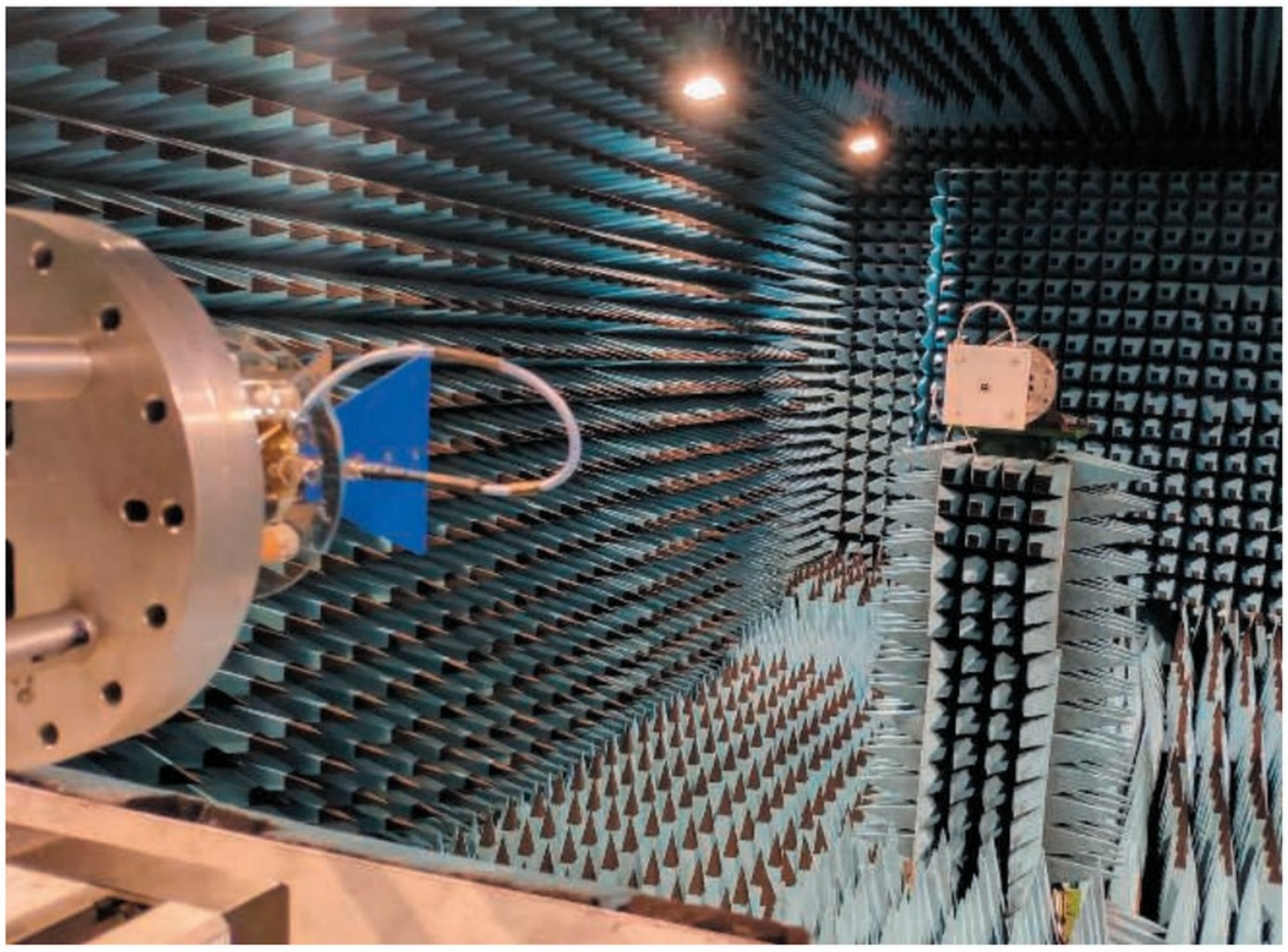
La recherche marine de l'Université de Toulon porte notamment sur les cordées de robots.

Trois centres d'excellence vont être créés : développement durable, data, sport santé jeunesse pour professionnaliser les formations par la recherche. Ils ont pour vocation d'être des lieux de rencontres entre partenaires et universitaires afin de lancer de nouveaux partenariats impliquant les étudiants, et source d'innovation. Une excellence qui s'affirmera encore si le PIA 4 est obtenu pour des projets tels qu'une université flottante en partenariat avec l'IFREMER et OceanoScientific ou la création d'une EUR Intelligent Sea. ■

UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR

Université Côte d'Azur, l'ambition d'une université intensive en recherche

En 2020, Université Côte d'Azur, établissement public, est née. Malgré la crise, elle a réussi l'exploit de se structurer afin de devenir une université du XXIe siècle de rang mondial travaillant avec et pour son territoire.



Université Côte d'Azur

La chambre anéchoïque du Centre de REcherche Mutualisé sur les ANTennes (CREMANT) d'Université Côte d'Azur/CNRS/LEAT/Orange accueille à Sophia Antipolis les expérimentations des futurs réseaux pour l'IoT.

« *En s'appuyant sur de solides expertises disciplinaires, Université Côte d'Azur vise à développer des écosystèmes d'innovation irrigués par une recherche d'excellence et à répondre dans des approches interdisciplinaires aux grands enjeux socio-économiques actuels, en lien avec les entreprises, les collectivités et les citoyens.* » Noël Dimarcq, Vice-président Recherche et Innovation. Le spectre thématique couvert est très large : risques socio-environnementaux, chimie des parfums, observation de la Terre et de l'espace, santé, industries culturelles et créatives, biologie et santé, écologie et ressources marines, cryptographie quantique, internet des objets, matériaux, etc.

L'intelligence artificielle est aussi une thématique structurante emblématique du site avec le 3IA Côte d'Azur, labellisé en 2019 comme un des quatre « Instituts Interdisciplinaires de l'IA » en France. Cet institut couvre un continuum recherche- innovation étendu, depuis les sciences fondamentales du numérique à des champs d'application comme la santé, la biologie, l'astrophysique ou les territoires intelligents, en intégrant une dimension de sciences humaines et sociales. Il accompagne les entreprises dans leur intégration des outils d'IA mais aussi les collectivités et les citoyens *via* OTESIA, un observatoire de l'impact sociétal de l'IA. Il contribue enfin au développement de formations autour de l'IA, par exemple en lien avec la santé. ■



La parole à Julian Roqui,

doctorant en électronique

Les Masters et Doctorats de l'École Universitaire de Recherche Digital Systems for Humans d'Université Côte d'Azur proposent une approche pluridisciplinaire du numérique avec des spécialités en informatique, électronique et réseaux, mais aussi en droit des nouvelles technologies et en management de l'innovation digitale. En prise directe avec la recherche, les besoins des entreprises et les évolutions sociétales, ses cursus sont personnalisables grâce à des mineures et des projets. Ils ouvrent le champ des possibles pour les étudiants, comme en témoigne Julian Roqui, doctorant en électronique :

« Mon travail de thèse consiste à estimer les limites de performances d'antennes miniatures en utilisant des algorithmes d'IA. Avec l'essor des objets connectés, c'est un sujet passionnant aux enjeux majeurs. Pourtant, quand j'ai intégré une licence en électronique en 2018, je n'envisageais pas du tout de faire de la recherche. Le déclic s'est produit en Master, lorsque j'ai eu l'opportunité de travailler en immersion dans une équipe de chercheurs du Laboratoire d'Électronique, Antennes et Télécommunications (LEAT).

Cette expérience de tutorat en laboratoire a été un tremplin et s'est transformée en une véritable collaboration professionnelle. J'ai pu présenter mes résultats de recherche dans une conférence d'envergure mondiale dans le domaine des antennes, le IEEE APS de Montréal, en juillet 2020. Cela a été un atout considérable au moment de candidater en thèse ! Avec les cours de mineures, en Machine Learning par exemple, l'École m'a aussi permis d'élargir ma vision de mon domaine et d'envisager de nouvelles collaborations de recherche au-delà de ma discipline première. »



Entretien avec **Patrice Simon**

PROFESSEUR EN SCIENCES DES MATÉRIAUX À L'UNIVERSITÉ TOULOUSE III-PAUL SABATIER

“LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE EST UN VRAI DÉFI INDUSTRIEL”

Parler avec Patrice Simon, c'est faire le grand écart entre la recherche fondamentale et les enjeux de société. Ce spécialiste du stockage électrochimique de l'énergie s'est attelé à comprendre et à caractériser le fonctionnement des batteries et des supercondensateurs pour optimiser leurs performances. Tout en renforçant les relations avec les industriels alors que la mobilité électrique s'affirme comme un enjeu stratégique.

La Recherche Votre carrière scientifique a débuté au début des années 1990. À quoi ressemblait le paysage de la recherche sur le stockage d'énergie à cette époque-là ?

Patrice Simon J'ai commencé ma thèse, dont le sujet était « Améliorer les performances des accumulateurs au plomb pour des objectifs de traction électrique », en novembre 1992. Cela coïncide avec une résurgence de l'intérêt pour les véhicules électriques, en France mais aussi aux États-Unis. Ainsi, en Californie, un plan adopté par l'Agence pour la qualité de l'air de l'État (« *California Air Resources Board* ») encourageait le développement de véhicules n'émettant aucun polluant. Le but : atteindre les 10 % au début des années 2000. À l'époque, seuls les véhicules électriques pouvaient prétendre entrer dans cette catégorie. La seule technologie commercialisée étaient les batteries plomb-acide. On travaillait donc sur l'optimisation des électrodes positives du plomb – les fameuses batteries lithium-ion (Li-ion), elles, n'en étaient qu'à leurs débuts. On parlait très peu de réchauffement climatique, de

ARNO BRIGNON / SIGNATURES

BIO

- **1992-1995** Thèse à l'École nationale supérieure de chimie de Toulouse.
- **1996-2001** Maître de conférences pour la chaire d'électrochimie industrielle du Conservatoire national des arts et métiers, à Paris.
- **Depuis 2001** Maître de conférences puis professeur (à partir de 2007) à l'université Toulouse III – Paul Sabatier ; chercheur au Centre inter-universitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux.
- **2008-2018** Directeur de l'Institut de recherche européen Alistore-CNRS sur les batteries.
- **Depuis 2011** Directeur adjoint du Réseau sur le stockage électrochimique de l'énergie
- **2015** Médaille d'argent du CNRS
- **2018** Élection à l'Académie des Technologies
- **2019** Élection à l'Académie des sciences dans la section de chimie.

réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais le sujet du stockage électrochimique de l'énergie me plaisait bien parce que cela donnait la possibilité de faire de la recherche fondamentale sur une thématique appliquée, au cœur d'enjeux sociétaux importants.

Après votre thèse, vous avez intégré, en 1996, la chaire d'électrochimie industrielle du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam) à Paris. Toujours en travaillant sur le stockage électrochimique de l'énergie, avec un focus sur les supercondensateurs. Quelle différence avec les batteries ?

Une explication à gros traits consiste à dire que le stockage électrochimique de l'énergie comprend deux types de systèmes selon que l'on privilégie la quantité d'énergie stockée ou le débit. Les batteries font partie de la première catégorie : elles permettent de délivrer des densités d'énergie relativement élevées mais sur des temps longs. Les supercondensateurs, eux, peuvent délivrer des pics d'énergie sur des temps relativement courts, de l'ordre de quelques secondes, mais ont des capacités de stockage moindres : on parle de systèmes de puissance. Pour faire l'analogie avec le véhicule électrique, la batterie, c'est l'autonomie, et le supercondensateur, c'est l'accélération. C'est pourquoi on retrouve les supercondensateurs dans les applications de mobilité (*stop and start,* récupération d'énergie de freinage dans les tramways et les bus hybrides), de réseau électrique (régulation de fréquence), dans la production des énergies renouvelables (orientation des têtes d'éoliennes), dans l'électronique de puissance, dans l'outillage portatif (recharge rapide).

À quoi est due la différence, en termes de performances, entre une batterie et un supercondensateur ?

Les deux systèmes fonctionnent selon le même principe : le transfert et le stockage des ions (particules chargées électriquement, les cations positivement, les anions négativement). L'architecture de base, elle aussi, est la même. Un système de stockage électrochimique de l'énergie, quel qu'il soit, possède une électrode positive et une électrode négative. Entre ces électrodes, on trouve un séparateur isolant électronique imprégné d'électrolyte, en général liquide, qui permet le passage des ions entre les électrodes. La différence se situe dans la manière de stocker l'énergie. Les électrodes des batteries sont constituées de collecteurs de courant en feuilles métalliques (cuivre ou aluminium dans le cas des batteries Li-ion) recouvertes d'un film qui contient de la poudre de matériau actif et un liant. Le stockage se fait grâce à des réactions chimiques, dites d'oxydo-réduction (ou « redox »), au niveau des électrodes : lors de la charge, une réaction d'oxydation se produit à l'électrode positive et le matériau actif de celle-ci libère des électrons transférés à l'électrode négative via le circuit électrique extérieur. Ils sont alors consommés à cette électrode négative par une réaction de réduction du matériau actif. Les réactions redox inverses se passent aux deux électrodes lors de la décharge : l'électrode négative libère les électrons, qui sont alors consommés dans le matériau actif de l'électrode positive en traversant l'équipement à alimenter. Ce principe de fonctionnement permet de stocker une quantité importante d'énergie, environ 250 wattheures par kilogramme (Wh/kg) pour les cellules de batteries Li-ion (*). L'inconvénient est que ces réactions redox se déroulent avec une vitesse relativement lente, puisqu'il faut former ou casser des liaisons chimiques dans le volume des matériaux. Le défi des batteries est donc d'augmenter leur puissance, c'est-à-dire la vitesse de ces réactions redox.

Et quel est le principe de stockage dans un supercondensateur ?

À la différence des batteries, il n'y a aucune réaction électrochimique dans les électrodes de supercondensateurs : ils stockent les charges par attraction électrostatique. Dans les supercondensateurs classiques, les électrodes sont constituées de poudre de carbone ayant subi un traitement d'oxydation. Cette oxydation provoque la formation de trous – des pores – dans le volume des grains. Ces pores entraînent une augmentation spectaculaire de la surface (interne) du carbone, qui peut atteindre 2 000 mètres carrés – l'équivalent de trois courts de tennis – par gramme de carbone. Lors de la charge, des électrons sont injectés dans le carbone de l'électrode négative, et des charges positives (des trous) dans l'électrode positive. Il règne alors dans le supercondensateur un champ électrique ; celui-ci entraîne le

(*) **Une batterie** est une association en série ou en parallèle de plusieurs cellules.

“ Les batteries délivrent des densités d’énergie relativement élevées sur des temps longs, et les supercondensateurs des pics d’intensité sur des temps courts ”

déplacement des ions de l’électrolyte, qui vont alors s’adsorber à la surface des électrodes de carbone par attraction électrostatique : les cations à l’électrode négative et les anions à l’électrode positive. Ce mode de stockage de charge en surface – sans aucune réaction chimique donc – rend l’opération de charge ou de décharge quasi immédiate car les charges sont disponibles facilement. En revanche, le nombre de charges que l’on peut stocker grâce à la surface étant limité, l’énergie est également moindre. Le défi dans le domaine des supercondensateurs est donc d’augmenter la densité d’énergie. Et l’on constate, au travers de ces concepts, qu’il y a en fait une convergence naturelle dans la recherche sur les deux types de système, batterie et supercondensateur, étant donné que l’on cherche à concilier l’avantage de l’un (forte densité d’énergie) avec l’avantage de l’autre (forte puissance).

Au sein de votre laboratoire à Toulouse, où vous êtes arrivé en 2001, vous avez beaucoup travaillé à l’amélioration des supercondensateurs à base de carbone, jusqu’à trouver des effets très importants pour augmenter la densité d’énergie. Racontez-nous.

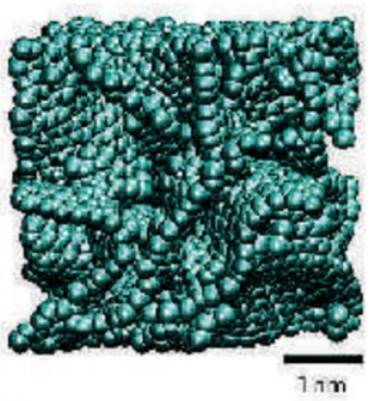
Les carbones poreux que l’on utilise classiquement pour les supercondensateurs ont des trous dont la taille est de l’ordre du nanomètre. Pour fabriquer ces pores, la technique la plus répandue est de prendre des grains de carbone d’une dizaine de micromètres de diamètre et de les porter à 800 °C sous vapeur d’eau. Cela va permettre d’oxyder le carbone petit à petit, et d’y créer des trous nanométriques. Le problème, c’est que cette technique ne permet pas de bien contrôler la répartition de taille des pores : certains trous mesureront 1 nanomètre, d’autres 2, d’autres 3, etc. Or, sans contrôle fin de la structure du volume poreux et de la taille des pores, il est impossible d’étudier l’importance de ce paramètre sur les capacités de charges stockées. Avec Yury Gogotsi, un collègue de l’université Drexel, à Philadelphie (États-Unis), nous nous sommes donc mis en quête de pouvoir contrôler la taille de cette porosité. Et pas à n’importe quelle échelle. Nous souhaitions obtenir des pores avec une taille contrôlée extrêmement petite, entre 0, 5 et 1 nanomètre, ce qui n’est pas si facile.

Comment avez-vous procédé ?

Nous avons pris des carbures métalliques, tel le carbure de titane (TiC). Quand on fait chauffer ce matériau à 500 °C, sous une atmosphère de chlore par exemple, le titane s’oxyde. Ne reste alors que du carbone, avec des lacunes – des vides – à la place des atomes de titane. En fonction de la température de synthèse sélectionnée, nous avons remarqué qu’il était possible de rassembler ces lacunes, qui forment alors des trous de tailles plus importantes ; ainsi, nous avons réussi à faire une série de plaques de carbone avec des tailles de pores bien précises, entre 0,6 et 1,5 nanomètre. Et grâce à cela, pour la première fois, nous avons pu mesurer l’influence de la taille des pores sur la quantité de charges que l’on peut stocker. Avec, à la clé, une surprise.

Laquelle ?

Tout le monde pensait que, pour stocker le maximum de charges dans les carbones poreux, il fallait que les pores aient une taille de quelques nanomètres, comprise entre 2 et 5 nanomètres environ, en tout cas une dimension supérieure à celle des ions à stocker – sachant que, dans un



▲ *Les structures de carbone (ici avec des pores désordonnés) peuvent être controlées à l’échelle du nanomètre.*

P. SIMON, B. ROTENBERG, M. SALANNE

électrolyte, un ion est entouré de molécules de solvant et que l'ensemble mesure de 1 à 2 nanomètres de diamètre. Nous avons montré en 2006 que, quand les pores mesurent moins de 1 nanomètre, qu'ils ont donc une taille inférieure à celle des ions solvatés à stocker, non seulement ces derniers entrent dans les pores mais, en plus, la capacité de stockage est doublée. Pourquoi ? Parce que, schématiquement, l'ion, en entrant dans le pore, perd une partie des molécules qui l'entourent – il se désolvate partiellement –, ce qui réduit la distance d'approche entre l'ion et le carbone et permet donc d'en stocker plus sur une même surface (1). Ces travaux ont eu un impact conséquent sur les plans scientifique et industriel. Aujourd'hui, les fabricants de supercondensateurs ont adopté ces carbones dont les pores mesurent moins de 1 nanomètre pour réaliser les électrodes. Par ailleurs, cette découverte a permis, en une quinzaine d'années, de doubler la densité d'énergie de ces systèmes de stockage, de 4 Wh/kg en 2008 à 10 Wh/kg actuellement. Mais nous espérons aller encore plus loin…

De quelle manière ?

Dernièrement, nous nous sommes intéressés à la façon dont sont structurés les carbones nanoporeux. En fait, ils ont plein de défauts et sont désordonnés. Or, nos résultats récents montrent que l'ordre local de la structure du carbone influe lui aussi sur la capacité de stockage des charges, en créant des interactions fortes entre le carbone et les ions de l'électrolyte. Cela permet de désolvater encore plus les ions confinés dans les pores et d'augmenter encore la densité d'énergie stockée (2).

Vous cherchez aussi à remplacer les carbones nanoporeux par d'autres matériaux. Quelles caractéristiques visez-vous ?

L'idée est de les remplacer par des matériaux « redox de puissance ». Concrètement, cela signifie que l'on cherche à mettre au point des matériaux qui utilisent des réactions redox pour stocker les charges – comme dans les batteries –, tout en faisant en sorte que la charge et la décharge se produisent aussi rapidement que dans un supercondensateur. Parmi les matériaux intéressants en ce moment, on retrouve les carbures métalliques bidimensionnels de type MXene. Cet acronyme désigne une famille de matériaux, très conducteurs, qui ont été découverts un peu par hasard, en 2011, par Yury Gogotsi et Michel Barsoum, lui aussi à l'université Drexel (3). Après synthèse, ils se présentent sous la forme d'empilements en accordéon de plusieurs centaines, voire milliers, de feuillets de carbure métallique exfoliés, le plus connu étant le carbure de titane Ti_3C_2. Avec sa conductivité électronique élevée, cette structure 2D constitue un grand avantage : elle offre une surface active importante, où l'électrolyte peut s'infiltrer facilement et où les réactions redox ne sont pas limitées par la diffusion ; il est donc possible d'y stocker beaucoup de charges, et d'accéder à cette énergie rapidement. Ce qui est idéal dans notre objectif d'arriver, un jour, au système de stockage ultime combinant ces deux critères.

J'imagine qu'il reste un certain nombre de problématiques à résoudre avant d'envisager l'utilisation commerciale de cette famille de matériaux, non ?

Évidemment. Les recherches visent en particulier à bien contrôler les impuretés issues de la préparation de ces matériaux MXenes, car elles ont une influence fondamentale sur leurs propriétés, notamment électrochimiques. À l'heure actuelle, la méthode de préparation la plus uti-

“ Il faut commencer à s'interroger sur notre dépendance au nickel, qui pourra lui aussi devenir un métal critique ”

Les Hauts-de-France, haut lieu français des gigafactories

Ce n'est pas une, ni deux, mais trois gigafactories qui vont ouvrir, dans les prochaines années, dans les Hauts-de-France. Début février 2022, en déplacement dans la région, le président de la République Emmanuel Macron a ainsi confirmé le projet de construction, à Dunkerque, d'une usine géante de fabrication de batteries mené par la jeune pousse grenobloise Verkor. L'usine devrait être terminée en 2024, et le premier véhicule équipé par une batterie de la start-up devrait, lui, sortir des lignes



▲ *Projet de l'usine ACC sur les communes de Douvrin et Billy-Berclau.*

de production en 2025. L'objectif est d'atteindre, dans un premier temps, une capacité de 16 gigawatts-heure par an (GWh/an) de production de batteries, ce qui permettrait d'équiper jusqu'à 300 000 véhicules électriques. À terme, l'ambition est d'atteindre 50 GWh/an (environ 900 000 véhicules). Les deux autres projets de gigafactories, eux, sont plus avancés. La construction de l'usine d'ACC – une co-entreprise de Total Saft, Mercedes-Benz et Stellantis, qui a bénéficié d'un fort soutien de l'UE – a commencé en début d'année sur les communes de Douvrin et Billy-Berclau. Le démarrage de la production est programmé pour le second semestre de l'année 2023. La capacité de l'usine sera alors de 8 GWh/an de production de batteries (soit potentiellement 150 000 voitures électriques), avec l'objectif d'ici 2030 de 24 GWh/an (450 000 véhicules). Troisième et dernier projet de gigafactory prévu dans la région, celui porté par l'entreprise chinoise Envision, à Douai, et destiné à équiper les voitures du constructeur automobile Renault. La capacité de production sera, dans un premier temps, de 9 GWh/an ; en fonction des commandes, elle pourra être augmentée jusqu'à 24 GWh/an. ■ V. G.

lisée pour cette famille de matériaux fait appel à des solutions aqueuses contenant du fluor. Or le fluor entraîne la dégradation des propriétés des MXenes lorsqu'on essaie, par exemple, de les utiliser comme électrode négative dans une cellule Li-ion. Au sein de notre laboratoire, nous avons ainsi mis au point, l'année dernière, un matériau MXene Ti_3C_2 que l'on prépare dans des sels fondus (un mélange de chlorure de sodium et de chlorure de potassium). Les résultats sont encourageants : ce matériau possède une capacité d'environ la moitié d'une électrode de batterie Li-ion, mais peut se recharger en seulement 30 secondes environ (4). Pour résumer, je ne dis pas que les MXenes sont le futur de la batterie Li-ion, mais ils sont au moins très intéressants du point de vue fondamental, en tant que matériaux modèles, afin de comprendre les mécanismes de stockage des charges et pour trouver des pistes d'amélioration des batteries et des supercondensateurs.

En septembre 2020, la Commission européenne a ajouté le lithium à sa liste des matières premières critiques (*), en raison des défis grandissant liés à son approvisionnement. Comment intégrez-vous ce paramètre dans vos recherches ?

La criticité des matériaux est un aspect pris en compte. Au-delà du lithium, d'autres matériaux sont concernés. C'est d'ailleurs l'un des aspects qui rend le sujet si intéressant. Aujourd'hui, les batteries Li-ion utilisent des électrodes négatives à base de graphite, et des électrodes positives à base d'oxyde de nickel dans laquelle les ions Li^+ viennent s'intercaler/se dé-intercaler. Depuis plusieurs années, on a commencé à substituer le nickel au cobalt. C'est une bonne chose parce que le coût, la disponibilité et les conditions d'extraction du cobalt posent question. Les électrodes positives de batteries utilisent ainsi des oxydes à plus de 80 % de nickel. Toutefois, il faut aussi commencer à s'interroger sur notre dépendance au nickel, dont on se rend compte qu'il pourra devenir, lui aussi, un métal critique dans les prochaines années, compte tenu de la demande en batteries. Le recyclage

(*) Les matières premières critiques sont celles qui présentent un risque fort de pénurie et qui jouent un rôle économique important.

ACC



“La technologie Li-ion a atteint un tel degré de maturité qu’elle reste incontournable ”

aura bien sûr un rôle majeur à jouer, mais il faut se préparer à différents scénarios. C’est un sujet extrêmement compliqué !

N’y a-t-il pas des recherches sur des systèmes sans matériaux critiques ?

Si. Il y a les batteries Li-ion qui utilisent des chimies sans nickel à l’électrode positive, comme le phosphate de fer $LiFePO_4$; on parle alors de batteries lithium-fer-phosphate. Ces batteries sont moins performantes que les modèles au plomb ou au lithium (environ 25 % de densité d’énergie en moins), mais elles présentent des avantages en termes de puissance, de stabilité thermique (sécurité) et de coût. Les batteries sodium-ion (Na-ion), qui utilisent le sodium à la place du lithium, sont également très intéressantes pour ces aspects de matériaux critiques. Elles offrent une vitesse de recharge rapide (10 minutes environ pour la recharge complète) mais ont une densité d’énergie environ 40 % inférieure à celle des batteries Li-ion classiques. Vous voyez donc que, à l’heure actuelle, aucune chimie ne permet de satisfaire tous les besoins en termes de coût, de criticité/disponibilité des matériaux, de recyclage, de densité d’énergie, de sécurité, etc. À l’avenir, les technologies dont je viens de vous parler auront leur place mais, pour les applications de mobilité, le critère de la densité d’énergie en wattheures par kilogramme ou par litre reste important. De plus, on est obligé de constater que la technologie Li-ion a atteint un tel degré de maturité technique (performance) et technologique (coût de production) qu’elle reste incontournable.

Vous êtes aujourd’hui directeur adjoint du Réseau sur le stockage électrochimique de l’énergie (RS2E). Quelle est la mission de ce groupement ?

Le RS2E est une fédération de recherche CNRS qui regroupe, au niveau français, trois types d’acteurs travaillant sur les batteries et les supercondensateurs. Tout d’abord, il y a 17 laboratoires de recherche répartis sur tout le territoire national, soit environ 80 % des laboratoires français du domaine. Il y a ensuite les établissements publics à caractère industriel et commercial (Epic) avec le Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), l’Institut national de l’environnement industriel et des risques (Ineris) ou encore l’IFP Energies nouvelles. Enfin, troisième type d’acteurs : les industriels, qui sont au nombre de seize (Total-SAFT, EDF, Arkema, Solvay, Renault, Umicore, Safran…). Quand le RS2E a été créé en 2011 sous l’impulsion de Jean-Marie Tarascon, professeur au Collège de France titulaire de la chaire « Chimie du solide et énergie », l’idée était de mettre en commun les moyens de ces acteurs et de créer un cercle vertueux : production de l’innovation dans les laboratoires, puis transfert vers l’industrie via les Epic.

Quel bilan tirez-vous de l’action du RS2E ?

Le RS2E a permis de fédérer la communauté scientifique autour de la problématique du

ARNO BRIGNON / SIGNATURES

stockage de l'énergie, et de créer des liens avec les industriels. Un exemple de réussite est la jeune pousse Tiamat Energy, créée en 2017, en Picardie, à Amiens, spécialisée dans la fabrication de batteries sodium-ion. Le concept de ces batteries est issu de recherches développées et brevetées dans le cadre du RS2E. Le prototype a été mis au point et produit avec le CEA. En 2020, la start-up a effectué sa deuxième levée de fonds *[5 millions d'euros, NDLR]*, ce qui permettra de faire des preuves de concept (batteries composées de plusieurs cellules mises en série/parallèle) en collaboration avec des entreprises de l'automobile, de l'aéronautique, etc., afin de démontrer la viabilité et l'efficacité de cette technologie et d'accélérer son industrialisation. Le RS2E a aussi construit un certain nombre d'actions de recherche communes et de sujets d'intérêt pour les industriels. Quelques exemples : la synthèse de matériaux d'électrodes avec Solvay et Umicore ; les questions de dimensionnement pour le stockage des énergies renouvelables avec EDF ; la réalisation de prototypes de batteries de puissance pour Safran ou encore les anodes à base de silicium avec Nanomaker, entreprise spécialisée dans les matériaux, etc. Un des objectifs des prochaines années est d'essayer de renforcer ces liens avec les industriels.

Comment comptez-vous vous y prendre pour renforcer ces liens ?

Nous comptons notamment mettre à profit le Programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) dédié par l'État aux batteries, qui appartient à une stratégie nationale plus large. Le CNRS et le CEA sont les pilotes de ce PEPR, financé à hauteur de 40 millions d'euros, qui vise à développer des travaux de recherche. J'ai été chargé de porter le sujet pour le CNRS, avec Hélène Burlet, directrice adjointe des programmes énergie, pour le CEA. Nous sommes aussi aidés par Mathieu Morcrette (CNRS). Ensemble, nous avons défini un certain nombre de projets à développer dans le cadre de ce PEPR, dans lequel on retrouve les acteurs académiques du RS2E, par exemple les batteries tout solide ou le développement de l'intelligence artificielle dans les batteries. Nous proposerons aussi des appels à projets sur des sujets essentiels comme les nouvelles chimies de batteries ou le diagnostic en fonctionnement, ouverts à tous les laboratoires du territoire national. Ce programme est en cours d'évaluation, et nous espérons le résultat au printemps 2022 ; en cas de succès, il devrait démarrer durant l'été. Le réseau RS2E et le PEPR sont deux outils sur lesquels nous nous appuierons pour définir une feuille de route commune avec les industriels de la batterie, afin d'accélérer le développement des technologies et des chimies de batteries d'aujourd'hui et préparer celles de demain.

De quelle manière la stratégie française sur les batteries s'articule-t-elle avec la stratégie européenne ?

Elle vient la renforcer. L'Europe, il y a plusieurs années déjà, avait anticipé la montée en puissance de la mobilité électrique. Différentes actions ont ainsi été élaborées afin d'assurer la chaîne d'approvisionnement des batteries, ainsi qu'une indépendance et une autonomie énergétique vis-à-vis des batteries. Comment cela s'est-il matérialisé ? Entre autres grâce au développement de gigafactories, c'est-à-dire d'usines géantes de fabrication de batteries pour véhicules électriques. Trois projets de ce type sont pour le moment prévus en France (lire encadré page 113), et une trentaine au total dans toute l'Europe (en Allemagne, en Pologne, en Suède, en Italie, en Norvège, au Danemark…), dont une vingtaine ont déjà réuni tout ou partie de leur financement. Au-delà, l'Europe a engagé un certain nombre d'actions sur l'accès à la ressource minière, le transport, le recyclage, etc. Tous ces éléments sont positifs, même si l'Asie (Japon, Corée, Chine) a pris une telle avance sur la production de technologies lithium-ion classiques qu'il sera difficile d'être compétitifs sur ce type de batteries en termes de coûts, à même niveau de performance. La stratégie est donc plutôt que les gigafactories européennes s'engagent dans la production industrielle de technologies de batteries de nouvelle génération – dites de génération 4 – utilisant des électrolytes solides et du lithium métallique à l'électrode négative, que la concurrence asiatique ne maîtrise pas non plus, afin de partir sur un pied d'égalité. On a, par exemple, décidé de le faire dans les usines du fabricant européen ACC. La stratégie est validée ; la feuille de route est tracée : tout reste à faire ! ■

Propos recueillis par Vincent Glavieux

POUR EN SAVOIR PLUS

■ **Sylvain Guilbaud,** entretien avec Jean-Marie Tarascon : « Les batteries sont le cœur d'un monde connecté », *La Recherche, 536,* juin 2018, p. 4.

■ **Mathieu Salanne, Benjamin Rotenberg et Patrice Simon,** « Plus d'électricité dans le carbone », *La Recherche, 491, septembre 2014,* p. 52.

(1) J. Chmiola *et al., Science, 313,* 1760, 2006.

(2) Y.-C. Wu *et al., Angew. Chem. Int. Edit., 60,* 13317, 2021.

(3) M. Naguib *et al., Adv Mater., 23,* 4248, 2011.

(4) L. Liu *et al., ACS Nano, 16,* 111, 2022.

Soixante ans d'exploration du Système solaire

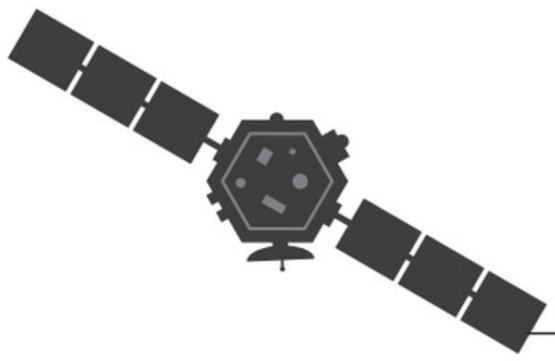
Usages
- Télécommunications
- Observation de la Terre
- Navigation/positionnement
- Développement technologique
- Sciences spatiales
- Autre

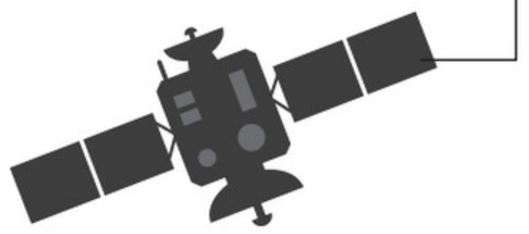
Depuis le petit Spoutnik soviétique en 1957, des milliers d'engins ont été arrachés à l'attraction terrestre. Des satellites militaires, de communication, d'observation de la Terre, mais aussi des sondes d'exploration – Soleil, planètes, astéroïdes, comètes –, et même des rovers sur la Lune et sur Mars. Sans oublier la multitude de télescopes spatiaux qui scrutent le cosmos. Avec les nouvelles constellations de satellites de télécommunication, le nombre de ces objets explose, ce qui engendre de sérieux problèmes de débris spatiaux et de pollution lumineuse. Textes : Philippe Pajot et Léna Hespel - Infographies : Bruno Bourgeois

574

59







POINTS DE LAGRANGE (L)

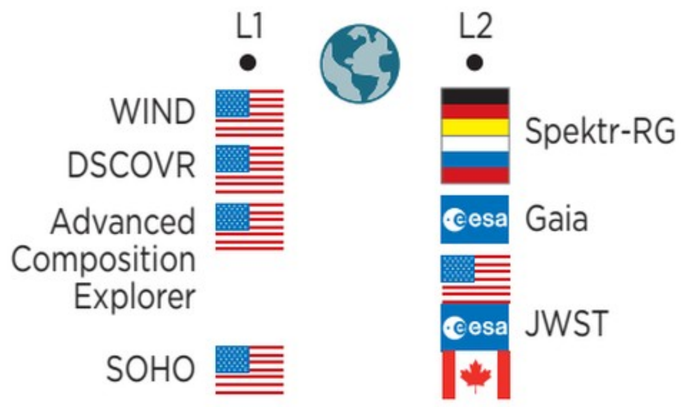
Pour abriter les engins des influences terrestres, on les place autour d'un point de Lagrange, à 1,5 million de kilomètres de la Terre et sur l'axe Terre-Soleil. Côté Soleil, le point L1 est occupé par des instruments d'observation de notre étoile (comme SOHO). À l'opposé, le point L2 accueille des observatoires astronomiques spatiaux, tel Gaia, et le nouveau télescope JWST, bien à l'abri de la lumière du Soleil.

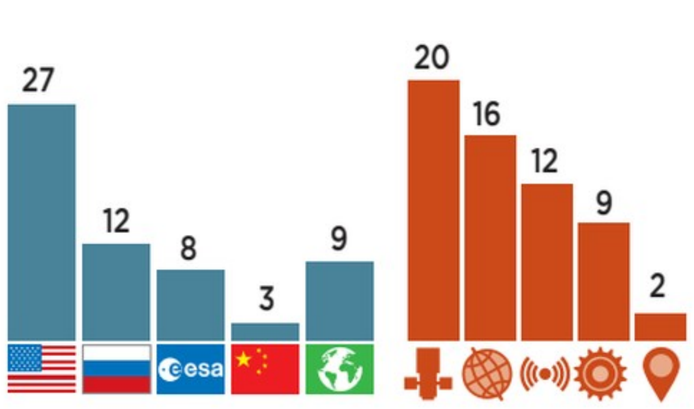
ORBITES ELLIPTIQUES

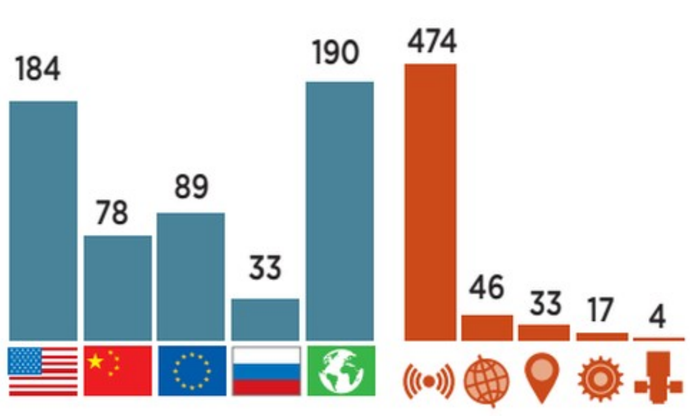
Ces orbites ont la particularité d'être très allongées. On y trouve un petit groupe de satellites dont, en grande partie, des satellites militaires de surveillance, des satellites mixtes (télécommunications et militaire) ou des engins pour des sciences spatiales. Certains « frôlent » la surface terrestre à 200 kilomètres puis s'en éloignent à 35 000 kilomètres, voire 100 000 kilomètres.

GEO : ORBITE GÉOSTATIONNAIRE

C'est le royaume des satellites de télécommunications. Placés sur des orbites circulaires à 35 786 kilomètres d'altitude, ils tournent de manière synchrone avec la Terre (en 23 h 56 min 4 s) et dans son plan équatorial. Le premier a été lancé en 1963. On y trouve aussi des satellites météorologiques, qui surveillent ainsi une grande portion de l'atmosphère terrestre, et quelques satellites de navigation.







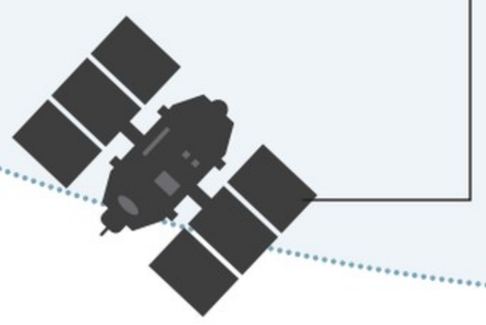


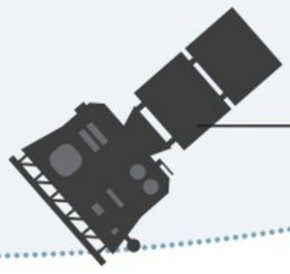
4078

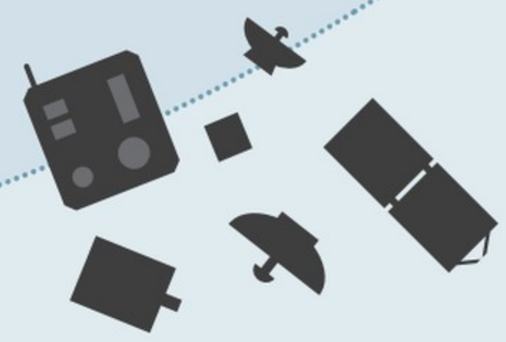
141

Utilisateurs

- Militaire
- Gouvernement
- Commercial
- Civil







MEO : ORBITE TERRESTRE MOYENNE

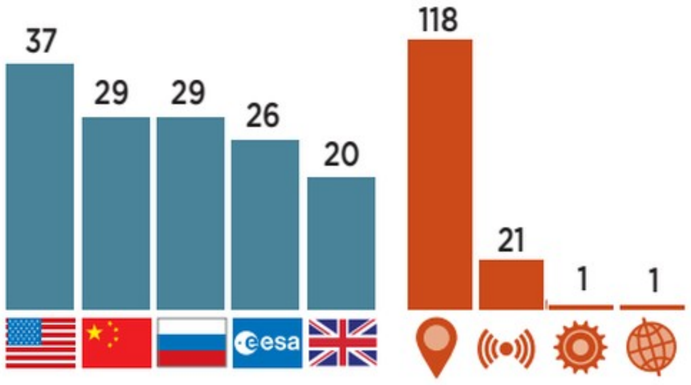
Couvrant une grande variété d'orbites entre LEO et GEO, elle est occupée en majorité par des constellations de positionnement (GPS, Galileo, Glonass). Le segment du GPS comprend ainsi une trentaine de satellites sur des orbites circulaires à 20 200 km d'altitude. Les 26 satellites actifs Galileo de l'Agence spatiale européenne (ESA) montent à 23 222 km. Leur plan est équatorial ou incliné (mais non polaire).

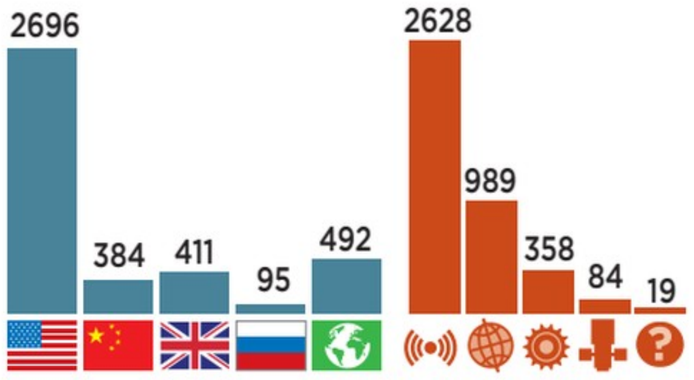
LEO : ORBITE TERRESTRE BASSE

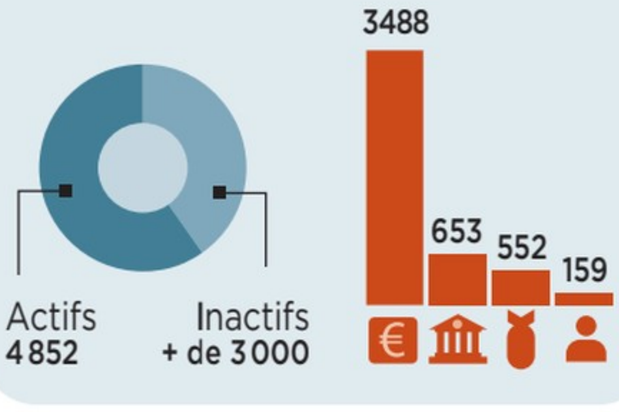
C'est l'orbite de la Station spatiale internationale, des télescopes spatiaux, tel Hubble, mais aussi des satellites d'imagerie (civile et militaire), de météorologie, de télécommunications (constellations Iridium ou Starlink), etc. Selon l'altitude, entre 160 et 1 000 kilomètres, la révolution des engins dure entre une et quelques heures. Certaines orbites passent au-dessus des pôles et ont leur plan aligné avec le Soleil.

L'ENFER DES DÉBRIS

Une grand partie des engins aujourd'hui dans l'espace ne sont plus opérationnels ! Avec les nouvelles constellations de télécommunications, des centaines de satellites sont mis en orbite chaque année (en 2020, sur les 1184 envoyés, 800 sont des Starlink). Devenus inactifs, les géostationnaires sont placés sur des orbites cimetière. Sur les orbites plus basses, les satellites sont « désorbités » et brûlent dans l'atmosphère.





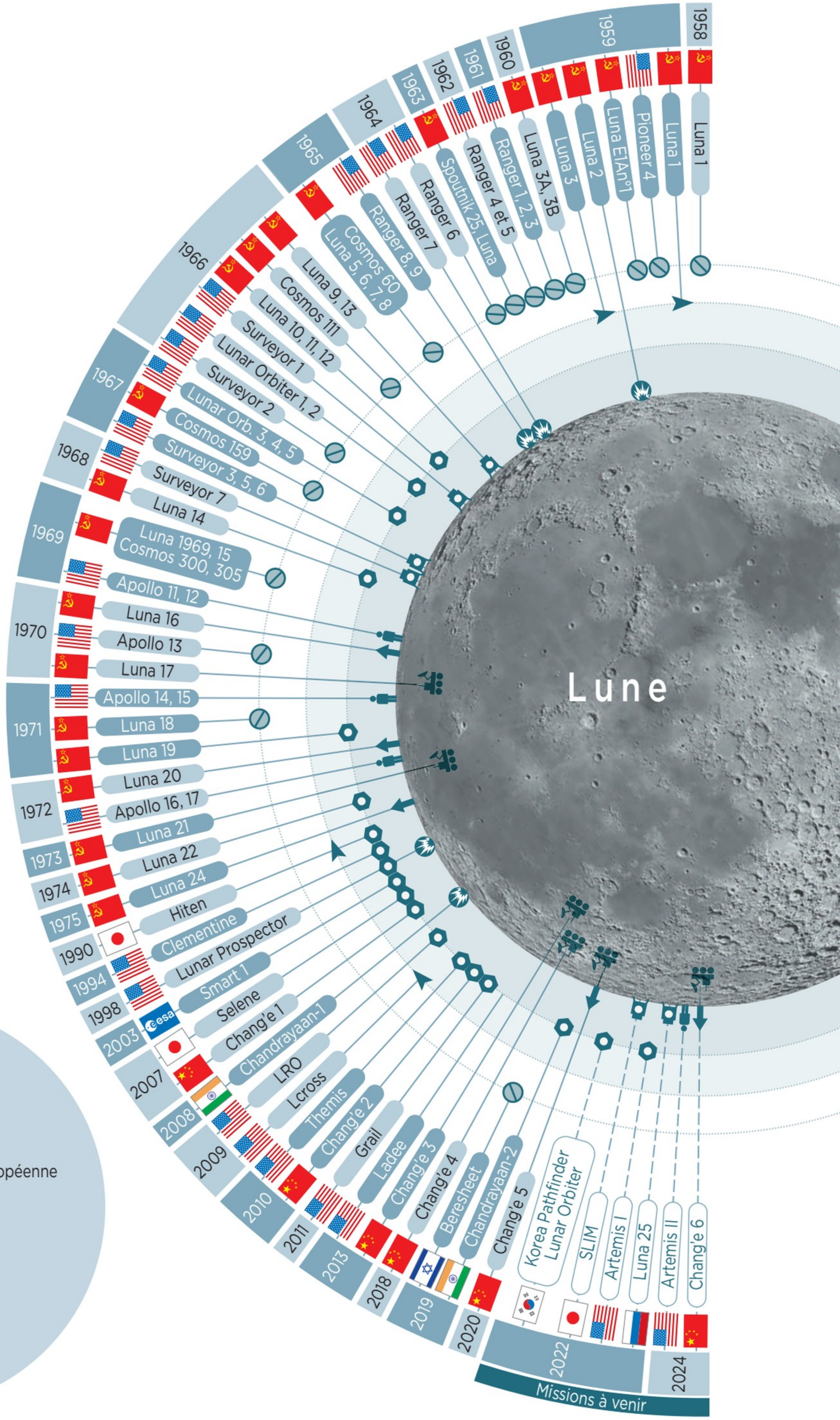


États-Unis · Russie · ESA · Chine · Royaume-Uni · Multinational et autres pays

SOURCE : UCS SATELLITE DATABASE

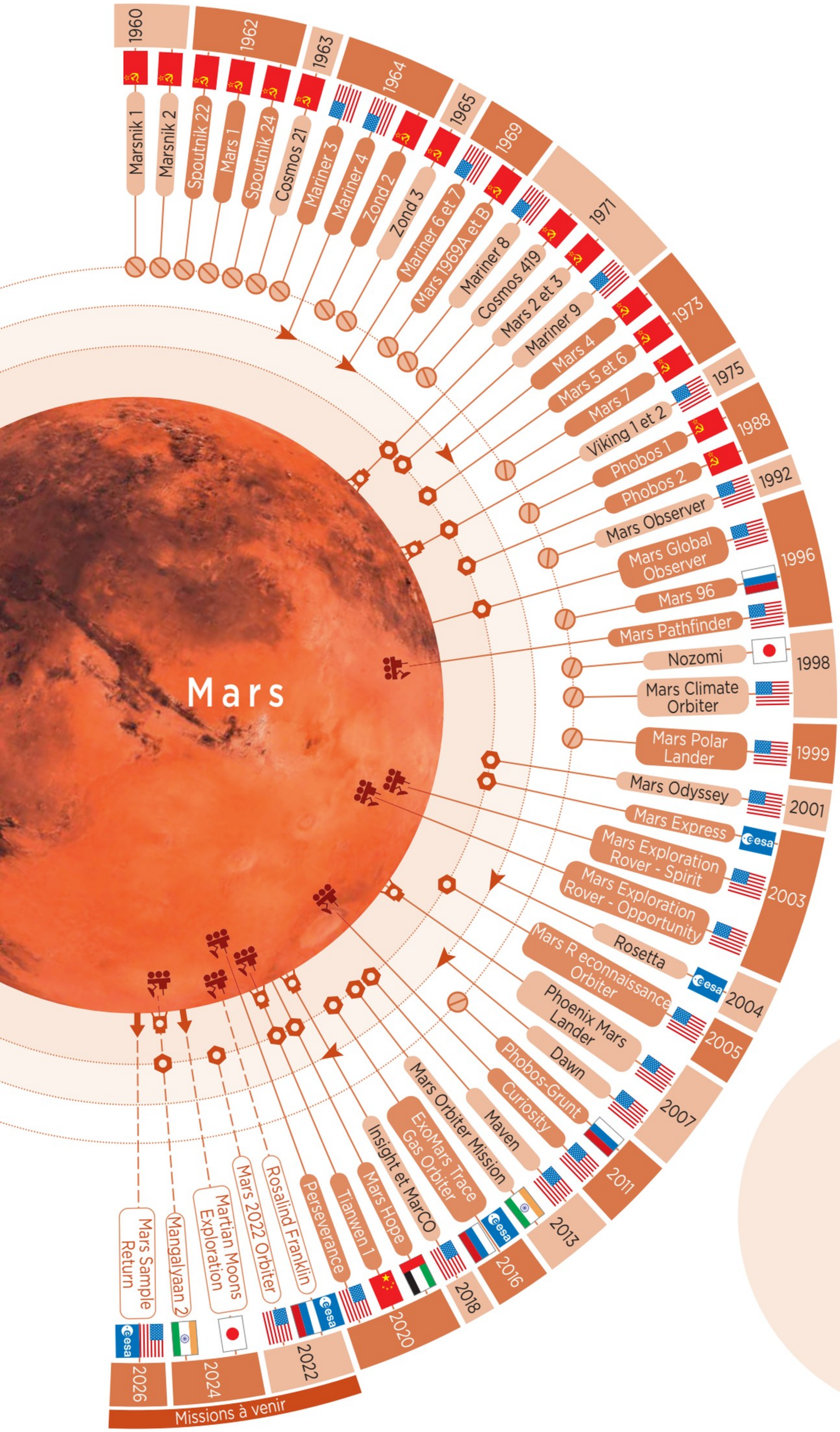
SUR LA LUNE

La conquête de la Lune a été d'abord une aventure américano-soviétique avant de s'ouvrir au monde, et notamment à la Chine. Notre satellite est aujourd'hui considéré comme un relais indispensable pour se rendre sur Mars.



OBJECTIF MARS

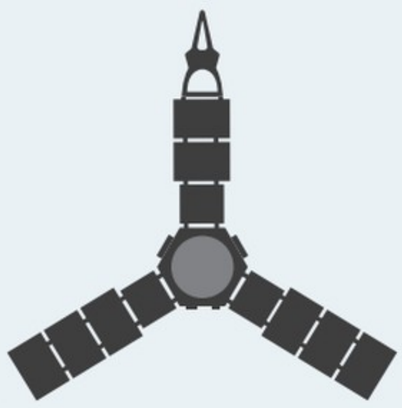
Pas facile de parvenir sur la planète Rouge sans encombre, ainsi qu'en témoigne le nombre d'échecs des années 1960. Il y a désormais 6 rovers sur Mars. Et ce n'est pas près de s'arrêter avec, en ligne de mire, des missions de retour d'échantillons pour répondre à la question toujours brûlante : la vie y a-t-elle existé ?



SOLEIL, PLANÈTES ET AU-DELÀ : DES MISSIONS AUDACIEUSES

Beaucoup reste à découvrir sur notre étoile et des missions récentes continuent d'explorer son influence sur notre planète. D'autres sondes ne font que passer, en profitant de l'effet de fronde gravitationnelle. Les petits corps les plus lointains restent peu explorés.

JUNO *Lancée en 2011, Juno scrute Jupiter et ses environs depuis 2016. La mission qui devait s'achever en 2021 a été prolongée jusqu'en 2025 afin d'étudier les scénarios de formation de cette géante gazeuse, élément primordial pour comprendre l'agencement du Système solaire.*



1962 — Mariner 2
1962 1974 — Pioneer 5 à 9
1967 1984 — Venera 4 à 16
1978 — Pioneer Venus Orbiter
1985 — Vega 1 et 2
1990 — Galileo
1990 1994 — Magellan
1998 1999 — Cassini
2006 — Venus Express
2006 2007 — 3 MESSENGER
2015 — Akatsuki
2018 2024 — Parker Solar Probe
2020 2021 — BepiColombo
2021 2026 — Solar Orbiter

1960 1968 — Pioneer 5 à 9
1974 — Helios 1
1976 — Helios 2
1978 — ISEE-3
1994 — Ulysses, Wind
1996 — SOHO
1997 — ACE
2001 — Genesis
2006 — STEREO A et B
2015 — DSCOVR, Solar Orbiter
2018 — Parker Solar Probe

1974 1975 — 3 Mariner 10
2008 2015 — 3 MESSENGER
2018 2025 — BepiColombo

Survol
Orbiteur
Atterrisseur
Impacteur
Retour d'échantillons

2015 New Horizons

PLUTON



NEW HORIZONS *Envoyée comme une fronde – à plus de 16 km/s –, la sonde a atteint Pluton en à peine dix ans. Mais arrivée à proximité, le 14 juillet 2015, elle allait trop vite pour être mise en orbite ! Elle n'a pu que survoler la planète naine, révélant un monde totalement inconnu, avant de filer vers Arrokoth, autre petit corps de la ceinture de Kuiper.*

1979 Pioneer 11

1980 1981 Voyager 1

Voyager 2

2004 2017 Cassini (Huygens versTitan)

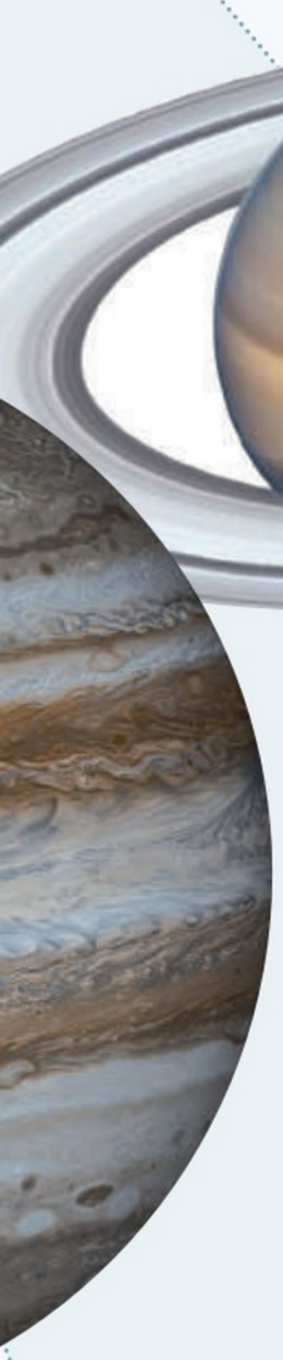
NEPTUNE

URANUS

1989 Voyager 2

1986 Voyager 2

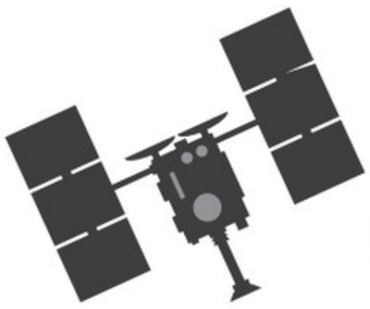
SATURNE





CASSINI *Consacrée à Saturne et à ses anneaux, la sonde lancée en 1997 a atteint le système saturnien en 2004. L'atterrisseur Huygens, qui y était attaché, fut le premier engin à se poser sur le satellite Titan, le 14 janvier 2005, révélant des lacs de méthane. En 2017, Cassini a fini sa mission en apothéose en plongeant dans l'atmosphère de la planète.*

COMÈTES ET ASTÉROÏDES, LE SECRET DE NOS ORIGINES



CÉRÈS & ASTÉROÏDES

HAYABUSA 2 *Lancée en 2014, cette sonde japonaise a rapporté sur Terre, en décembre 2020, les échantillons qu'elle a collectés sur l'astéroïde Ryugu. Leur analyse devrait nous éclairer sur la matière primordiale qui a donné naissance à notre Système solaire.*

CERES

2015 2018 Dawn (a orbité avant autour de 4-Vesta)

ASTÉROÏDES

1997 2001 NEAR Shoemaker (253 Mathilde et 433 Eros)

2018 2019 Hayabusa 2 (162173 Ryugu)

OSIRIS-REx (101955 Bennu)

1973 Pioneer 10

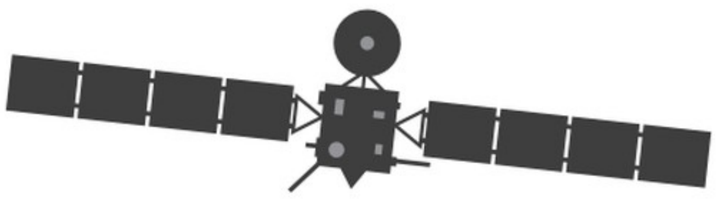
1974 Pioneer 11

1979 Voyager 1

Voyager 2

1995 2003 Galileo

2016 2025 Juno



ROSETTA *Première sonde à se mettre en orbite autour d'une comète, elle a fourni des images spectaculaires de Tchouri, révélant aussi que les comètes sont constituées de grains de molécules organiques, sorte de ciment piégeant des grains de glace et de silicates.*

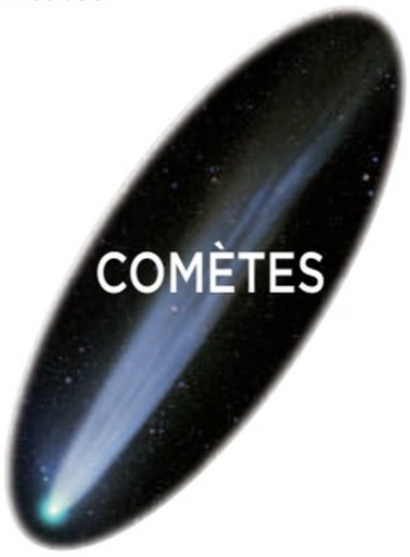
1986 Giotto (1P/Halley)

1986 Deep Space 1 (19P/Borelly)

2004 2006 Stardust (81P/Wild)

2005 Deep Impact (9P/Tempel)

2014 2016 Rosetta/Philae (67P/Churyumov-Gerasimenko)



COMÈTES

Sur cette double page, nous n'avons pas représenté les échecs, ni tous les survols.

BNF, PARIS



Nicole Bériou
HISTORIENNE, INSTITUT DE RECHERCHE ET D'HISTOIRE DES TEXTES (IRHT)
Professeure et directrice d'études émérite à l'École pratique des hautes études et membre de l'Académie, elle est spécialiste d'histoire religieuse et culturelle et des pratiques de la communication. Elle a co-dirigé l'ouvrage Le Manuscrit franciscain retrouvé *(CNRS éditions, 2021).*

Les trésors fascinants d'un manuscrit franciscain retrouvé

Une équipe de chercheurs aux compétences multiples, constituée dès l'acquisition par la Bibliothèque nationale de France, en 2014, d'un modeste manuscrit du XIIIe siècle, vient de publier les résultats de près de sept ans de recherches. Objectifs : comprendre la fabrication, reconstituer l'histoire et déterminer le contenu de ce recueil a priori sans attrait, qui se révèle en fait un témoignage inestimable sur les débuts du franciscanisme.

Dans le portrait en pied de François d'Assise peint en 1235, neuf ans seulement après sa mort, le saint, placé au centre du retable conçu par le peintre italien Bonaventura Berlinghieri (1210-1287) pour l'église des frères mineurs de Pescia (Italie), est en position frontale et hiératique. Il porte dans la main gauche un livre. Bien que nous soyons, en ce début du XIIIe siècle, à un moment de diffusion massive des pratiques de l'écrit dans la société, après le « décollage » du XIIe siècle, François porte les Évangiles comme un emblème, et non comme un outil. Il est celui qui en professe le message. D'ailleurs, nous n'imaginons pas François dans la posture du lecteur ni du scribe. Sur chaque scène du retable, le peintre l'a représenté les mains nues, qu'il soit en action (il prêche) ou en contemplation, en prière ou en orateur devant les hommes (et aussi les oiseaux), ou dans la posture de celui qui manifeste son amour du prochain par des gestes miséricordieux. D'après les propos qui lui sont attribués, il affichait même une attitude clairement réservée à l'égard des instruments de pouvoir, que ce soient les livres ou la science théologique acquise par ambition dont il se méfiait aussi.

La prodigieuse audience du message de François d'Assise, dans toutes les catégories sociales, fit cependant s'agréger autour de lui, après la première petite communauté

◀ *Tranche inférieure du recueil franciscain qui est constitué de 122 feuillets, aux bords irréguliers dans certains cahiers.*

D.R.

des pénitents d'Assise, des hommes et des femmes aux itinéraires multiples, dont très vite beaucoup de clercs. De ce fait, l'historiographie a constaté depuis longtemps que, dès la première moitié du XIIIe siècle, et en particulier dans la décennie 1230-1239, l'ordre a admis que les lettrés parmi les frères entretiennent leur savoir, tandis que les autres, en devenant frères, n'accédaient pas toujours à la culture écrite en dépit de leurs capacités. Chacun a pu au moins fréquenter les livres et se familiariser avec les techniques modernes de persuasion pour rendre efficace la prédication. Mais la chronologie et la géographie de cette fidélité à l'apprentissage des savoirs ou de la conversion à l'étude, selon les cas, nous échappent en partie, faute de vestiges concrets, tant sur le plan du contenu des premières bibliothèques des frères que des modalités d'acquisition des connaissances dans la plupart des couvents (1).

14,5 %

DES VOLUMES DE PETIT FORMAT

sont des recueils spirituels (dont le manuscrit) aux XIIIe-XIVe siècles.

LA DATATION A NÉCESSITÉ UNE ENQUÊTE PLURIDISCIPLINAIRE

Le surgissement sur le marché des manuscrits anciens, en 2014, d'un petit codex à l'apparence quelconque a changé la donne. De dimensions modestes (12 centimètres sur 8 centimètres), composé de 122 feuillets reliés ensemble cahier (*) par cahier (13 au total), il a été mis en vente par une galerie internationale, Les Enluminures. Aussitôt entré par acquisition dans les collections de la Bibliothèque nationale de France (BNF) sous la cote « Paris, BnF, NAL 3245 », il a été mis en ligne dans la bibliothèque numérique, Gallica (2) (une transcription intégrale est par ailleurs en cours, qui sera elle aussi en libre accès sur Internet). Chaque pièce du puzzle compte. Grâce à l'identification précise de chacune et par l'analyse combinée de leur succession, on peut espérer donner sens à un tel manuscrit déconcertant par l'accumulation de textes disparates. Très vite, une équipe internationale restreinte de chercheurs très compétents – spécialistes de l'écriture, des manuscrits, des langues en usage au XIIIe siècle, de l'identification, etc. –, a été constituée avec pour objectifs : comprendre la fabrication de ce recueil ; reconstituer son histoire, le transcrire ; identifier les textes qui le composent – presque tous anonymes et fragmentaires – ; interpréter l'assemblage. Un tel travail nécessite l'échange incessant entre chercheurs : une pratique courante à l'Institut de recherche et d'histoire des textes, laboratoire familier aux trois pilotes de l'entreprise dont je faisais partie, avec Jacques Dalarun, historien spéciliste du franciscanisme, et Dominique Poirel, archiviste paléographe.

Après un travail de trois ans, un colloque international, en 2017, tire un bilan sur les découvertes concernant ce document. Puis un livre, publié en 2021, compile les premiers résultats scientifiques des études portant sur le manuscrit. Toutes les analyses des textes qu'il contient (on peut y distinguer au moins 34 unités textuelles) conduisent à voir en lui un manuscrit franciscain. La présence en bloc, à deux reprises, dans le cahier V puis dans les cahiers VIII et IX, de textes fondamentaux de la tradition franciscaine milite clairement en ce sens : d'abord la *Regula Bullata,* qui est la règle de vie des frères franciscains approuvée par le pape, les *Admonitions* de François d'Assise, puis le récit des *Vie* et *Miracles* de François dans la deuxième version rédigée par Thomas de Celano, le premier biographe du saint. On ne peut pas dater à l'année d'après de la confection du manuscrit. Mais l'examen scientifique des matériaux (encres, ficelle de couture, parchemin…), effectué avec des techniques aussi peu invasives que possible, mené par l'équipe du Département de la conservation de la BnF avec le concours du Centre de recherche et de restauration des musées de France, donne la période de production : entre les années 1230 et 1265. Ces résultats combinés à l'analyse de contenu précisent la datation de la confection, en majorité dans la décennie 1230-1239, aux lendemains de la mort de François (en 1226), juste avant le tournant où l'apprentissage des frères une fois entrés dans l'ordre peut inclure des études. Ainsi l'importance historique de ce petit objet a priori sans attrait devient manifeste !

Le manuscrit NAL 3245 a été fabriqué à partir de matériaux d'usage courant en Italie, comme la peau de chèvre et, pour la reliure, la ficelle de chanvre. Il préserve quelques précieux vestiges de la langue vernaculaire qui rendent plausible l'hypothèse d'une provenance italienne. Ainsi,

(*) **Un cahier** est un ensemble de feuillets pliés en deux et emboîtés les uns dans les autres pour former un fascicule.

Le manuscrit, un trésor aux dimensions modestes

Ici, la photographie représente la fin du cahier VI et le début du cahier VII, à taille réelle, 12 cm sur 8 cm. À gauche, la partie impropre à l'écriture est laissée en blanc ; à droite, la série des piqûres faites pour sous-tendre la linéation est double (raison inconnue).



BNF, PARIS

au feuillet 39 verso, l'explicit du IVe cahier – *laudatu, laudatu, laudatu et magnificatu* – oriente vers l'ombrien, une des multiples formes de l'italien médiéval. Mais ils attestent aussi son itinérance jusqu'à Paris, où a été recueilli, dans un sermon pris en notes à l'audition, un proverbe noté en français dans le texte : « *Goz im cuisine son peir ne désire* », soit « Chien dans la cuisine ne désire pas de compagnon » (feuillet 62 verso). Devenu un livre par l'assemblage de plusieurs cahiers, à l'aide d'une reliure effectuée à deux reprises dès le XIIIe siècle en un temps relativement court, le manuscrit met en évidence l'importance de l'unité de base des cahiers qui le constituent. Le cahier, en principe, se suffit à lui-même. En observant la régularité des dimensions de tous les feuillets, cahier après cahier, on peut se demander si les frères ne constituaient pas une réserve de petits bouts de parchemin ajustés par eux à une taille unique, ce que permettait aisément la petite dimension des feuillets. Ces supports, préparés, s'ils ont existé, ont pu être acquis sur le marché, dans les matériaux de récupération, quelquefois troués, ou excessivement fins (donc impropres à l'écriture), que les parcheminiers négligeaient. Les frères pouvaient y ajouter des pièces éparses extraites de manuscrits obsolètes et dont le contenu avait été effacé, comme le montre l'examen attentif d'un des cahiers. Quoi qu'il en soit, la prépara-

Quelques grandes figures de l'ordre franciscain au XIIIe siècle



CLAIRE D'ASSISE (1193 ou 1194-1253), noble, n'a pas encore 18 ans, en 1211, quand elle décide de quitter sa famille pour entrer dans la vie religieuse. Retirée à Saint-Damien avec quelques compagnes connues sous le nom de « Pauvres Dames », elle défendit sans concessions l'idéal de pauvreté que lui avait légué François, y compris dans la Règle qu'elle rédigea pour ses sœurs au milieu du XIIIe siècle. Les femmes, cependant, sont les grandes absentes du manuscrit.



FRANÇOIS D'ASSISE (1181 ou 1182-1226), fils de marchand, fasciné par la culture chevaleresque, a abandonné ses rêves d'exploits militaires pour « suivre nu le Christ nu », dans une conversion radicale aux valeurs évangéliques qui imprègnent son expérience personnelle (il choisit « d'épouser Dame Pauvreté ») et nourrissent son message. Il est à l'origine d'un ordre religieux qui a grandi à une vitesse fulgurante (en 1300, il comptait sans doute 30 000 frères), mais qui s'est aussi très tôt divisé sur ce qu'il importait de retenir de l'héritage de son fondateur.



ANTOINE DE PADOUE (1195-1231), d'abord chanoine au Portugal, il se convertit en 1219 à la vie franciscaine quand il voit revenir à Coimbre les cadavres de cinq frères missionnaires, les premiers martyrs de l'ordre. Il fut un prédicateur renommé en France du Sud et en Italie. Pour certains, il incarnerait un courant intellectuel distinct de celui de François. Mais, dans le manuscrit, la citation de François par Antoine montre au contraire la proximité des deux hommes quant à la quête spirituelle.



JEAN DE LA ROCHELLE (env. 1200-1245) a joué un rôle important dans la rédaction de *Summa Fratris Alexandri* d'Alexandre de Hales (env. 1185-1245), son professeur, premier maître parisien converti à l'idéal franciscain.
ROGER BACON (1214-1294) entre, lui, en 1256 chez les franciscains. Curieux de sciences, il s'impose comme une figure originale de la pensée franciscaine au XIIIe siècle.



BONAVENTURE DE BAGNOREGIO (env. 1217-1274), entré dans l'ordre en 1243, s'est illustré par l'enseignement de la théologie à Paris. Ministre général de son ordre en 1257, il se consacre à cette tâche, soucieux de réduire les dissensions. Dans cet esprit, il a composé la *Legenda maior,* imposée en 1266 comme le texte canonique sur la vie de François. Notre manuscrit, aucune trace de son œuvre spirituelle pourtant abondante, ce qui renforce l'hypothèse d'une datation antérieure au milieu du XIIIe siècle.

ALFREDO DAGLI ORTI/PHOTO12 - ELECTA / BRIDGEMAN IMAGES - CHIESA DI SAN FRANCESCO PESCIA / AURIMAGES - BODLEIAN LIBRARY OXFORD / AURIMAGES - BRITISH LIBRARY/ROBANA/BRIDGEMAN IMAGES

tion des cahiers était minimale. On ne se préoccupait pas, contrairement aux pratiques des monastères et des ateliers urbains, de « régler » les feuillets, c'est-à-dire de tracer des lignes à la mine de plomb sur chacun d'eux, à l'avance, afin de guider l'écriture. Cette préparation est seulement réalisée feuillet après feuillet, au fur et à mesure de la copie et, de plus, sans aucune recherche de régularité du nombre de lignes à l'intérieur d'un même cahier.

Si le dernier texte copié sur un cahier est trop long, on y ajoute un second cahier, traité de la même manière, feuillet après feuillet, selon les besoins. Mais il est impossible de savoir à quel moment chacun des treize cahiers de l'actuel manuscrit NAL 3245 a été rempli de l'entassement des textes disparates qui le caractérisent. Il arrive que la dépendance de deux cahiers contenant le début puis la fin d'un texte (cahiers I-II, puis III-IV) permette d'en déduire que ces cahiers sont aujourd'hui reliés dans le bon ordre, un autre indice étant fourni par l'habitude des copistes de noter en bas d'un cahier un « mot réclame » qui est le premier mot du cahier suivant. Mais rien ne prouve que les treize cahiers ont été d'emblée solidaires. Seuls ou par paquets, ils sont susceptibles d'être passés de mains en mains selon les circonstances. Enfin, la complexité de l'objet s'accroît du fait que des écritures multiples – douze mains ayant participé à la rédaction ont été identifiées avec un certain degré de certitude ! – s'entremêlent, parfois à l'intérieur d'une même unité textuelle, et quelquefois se croisent en alternance.

L'ABSENCE DE STRUCTURES DANS LES TEXTES REND LA LECTURE DIFFICILE

Trouver ses marques dans un tel document est un défi : il n'y a presque aucune des aides à la lecture telles qu'elles se sont répandues au XIIIe siècle (titres courants et manchettes en marge, subdivisions des textes, index…). Seuls quelques textes sont précédés d'un titre qui en identifie le contenu – spécialement les textes relatifs à saint François qui occupent le milieu du manuscrit. Bref, c'est un document sans équivalent, y compris par sa taille, celle d'un carnet de notes, transportable dans une petite poche attachée au cou. Même les « livres de poche » qui se développent dans la production du XIIIe siècle, entre autres les petites Bibles utilisées par les prédicateurs dans leurs déplacements, ne sont pas comparables.

Regorgeant de mystères, il est, de ce fait, d'autant plus précieux et passionnant. Il est tentant de penser que le fait d'être considéré comme un trésor à toute époque soit la raison de sa conservation. La mise en valeur relative des textes les plus proches de saint François (la *Regula Bullata,* les *Admonitions,* la *Vie* qui s'est avérée être le deuxième texte du genre écrit par Thomas de Celano – *Vita brevior* – , et le récit des *Miracles* qui suit) suggère d'imaginer que de tels écrits avaient la valeur de reliques en quelque sorte. À cela il convient d'ajouter le texte anonyme qui préserve un commentaire du Notre Père si proche de la spiritualité de François qu'on pourrait penser qu'il est de lui, comme l'a envisagé Dominique Poirel dans son analyse subtile. Si on imagine que ces textes ont été rendus solidaires de tout le reste par une reliure relativement précoce, il est naturel de déduire que la conservation durable de l'objet intégral allait de soi, même si l'exploitation de tout son contenu a dû devenir de plus en plus difficile au cours du temps, voire déjà à la fin du XIIIe siècle.

Des écritures multiples, qui se croisent d'un cahier à l'autre, en font un objet complexe

En dehors de ces quelques textes un peu mieux structurés en effet, il est presque impossible de prendre ses repères dans la composition du reste du manuscrit, dense et dépourvue d'aération. Il est même significatif de constater qu'une parole jusqu'à présent inconnue de saint François, et préservée à l'intérieur d'un des extraits de sermons copiés à la fin du manuscrit (feuillet 114), n'est nullement mise

(*) **Un logion** est une parole d'inspiration divine ou sacrée.

en évidence sur la page qui la contient, ni au moment de la copie ni ensuite. On est tenté d'en déduire que, même pour des dévots de saint François gardant ce manuscrit comme une relique précieuse, ce logion (*) sur lequel personne ne s'était soucié d'attirer l'attention, ni au moment de la copie ni ultérieurement, a été vite oublié, noyé qu'il était dans un flot continu de mots.

Peu d'indices sont susceptibles d'aider à reconstruire l'histoire du manuscrit entre le XIII[e] et aujourd'hui. Sylvain Piron, directeur de recherches à l'École des hautes études en sciences sociales et spécialiste de l'histoire intellectuelle médiévale, a eu l'audace de proposer quelques hypothèses, corroborant l'idée du trésor (qui l'est aussi pour la communauté scientifique actuelle !) qu'il fallait à tout prix préserver (3). En tout premier lieu, il donne à connaître un texte hagiographique dont Jacques Dalarun avait pressenti l'existence en analysant la tradition liturgique (4). La fascination que François a exercée de son vivant et après sa mort est telle que tout nouveau témoignage vient nécessairement enrichir notre perception de la sainteté qui lui est reconnue et se trouve mise en évidence dans ses comportements, d'un texte à l'autre. De plus, si l'on veut bien se souvenir que ce texte s'est ensuite trouvé marginalisé par la décision de Bonaventure, ministre général de l'ordre franciscain entre 1257 et 1274 et l'une des premières grandes figures du franciscanisme (lire page 126), d'imposer la *Legenda maior* – qu'il a lui-même rédigée – comme seule biographie officielle de François, la conservation de cette autre version atteste les limites des pratiques de la censure, pour le plus grand bonheur des historiens…

Un manuscrit, déconcertant, qui a été conservé comme une relique

Mais le bloc central éminemment lié à François ne représente que le huitième du manuscrit. Intéressons-nous au reste, qui associe quelques autres textes intégraux (livres de la Bible, *Révélations* du pseudo-Méthode), des extraits sélectionnés à la lecture de documents écrits, et des passages plus informes, des sortes de notes restituant dans certains cas la matière de prises de parole.

Dans son état actuel, le manuscrit se présente comme une sorte de bibliothèque vivante. Les choix des textes en vue de la compilation révèlent les préoccupations des frères. La disparition récente de François a dû produire un ébranlement et une interrogation chez les frères sur ce que devait être leur fidélité au saint fondateur. Sur ce plan, les récits donnés dans la *Vita brevior* et les *Miracles*, faisant de lui une norme vivante, et le texte de ses *Admonitions* constituaient certainement des références immédiates. Le choix de certains longs extraits (sur le jeûne et sur la pénitence par exemple) pourrait bien être un autre indice de cette préoccupation.

COMPRENDRE LA CIRCULATION DE L'ÉCRIT CHEZ LES FRÈRES

La composition du manuscrit révèle aussi la pénétration de la culture écrite dans les couvents, par le truchement de notes et d'extraits qui ont pu être beaucoup plus nombreux que nous ne l'avions jamais imaginé. L'acquisition des connaissances par l'intermédiaire du commentaire biblique se devine sous des formes variées : présence inhabituelle de livres bibliques isolés, explication suivie de passages des épîtres de Paul, morceaux du commentaire de la synopse des Évangiles tel qu'il a été rédigé par le chanoine Zacharie de Besançon au XII[e] siècle, sélection de citations évangéliques empruntées à un recueil de Distinctions bibliques récent. Les extraits de textes compilés à partir de lectures conduisent à supposer que les frères qui ont copié ces textes fréquentaient des bibliothèques dont il resterait à mieux cerner les contours. Mais à bien des endroits, on soupçonne aussi le soubasse-

Les textes majeurs de la tradition franciscaine (XIII[e] siècle)

La fraternité constituée autour de François d'Assise vers 1205 possédait une règle brève et simple aujourd'hui perdue. En 1221, alors que l'ordre des frères mineurs se construisait, il se dota d'une nouvelle règle, en vingt-quatre chapitres, où s'affirmait, avec l'inspiration évangélique, l'attention à la vie pauvre et fraternelle. En 1223, une forme réduite au quart fut soumise à l'approbation écrite du pape. Reconnue dans une bulle, d'où son nom de *Regula Bullata*, elle reste la règle actuelle et officielle de l'ordre. D'autres textes de François, dont le Cantique de frère Soleil ou des créatures, s'y sont ajoutés à la fin de sa vie. Dans les *Admonitions*, des éléments de son enseignement éclairent les implications concrètes de la Règle de 1223.
Le Testament de 1226, ultime réflexion de François sur sa vocation et sur les dangers menaçant l'ordre, est devenu pour la plupart des frères un texte majeur. La dévotion au saint, canonisé en 1228, s'alimentait aussi à ses nombreux miracles, recueillis peu à peu en récits. Ainsi une dizaine de « Légendes » (c'est-à-dire de « textes à lire ») racontent sa vie entre 1228 et 1263.
La *Vita prima* de Thomas de Celano, rédigée entre 1228 et 1229 sur ordre du pape Grégoire IX, a été suivie d'une seconde rédaction, toute nouvelle, que préserve le manuscrit NAL 3245.
C'est une forme abrégée, rédigée à la demande de frère Élie (ministre général de 1232 à 1239), suivie d'un recueil de *Miracles.*
En 1263, les deux légendes que Bonaventure consacre à François, la *Legenda maior* et la *Legenda minor* (d'usage liturgique), sont officiellement approuvées.
En 1266, ordre est donné de détruire toutes les légendes antérieures. ■ N. B.

ment de la circulation orale, qui est le propre de l'enseignement des maîtres et des prédicateurs. Les quelques lignes sur les comportements vertueux contenues au feuillet 68 (verso) proviennent ainsi d'un cours du maître franciscain Jean de la Rochelle (vers 1200-1245), que l'on saisit au moment où il prépare, à la faveur de son enseignement parisien, la rédaction de son traité sur les facultés de l'âme, datable des années 1233-1235.

MORALITÉ ET SPIRITUALITÉ CÔTOIENT DES PRÉOCCUPATIONS ACTUELLES

Sur l'ensemble du manuscrit, morale et spiritualité se côtoient sans que l'une ne prenne le pas sur l'autre, et l'utilité de tous ces textes se devine dans les deux champs de l'alimentation de la vie religieuse personnelle des frères et de l'enseignement qu'ils dispensent par la prédication. L'audience dont bénéficient les œuvres de saint Bernard de Clairvaux (mort en 1153), qu'elles soient authentiques ou apocryphes, est inégalable. Beaucoup de citations, cependant, proviennent de la tradition plus ancienne des Pères de l'Église, en particulier d'Augustin et de Grégoire le Grand. La référence explicite à Antoine de Padoue (1195-1231), autre figure du franciscanisme dont plusieurs extraits de sermons sont assurément copiés dans le deuxième cahier, et la transmission anonyme de l'enseignement d'auteurs très récents, attentifs à l'action pastorale (tel le Parisien Pierre le Chantre) sont tout aussi frappantes. Certaines préoccupations croisent davantage l'actualité : l'hérésie, très présente, appelle à la vigilance et au débat ; et une note sur la fréquentation des excommuniés pourrait bien trouver sa raison d'être dans la condamnation de l'empereur germanique Frédéric II (1194-1250) lui-même.

Le petit manuscrit franciscain retrouvé, sur lequel une équipe internationale de chercheurs patentés s'est penchée pour en comprendre la raison d'être et commencer à en écrire l'histoire, n'a pas livré tous ses secrets – loin de là ! Mais sa découverte a bousculé les certitudes, suggéré des hypothèses et restitué les indices d'une complexité dans la circulation de l'oral et de l'écrit et dans l'histoire des premiers disciples de saint François que d'autres devront continuer à explorer. ■

(1) Neslihan Senocak, *The Poor and the Perfect*, Ithaca, 2012.

(2) https://gallica.bnf.fr ark:/12148/btv1b10516082m

(3) S. Piron in *Le Manuscrit franciscain retrouvé*, N. Bériou *et al.*, CNRS éditions, p. 315, 2021.



(4) Jacques Dalarun, *La Vie retrouvée de François d'Assise*, CNRS éditions, 2019.



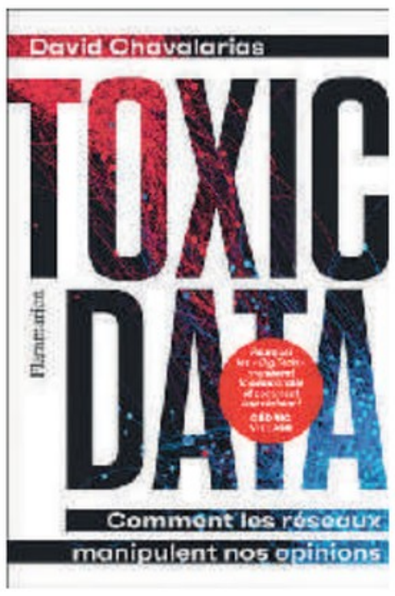
Numérique

Toxic Data

David Chavalarias

Tout le monde ou presque utilise les réseaux sociaux. Pourtant, leur influence négative est loin d'être anodine. Au point de mettre en danger la démocratie, analyse David Chavalarias, chercheur et directeur de l'Institut des systèmes complexes, à Paris.

Voici un livre salutaire alors que l'influence des réseaux sociaux explose. Il analyse la manière dont le numérique au sens large, à travers des stratégies d'influences via les réseaux sociaux, qu'il s'agisse de tweets, de photos, de mèmes – élément ou phénomène reproduit en masse – ou de vidéos, a « intoxiqué » nos sociétés. Une intoxication qui fragilise la démocratie, estime l'auteur, directeur de recherche au CNRS et spécialiste des systèmes complexes. Pour étudier le rôle des technologies de l'information sur les dynamiques sociales et culturelles, il a notamment mis au point des outils de collecte et d'analyse du réseau social Twitter. Baptisé Politoscope, ce projet lancé en 2016 se poursuit aujourd'hui et lui a permis de récolter déjà des centaines de millions de messages émis par plus de 15 millions d'utilisateurs. Ses travaux l'ont poussé à formuler cette conjecture effrayante : *« Le modèle économique actuel de la Big Tech, fondé sur la marchandisation de l'influence sociale, est incompatible avec la pérennité de nos démocraties. »*



Pour appuyer sa démonstration, l'auteur passe en revue les mécanismes d'influence qui ont fonctionné à plein durant plusieurs événements, en premier lieu la campagne présidentielle de 2017 en France, dont certains venaient de l'étranger. Il décrypte ainsi la stratégie d'action mise en œuvre par la droite alternative américaine (l'*« alt-right »*), qui regroupe une partie de l'extrême-droite américaine, pour influencer cette campagne. Cette stratégie combinait l'utilisation de mèmes pro-Le Pen mais aussi de dénigrement de ses adversaires. Les activistes professaient des conseils sur le type de message, sur le montage vidéo et proposaient même des « banques de mèmes » prêtes à l'emploi avec des bulles vides qu'il suffisait de remplir. Ces actions ont été menées avec un fin sens du timing, faisant monter la campagne de dénigrement en parallèle des moments clés de la campagne présidentielle.

Les mécanismes d'influence utilisés et les phénomènes qui entrent en jeu sont bien identifiés et de différents ordres : les algorithmes de recommandation, poussés par la plateforme afin de constituer un réservoir plus important de publicité à recommander ; la chambre d'écho, espace numérique où l'information circule en vase clos, parfois plusieurs fois en provenance de la même source, gênant la prise en compte de toute information contradictoire, et provoquant ce qu'on appelle une bulle de filtre (l'enfermement dans sa propre vision du monde) ; le biais de confirmation, très étudié en psychologie, et qui renforce nos croyances.

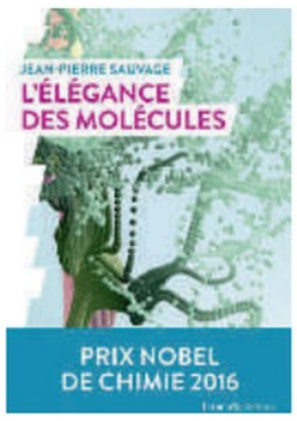
L'approche de l'élection fait renaître ces craintes. Et la pandémie a exacerbé et illustré les effets de ces comportements déviants. Alors, peut-on sauver notre démocratie de l'overdose numérique ? À l'issue de son analyse bien étayée, l'auteur propose des pistes d'intervention. Beaucoup sont des recommandations de bon sens – comme puiser à la source ou aiguiser son sens critique –, pour vivre plus sereinement cette période. Sinon, à l'instar du personnage principal du film *« The Truman Show »*, nous resterons avec nos œillères dans cette prison invisible où les réseaux sociaux exploitent sans vergogne nos failles cognitives et nos peurs pour nous y maintenir le plus longtemps possible… **Philippe Pajot**

David Chavalarias, *Flammarion, mars 2022, 216 p., 19 €.*

GAUMONT, PANAHI, CNRS

Chimie

L'Élégance des molécules



Une dose de persévérance et son équivalent en curiosité, deux autres doses de *« goût pour les puzzles moléculaires »* et l'art pictural. Mélangez puis faites mijoter à l'École de chimie de Strasbourg. Rendez le tout effervescent, grâce à une bonne ration d'amitié, et saupoudrez de chlorophylle… Au bout de quelques années, vous devez obtenir un prix Nobel de chimie ! Le parcours de Jean-Pierre Sauvage, récompensé en 2016 par l'Académie suédoise, est certes plus complexe. La lecture de son autobiographie laisse découvrir bien d'autres ingrédients. Âgé de 77 ans, ce passionné continue de s'interroger sur les rouages moléculaires de la photosynthèse et transmet son amour de la chimie, cette science qui *« établit un pont entre les lois de l'univers et les règles de la vie »* – définition empruntée à Jean-Marie Lehn, autre grand chimiste strasbourgeois, prix Nobel en 1987.

À l'heure où l'adjectif « chimique » a une connotation négative, Jean-Pierre Sauvage revient aux fondamentaux : ne pas confondre la chimie et l'industrie chimique ; *« une molécule isolée, quelle que soit son origine, n'est ni hostile, ni bienveillante par nature »* ; nos vies reposent sur de la chimie ! Celui qui, enfant, broyait des feuilles de chêne pour y prélever les molécules de chlorophylle, décrit ainsi le fabuleux mystère d'une cascade de réactions à l'origine de notre oxygène, la photosynthèse. Il rappelle aussi que les organismes vivants sont des machines moléculaires incroyablement sophistiquées, douées de mouvement. C'est justement pour avoir donné du mouvement à des molécules élaborées en laboratoire, ouvrant la voie à la création de machines moléculaires, que le chimiste a reçu le Nobel.

Mathias Germain

Jean-Pierre Sauvage, *Humensciences, mars 2022, 180 p., 18,90 €.*

Biologie

Éloge des lianes



Annik Schnitzler-Lenoble et Claire Arnold

Trop souvent perçues comme des parasites, les lianes jouent au contraire de multiples rôles, que ce livre magnifiquement illustré s'attache à décrire.



Inutile de chercher Tarzan dans ce beau livre ! Si l'on trouve les lianes surtout sous des climats chauds et humides, on peut en voir sans aller si loin : elles font partie de notre quotidien. Les vignes, les plants de haricots verts dans les potagers et les clématites en sont autant d'exemples. Les autrices, écologues et spécialistes des forêts, dressent ici un magnifique panorama de cet univers végétal foisonnant, dont les frontières sont difficiles à cerner. Plus qu'un groupe taxonomique, les lianes se définissent par leur mode de vie. Au lieu de construire un tronc pour assurer leur autoportance, elles s'épanouissent sur des supports, vivants ou non, pour grimper plus vite vers la lumière et produire un feuillage abondant. *« Une stratégie intéressante car de nombreux groupes systématiques l'ont utilisée au cours de l'évolution »*, soulignent les biologistes. Trop souvent perçues comme des parasites, elles jouent au contraire de multiples rôles. Elles abritent et nourrissent de nombreuses espèces, y compris les humains, et sont les pansements de la forêt. En cette période de bouleversements, elles méritent tout notre intérêt ! **M.G.**

Annik Schnitzler-Lenoble et Claire Arnold, *Actes Sud, mars 2022, 282 p., 32 €.*

Vie scientifique



Comment l'université broie les jeunes chercheurs

Les témoignages de ce livre ont été anonymisés. La raison ? La parole commence à peine à se libérer sur le sujet, sensible, qu'ils abordent : les situations abusives subies par les doctorants. Entendre par là : le sexisme, le harcèlement sexuel, le harcèlement moral et plus largement les violences psychologiques (vol de travaux, absence d'encadrement, interdiction de prise de congés, critiques injustifiées…). Tous ces dysfonctionnements concernent environ un doctorant sur cinq d'après le livre, qui se fonde sur une enquête anonyme à laquelle ont répondu près de 1900 (ex) doctorants et docteurs. Si surprenant soit-il, ce chiffre est corroboré par différentes études internationales. Le début d'une prise de conscience ? **V. G.**

Adèle B. Combes, *Autrement, janvier 2022, 336 p., 19,90 €.*

D. R. - D. R.

Histoire

Dans les coulisses de la science

La science est une affaire collective. Mais à quoi ressemble la population des « petites mains », rarement mise en valeur ? L'historienne Françoise Waquet en dresse ici un portrait précis.



Ils sont techniciens, personnel administratif ou de service, membres de la famille, amis, bénévoles ou contractuels… Tous contribuent, à leur manière, à l'œuvre de la science. Pourtant, ils restent invisibles ou guère visibles. Au bout de trois ans de travail, l'historienne des sciences Françoise Waquet, auteure d'une passionnante *Histoire émotionnelle du savoir* (CNRS éditions, 2019), fait émerger ces *« oubliés de l'histoire des sciences »*.

On les retrouve par exemple sur le seuil des publications, au détour des remerciements dans les articles, les thèses, les présentations PowerPoint, les livres… « *Rituel de courtoisie, geste démocratique, étalage de pouvoir, construction d'une image, les remerciements sont un genre académique avec ses règles et ses expressions,* écrit-elle. *Tournant à l'occasion au "nano-récit" d'une recherche, ils révèlent la petite société qui est derrière la publication* […]. *Ils démontrent que, même pour l'auteur qui travaille et apparaît seul, la science est "une activité sociale".* » Cette population nombreuse, hétérogène dans les formes d'emploi qu'elle assume, tour à tour essentiellement masculine puis féminine, apparaît aussi dans les autobiographies, les correspondances, les entretiens et autres archives orales, la littérature institutionnelle, les enquêtes portant sur le monde de la recherche ou encore les images. Une multitude de sources qui permet à Françoise Waquet de documenter non seulement la situation contemporaine dans notre pays, mais aussi celle des techniciens et autres personnels support depuis le XVIIe siècle.

Forte de cette documentation foisonnante, dont elle fait une synthèse rigoureuse, l'historienne ne cherche pas à *« déshéroïser (sic) les grands noms de la science »*, mais à construire *« une vue plus réelle, moins distordue »* de tous les acteurs de la société du savoir, en rappelant l'importance du collectif. À l'heure où certains discours, y compris au sein des organismes de recherche, ne jurent que par le « *sommet de la pyramide* » et la compétition, le message est loin d'être inutile. Vincent Glavieux

Françoise Waquet, *CNRS éditions, mars 2022, 350 p., 25 €.*

Mathématiques



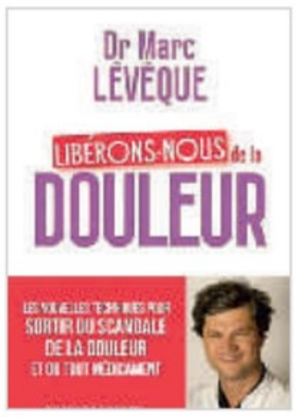
Récoltes et semailles

Écrit entre 1983 et 1985, ce texte du mathématicien français Alexandre Grothendieck (1928-2014), qui a révolutionné la géométrie algébrique dans la seconde moitié du XXe siècle, circulait depuis longtemps dans le milieu des spécialistes. Il est publié pour la première fois aujourd'hui, en deux épais volumes. Pas facile au premier abord de plonger dans cette « *réflexion spontanée* ». Ce livre fleuve comporte des analyses sur ce que signifie *« faire des maths »*, une introspection sur des aspects de l'existence et une critique acerbe du monde mathématique. La porte d'entrée la plus facile sera peut-être « l'aspect historique », qui nous plonge dans le monde mathématique d'après-guerre. On y croise, très bien décrites, toutes les figures de l'époque, tels Laurent Schwartz, Henri Cartan, Jean-Pierre Serre, etc. Une autre manière de plonger dans ce texte étonnant consiste à lire la grande réflexion sur la peur et la créativité. Pour Grothendieck, les chercheurs ne sont pas les grands scientifiques qu'ils pourraient être car ils sont freinés par la peur de rater, *« la peur de l'ego»*, qui leur fait perdre leur créativité. Alors que celle de l'enfant est extraordinaire car il n'a pas peur, d'où cette invite à retrouver l'enfant qui est en nous. D'autres parties du livre sont également à la portée des non-mathématiciens, notamment la longue réflexion sur le Yin et le Yang, le masculin et le féminin en chacun. La partie où il règle ses comptes avec la communauté qui l'a *« trahi » et «enterré»* intéressera surtout les mathématiciens. Pourtant cette rancœur paraît difficile à comprendre quand on sait à quel point il est considéré comme l'un des plus grands génies des maths. Un livre à picorer avec délectation. **Ph. P.**

Alexandre Grothendieck, *Gallimard, janvier 2022, 2 652 p., 29,50 €.*

Santé

Libérons-nous de la douleur



Non, le titre de cet ouvrage, dédié *« à tous ceux qui jour après jour souffrent »*, n'est pas un vœu pieux. En France, dans sa forme chronique, la douleur concerne près de 14 millions de personnes. Mais seule une infime minorité – 3 % – bénéficie d'une prise en charge adaptée dans des structures spécialisées, les rendez-vous dans les centres antidouleur saturés ne s'obtenant souvent qu'au bout de plusieurs mois. Résultat, pour 70 % des patients, la douleur est toujours là, rebelle et envahissante. Pourtant, face à ce mécanisme tant chimique qu'électrique, des solutions existent, détaille l'auteur, neurochirurgien à Marseille. Elles ne reposent pas uniquement sur les seules prescriptions d'antalgiques (morphiniques, antidépresseurs, antiépileptiques), dont les effets indésirables sont bien connus. Les techniques ayant recours à l'application d'électricité sur la peau, la moelle épinière, les nerfs ou le cerveau permettent, par leur action focale et non générale, de brouiller efficacement le message douloureux. Tout est ainsi dans le sous-titre « Les nouvelles techniques pour sortir du scandale de la douleur et du tout médicament ». Ce plaidoyer pour des approches différentes démontre de manière claire et argumentée, références scientifiques à l'appui, que la seule réponse pharmacologique est de fait bien réductrice. Riche aussi de références tant littéraires qu'historiques, le livre offre des moments bouleversants, comme ce poème de Sabine Sicaud, morte à l'âge de 15 ans en 1928 d'une infection osseuse : *« Cette douleur est seule au monde, quoi qu'on veuille. Elle n'est pas celle des autres, c'est la mienne. »* Passionnant et indispensable pour en finir avec la fatalité. **Sylvie Riou-Milliot**

Marc Lévêque, *Buchet-Chastel, mars 2022, 240 p., 18,50 €.*

KATHLEEN BALLARD PHOTOGRAPHY / DR

LU D'AILLEURS Biologie



Hurricane Lizards and Plastic Squid

Thor Hanson

Le biologiste explique comment les animaux et les plantes ont su s'adapter au changement climatique en développant d'ingénieuses stratégies.



Jusqu'ici, les discussions sur le changement climatique se sont focalisées sur ses conséquences pour les humains. L'Américain Thor Hanson, biologiste de la conservation, apporte un éclairage original en considérant son impact sur le monde vivant dans sa globalité et sans crier à la catastrophe. Car si le changement climatique bouleverse les écosystèmes et pousse de nombreuses plantes et animaux au bord de l'extinction, bon nombre d'espèces ont su s'y adapter, faisant preuve d'une extraordinaire résilience.

Mêlant ses propres observations et celles d'autres scientifiques qu'il interviewe sur le terrain, Thor Hanson illustre son propos à travers de multiples exemples. En Papouasie-Nouvelle-Guinée et au Pérou, des colonies entières d'oiseaux se sont déplacées plus haut dans les montagnes pour fuir des températures trop élevées. En Amérique du Nord, plus de 60 espèces d'arbres ont « voyagé » plus bas en altitude et vers l'ouest, retrouvant ainsi un niveau d'humidité favorable. On estime que 85 % des espèces adoptent cette stratégie de déplacement.

Sur l'île Kodiak, au large de l'Alaska, les ours ont délaissé les saumons au profit des baies de sureau, qui mûrissent désormais plus tôt dans la saison. Dans les récifs coralliens touchés par le blanchissement, les poissons-papillons ont perdu leur agressivité habituelle : la nourriture s'y faisant plus rare, il ne faut pas gaspiller l'énergie.

Deux autres exemples frappants ont inspiré à l'auteur le titre de son livre : dans les Caraïbes, des lézards ont développé de larges coussinets sous leurs doigts, afin de s'accrocher plus fermement aux branches pendant les ouragans qui y sont fréquents. Et dans le golfe de Californie, les calmars de Humboldt ont complètement changé d'aspect et de comportement : beaucoup plus petits, plus nombreux, ils vivent deux fois moins longtemps et se nourrissent de proies totalement différentes.

Thor Hanson voit toutes ces histoires comme autant d'exemples et de raisons d'espérer pour les humains : si les animaux et les plantes sont capables de changer pour survivre, pourquoi pas nous ? Julien Bourdet

Thor Hanson, *Icon Books, février 2022, 304 p., 15,99 £.*

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

La chronique de Marie Dégremont

Un choc énergétique révélateur de nos fragilités

Ces derniers mois, le niveau élevé des prix des énergies a jeté une lumière crue sur nos dépendances dans ce domaine et le rôle qu'elles jouent dans notre quotidien. Se chauffer convenablement est devenu un luxe pour nombre de consommateurs. Au 1er février 2022, en France, les tarifs réglementés de l'électricité auraient dû augmenter de 44,5 % , soit + 57,4 € par mégawatt-heure (MWh), si le gouvernement n'avait pas pris des mesures exceptionnelles. En moyenne, les ménages français ont dépensé, pour se fournir en énergie, 36 euros de plus en octobre 2021 qu'en novembre 2019, dont 30 euros du seul fait de la hausse des prix (1). La situation est comparable à celle de l'automne 2018, où les prix élevés des carburants avaient contribué à l'émergence de la fronde des Gilets jaunes.

Les entreprises, et en particulier celles dites « énergo-intensives » comme celles des secteurs de la métallurgie ou de la chimie, sont d'autant plus affectées qu'elles s'approvisionnent davantage sur les marchés que les particuliers et bénéficient déjà d'une fiscalité réduite – l'État ne peut donc pas amortir cette hausse en modulant les taxes. Dans ces secteurs, la concurrence internationale est féroce, et les marges réalisées assez faibles : toute augmentation importante de leurs coûts de production peut entraîner des suspensions temporaires, voire définitives de leur activité. Pour l'aluminium par exemple, industrie indispensable à notre transition énergétique (élément pour l'allégement des véhicules et des infrastructures solaires et éoliennes), l'électricité représente 30 % des coûts de production.

Cette crise énergétique est celle des énergies fossiles. En effet, la reprise économique s'appuie sur le gaz, le pétrole et le charbon. En 2021, les prix de marché du gaz ont été multipliés par cinq et ceux de l'électricité par plus de quatre, suivant la courbe des prix des combustibles fossiles utilisés pour la produire. Tels le charbon, qui satisfait plus de la moitié de la hausse de la demande d'électricité et dont le prix a triplé, ou le baril de pétrole de la mer du Nord (Brent), qui a retrouvé fin 2021 les hauteurs de fin 2018, autour de 70 euros l'unité.



Les prix s'enflamment parce que la consommation d'énergie augmente plus vite que l'offre disponible. L'utilisation intensive de ces énergies pousse les marchés du carbone à la hausse. Le coût de la tonne de CO_2 sur le marché européen a cumulé les records, dépassant les 80 euros cet hiver, alors qu'il naviguait sous les 30 euros mi-2020 lors du rebond consécutif au premier déconfinement. Ce qui a contribué pour 20 % à la hausse observée du prix de l'électricité.

En théorie, cela devrait rendre les énergies les plus vertueuses plus compétitives. Toutefois, les contraintes sur l'approvisionnement en gaz étant plus élevées cette année, elles font grimper les prix, rendant le charbon relativement plus accessible. Les avaries du parc nucléaire

THIERRY MARRO

français, dont un tiers des réacteurs a été à l'arrêt en fin d'année 2021, ont encore réduit les capacités de production mobilisables, tirant les prix vers le haut et donnant plus de place encore aux centrales fonctionnant aux énergies fossiles.

Nos industries, notre économie et notre budget personnel sont affectés par les vicissitudes de flux de matières sur lesquels nous avons peu de prise. La contraction de l'offre gazière résulte de multiples facteurs, comme une demande forte pendant l'hiver en Amérique du Sud, du fait de sécheresses réduisant la production hydro-électrique, qui a dirigé les méthaniers vers ce continent plutôt que vers l'Europe. Le rebond économique ainsi qu'une saison hivernale particulièrement froide en Asie ont eu le même type d'effet. À cela, il faut ajouter l'utilisation par la Russie de tous les leviers disponibles pour réduire ses livraisons de gaz à l'Europe tout en confortant son statut de premier fournisseur, le déclin des gisements européens ainsi que des incidents et le report d'opérations de maintenance du fait de la situation sanitaire. Plus les conditions météorologiques qui sollicitent régulièrement les dispositifs de chauffage et de climatisation. En 2021, le vent a peu soufflé : l'éolien a donc faiblement contribué à notre approvisionnement énergétique. Il a fallu trouver des substituts, le gaz étant pour le moment privilégié.

Face à ce choc énergétique d'une ampleur comparable aux crises pétrolières de 1974, 1979 et 2008, les gouvernements européens sont à court terme condamnés à jouer les pompiers, et c'est ce qu'ils ont fait. L'Espagne a par exemple baissé la taxe sur la valeur ajoutée (TVA) sur l'électricité et le gaz, diminué la fiscalité sur la production d'électricité, instauré un prélèvement sur les bénéfices exceptionnels réalisés par certains producteurs, et prévu d'en redistribuer le produit aux consommateurs. L'Italie mobilise également le levier fiscal et finance cet effort budgétaire en utilisant notamment les revenus additionnels générés par la hausse des prix du carbone sur le marché européen – en effet, le produit de la vente de permis d'émissions vient alimenter le budget des États membres. En France, l'exécutif est aussi intervenu en urgence et à plusieurs reprises : chèques énergie versés aux plus modestes pour aider au paiement des factures de gaz et d'électricité, gel du tarif réglementé du gaz au niveau d'octobre 2021, diminution de la fiscalité sur l'électricité, hausse du volume d'électricité produit par EDF vendu à prix réduit à ses concurrents…

Bien sûr, il s'agit d'éviter que certains ménages ne sombrent dans des situations financières et sociales inextricables et que le tissu industriel ne se replie encore davantage, alors que l'économie se relève tout juste de la crise sanitaire. Cependant, ces mesures sont des digues fragiles qui ne nous protégeront que temporairement – et partiellement – des tensions qui se dessinent sur notre approvisionnement énergétique. Les interventions gouvernementales s'apparentent à des crédits à la consommation que les contribuables devront rembourser. Ils confortent nos dépendances alors que rien ne dit que les conditions seront plus favorables à l'avenir.

Pour sortir des énergies fossiles, il est urgent d'établir un constat lucide sur les efforts à fournir ainsi qu'une stratégie d'investissement à la hauteur des enjeux

LE CLIMAT EST UN USURIER…

Les investisseurs ne sont pas incités à consacrer des financements à des infrastructures permettant de réduire la demande ou de disposer d'énergie fiable et décarbonée car la visibilité sur leur rentabilité future est faible. D'une part, parce que la volatilité des prix des énergies va s'accroître du fait de la fermeture non coordonnée de capacités de production pilotables en Europe et de la proportion croissante des énergies renouvelables variables dans notre mix. D'autre part, parce que les interventions de la puissance publique pour encadrer leurs revenus de diverses manières manquent de lisibilité. Outre cela, nous n'avons pas engagé à une échelle suffisante les changements systémiques nécessaires pour sortir durablement des énergies fossiles, comme la réduction du besoin de transport ou l'isolation des bâtiments. Tout ceci est d'autant plus préoccupant que le climat est à cet égard un usurier : plus le temps passe, plus adapter nos sociétés à un monde « bas carbone » sera difficile. Il est donc plus que temps d'établir un constat lucide sur les efforts à fournir, de bâtir une stratégie d'investissement à long terme à la hauteur des enjeux et d'y consacrer les ressources adéquates. Les prochains hivers pourraient être plus rudes encore. ■

(1) INSEE, « La hausse des prix de l'énergie pèse sur le budget des ménages », Conjoncture française, 14 décembre 2021

Marie Dégremont est chercheuse associée au Centre de sociologie des organisations à l'Institut d'études politiques de Paris.

NUMÉRIQUE ET IA

La chronique de Liva Ralaivola

Recherche publique et privée, des mondes pas si différents

Après avoir travaillé une vingtaine d'années dans la recherche publique, j'ai rejoint Criteo AI Lab en 2018, une entité de recherche appartenant à une société privée. Cela m'a permis de comprendre les différentes manières de faire de la recherche, notamment dans le domaine de l'apprentissage automatique – ou machine learning (ML). Cette branche de l'intelligence artificielle (IA) étudie les modèles destinés à capturer des régularités statistiques complexes cachées dans de grands volumes de données. Les modèles ainsi « entraînés » aident au diagnostic médical, à la reconnaissance de la parole, à la génération d'images, etc. Les dernières avancées sont un terrain de jeu inédit se nourrissant d'un terreau rare d'expertises poussées, allant de la recherche académique à l'ingénierie. Elles tirent parti de l'accessibilité d'outils dédiés (logiciels, données, architectures de calcul) et de la multiplication des formations dans ce domaine (*).

Les deux missions fondamentales du monde académique sont la recherche, c'est-à-dire le développement et la diffusion de connaissances, et la formation, destinée en premier lieu aux étudiants. Dans le secteur privé, les chercheurs en IA ont une première mission, celle de la production de connaissances scientifiques, proche de ce qui se voit dans le public : liberté de sujets et de collaborations, publications dans des revues et conférences avec comités de lecture, encadrement de doctorants. Tout en étant le rouage d'un objectif crucial : le transfert technologique et l'innovation. La prise en charge de cette mission dépend de l'entreprise. Il peut s'agir, comme chez Criteo, de formation ou de consulting interne, de mobilités temporaires de ou vers la recherche. De manière générale, les chercheurs en IA du privé se positionnent naturellement sur des recherches à la croisée des intérêts de la communauté scientifique ML et de ceux de leur écosystème quotidien. Il en ressort un défi moins présent dans le public : celui du bon équilibre entre recherche fondamentale, souvent sur le long terme, et recherche appliquée, dont les résultats doivent aider à déverrouiller des « problématiques métier ».

À Criteo, nous misons dès le processus de recrutement sur le recouvrement d'expertises ML entre recherche et ingénierie – plusieurs de nos ingénieurs ML sont d'ailleurs docteurs en informatique ou en mathématiques appliquées.

Notre laboratoire compte 30 chercheurs ML et une soixantaine d'ingénieurs. Dans les laboratoires publics de mathématiques et d'informatique, les recherches sont plus diverses et la proportion chercheurs/ingénieurs est inversée. Le Laboratoire d'informatique fondamentale, que j'ai dirigé à l'université de Marseille, comptait ainsi une centaine d'enseignants-chercheurs répartis en 7 équipes et autant de thématiques (algorithmique,

L'intelligence artificielle est l'un des rares domaines scientifiques où la porosité entre les structures de recherche du privé et du public est aussi prononcée

algorithmique distribuée, vérification, calcul naturel, bases de données, ML et traitement automatique de la langue) pour 4 ingénieurs. Cette différence de ratio reflète l'écart entre l'objectif des universitaires de transmission de connaissances au plus grand nombre et celui de la recherche privée de transfert technologique. Pourtant, la recherche publique en IA gagnerait à recruter plus d'ingénieurs, au vu de tous les bénéfices qu'apporte l'interface recherche/ingénierie sur la stimulation intellectuelle, la levée de blocages ou les chemins de réflexion inédits.

Le quotidien des chercheurs de Criteo, celui centré sur la production scientifique, diffère peu de celui des chercheurs du public (précisons que j'écarte ici volontairement la question, chronophage, de la recherche de financements, du montage de projets et, pour les enseignants-chercheurs, celle additionnelle de la gestion des enseignements). Je vois deux raisons à cela. D'une part, tous appartiennent à la même communauté scientifique, collaborent, se rencontrent dans des colloques, co-encadrent des doctorants sans barrières liées à leur affiliation, et les activités de recherche s'alignent grâce à cette même appartenance de communauté. D'autre part, d'un point de vue administratif, les structures de recherche du public et du privé soutiennent et favorisent les passages d'un monde à l'autre, tout comme les opportunités de postes à temps partiel. L'intelligence artificielle est un des rares domaines scientifiques où cette porosité est si prononcée et l'un des rares où il y a une concomitance entre avancées en recherche, sauts technologiques et cas d'usage démultipliés. La porosité entre les mondes en est-elle une cause ou une conséquence ? ■



DR

(*) En France, en 2021, on comptait une cinquantaine de formations en IA de niveau M2.

Liva Ralaivola est directeur de recherche au Criteo AI Lab, structure de recherche et d'innovation créée en 2018 au sein de la société Criteo, entreprise internationale de technologie fournissant des solutions pour la publicité en ligne.

LA CHRONIQUE DESSINÉE

Par Boulet



ÉTHIQUE

La chronique de Jean-Gabriel Ganascia

De quoi et en quoi les scientifiques sont-ils responsables ?

Les enquêtes d'opinion en attestent : le public loue volontiers les chercheurs pour leurs découvertes ; il reconnaît leur dévouement à la science ; il les blâme parfois à cause des mésusages qu'on en fait ; il s'offusque surtout de leurs tricheries et de leur corruption, en particulier de leurs conflits d'intérêts. Pour autant, il n'accepterait pas qu'ils se retranchent dans une tour d'ivoire, à l'écart du monde ; il leur demande de s'engager dans le siècle, d'aider l'humanité à surmonter les défis qui se présentent à elle, de lui permettre de soigner ses maux, tout en les en tenant pour partiellement responsables. Avec le temps, cette accusation devient plus insistante. Comment y répondre sans se dérober et qu'en est-il au juste de la responsabilité des scientifiques ?



Au cours de la première décennie du XXIe siècle, les institutions de financement de la recherche de la communauté européenne promurent « la Recherche et l'Innovation Responsables » – en anglais, *Responsible Research and Innovation* (RRI).

Inquiètes de la désaffection des citoyens pour les sciences et les technologies, ces instances souhaitaient désamorcer les controverses qu'elles suscitaient tout en relayant les appréhensions des populations relatives aux grands enjeux sociétaux majeurs : réchauffement climatique, vieillissement, immigration massive, etc. À cette fin, elles posèrent trois principes régulateurs : la transparence, autrement dit la pleine accessibilité aux résultats des investigations ; la réflexion sur les enjeux du progrès, en l'occurrence l'anticipation des conséquences du déploiement des innovations technologiques et la politique de prévention qui s'ensuit ; et, enfin, l'inclusion, à savoir la participation des différents acteurs concernés – décideurs, éducateurs, financeurs, chercheurs, utilisateurs, etc. – à la définition des orientations stratégiques de la recherche et de la technologie, en vue de les mettre tous face à leurs responsabilités.

Personne de sensé ne contesterait ces orientations. Qui oserait promouvoir l'opacité du savoir, l'ésotérisme et la rétention des connaissances, et s'opposer ainsi à la transparence ? Comment accepter que l'on se transforme en autruche en mettant la tête dans le sable et que, ce faisant, on évite d'anticiper le futur et d'en tirer les conséquences qui s'imposent ? Qui se prononcerait contre toute démarche inclusive en refusant la consultation des différentes parties prenantes lors de la définition des orientations de la recherche ? La RRI fait donc l'objet d'un consensus, même s'il arrive que certaines factions partisanes y contreviennent avec vigueur. Elle aborde la responsabilité scientifique au regard des actions des chercheurs et de leurs conséquences, sous l'angle de ce que les Anglo-Saxons appellent l'*accountability*.

Pourtant, elle n'apparaît que partielle, et ce pour deux raisons au moins. En premier lieu, elle tend à diluer la responsabilité du scientifique en instituant une forme de collégialité dans la détermination des orientations de la recherche. En cela, elle prend acte d'évolutions que certains sociologues des sciences caractérisent comme

PIERRE KITMACHER

« post-normales ». Ces dernières tiennent à ce que, sur des questions majeures comme celles du réchauffement climatique ou du stockage des déchets nucléaires, la complexité des enjeux exige la collaboration de scientifiques de différents horizons associés à d'autres acteurs concernés, ceux que l'on appelle les « parties prenantes », qui sont extérieures au champ scientifique.

LA DIMENSION MORALE RESTE À DÉFINIR

De ce fait, la responsabilité individuelle du scientifique s'amoindrit doublement en ce que, d'un côté, il n'est plus seul, puisque sa responsabilité devient collégiale, et d'un autre côté, des acteurs extérieurs au monde scientifique endossent eux aussi une part de responsabilité.
En second lieu, avec la RRI, la responsabilité scientifique est envisagée à partir de l'anticipation des conséquences des décisions humaines dans le champ des applications des sciences. Elle recouvre donc l'aspect juridique de la responsabilité, voire un peu au-delà, sans toutefois en épuiser la dimension morale qui demeure plus ténue.
Quoique les chercheurs soient censés produire du nouveau et que l'évolution de leur carrière en dépende, on n'incrimine pas leur responsabilité lorsqu'ils ne trouvent pas ; on ne les soumet pas à une exigence de résultat ; il n'existe aucune obligation de cet ordre du fait du caractère fortuit du processus de découverte. De plus, on ne saurait être responsable de ce que l'on n'a pas choisi. Or la découverte ne résulte pas d'une décision, mais d'une réalité sous-jacente que doivent confirmer des faits.
Enfin, avec la recherche contractuelle, la part que les scientifiques conservent dans la détermination de leurs sujets de recherche s'amoindrit, ce qui restreint plus encore leur liberté et donc leur responsabilité. La responsabilité morale personnelle des scientifiques tendrait-elle donc à disparaître ?
Pour répondre à cette question, recourons à la stratégie adoptée par le philosophe Paul Ricœur dans un petit article intitulé « Éthique et morale » (1990), où est abordé le sens du juste en partant de son contraire. Selon lui, si nous éprouvons des difficultés à cerner le juste et la justice, c'est que ces notions sont secondes et donc fort abstraites, alors que le sentiment d'injustice est premier et s'impose à l'évidence. Certaines actions nous choquent au point que nous nous indignons sans avoir à nous référer à la litanie des lois, des codes et des principes. *L'Enfant sauvage* (1970), de François Truffaut, l'illustre à merveille : Victor de l'Aveyron, ce petit garçon trouvé dans la forêt qui ne parle pas et marche à quatre pattes, éprouve une sensation d'injustice et manifeste sa colère face à une réprimande injustifiée. Il ne sait pas ce qu'est le juste ; il ressent pourtant l'injustice. Ainsi, et pour reprendre les termes de Paul Ricœur, l'injuste serait premier, car il révolte, et tous le perçoivent intuitivement, alors que le juste, plus difficile à saisir parce que dérivé de l'injuste, serait second.
Peut-être en va-t-il de même avec la responsabilité morale des scientifiques. La définir est difficile : elle serait seconde, tandis que l'irresponsabilité scientifique serait première, car saisie dans l'intuition. Ainsi, tricher au cours de ses recherches, taire, par complaisance ou par intérêt, des résultats prouvés, procéder à des expérimentations dangereuses, poursuivre des recherches néfastes pour l'humanité, ne pas dénoncer des propos manifestement fallacieux parce que contraires aux connaissances scientifiques, ne pas alerter des dangers que courent l'humanité actuelle et l'humanité future, se prononcer en public en faisant état de son statut de scientifique, tout en s'exprimant hors de son champ de compétence, délivrer sciemment des expertises inexactes, etc., voici quelques exemples de conduites irresponsables pour un scientifique. À partir de cette énumération, la responsabilité scientifique peut être vue comme la lutte contre l'irresponsabilité scientifique, ce qui recouvre à la fois un devoir d'information, de réfutation des fausses nouvelles, de probité dans la recherche, d'alerte, etc.
Au cours de ces deux dernières années, vécues au rythme de la pandémie du Covid-19, nous avons observé de multiples inconduites scientifiques, dues parfois au narcissisme, parfois à des conflits d'intérêts de divers ordres. Elles ont été suffisamment nombreuses pour que nous revendiquions, très haut et très fort, la nécessité de la responsabilité morale des scientifiques ! ■

Devant la complexité des nouveaux enjeux, avec la multiplication des intervenants, les contours de la responsabilité scientifique se redessinent

Jean-Gabriel Ganascia est professeur d'informatique à Sorbonne Université.
Les vues exprimées dans cette chronique n'engagent que leur auteur.

▲ *Les Klingons, de la série TV* Star Trek, Discovery *(2017), sont non seulement dotés de coutumes et d'accessoires typiques, mais ils parlent aussi leur propre langue, créée en 1985 par Marc Okrand. Elle est inspirée des langues amérindiennes.*

Les dialectes inventés pour les films sont nombreux, entraînant l'émergence d'un nouveau métier, conlanger. Prononcer un charabia aléatoire ne suffirait-il pas ? Comment se construit une langue ? Les idiomes naturels sont-ils une source d'inspiration ?

L'essor des langues fictives



Frédéric Landragin
LINGUISTE
Directeur de recherche au CNRS, laboratoire Lattice, École normale supérieure de Paris

Le film *Dune* de Denis Villeneuve (2021) déploie un monde complexe imaginé autour de plusieurs planètes et civilisations. La diversité des cultures entraîne celle des langues : les guerriers de l'Empire parlent le sardaukar ; les Fremens, habitants de la planète Dune, le chakobsa ; le protagoniste, Paul Atréides, et sa mère, en plus de la langue de Caladan, utilisent un langage des signes pour échanger discrètement. Rien de tel dans le roman initial de Frank Herbert (1965) ! Les langues y sont évoquées rapidement et, à part quelques mots-fiction – « *gom jabbar* », « *distille* », « *brilleur* », qui sont d'ailleurs définis dans un lexique en fin de roman –, tous les dialogues sont en anglais. Cette évocation rapide peut suffire au lecteur. Mais pour le spectateur, à l'écran, l'utilisation d'un même idiome pour les dialogues entre des peuples différents réduirait à néant les effets de vêtements, maquillages et postures. Imaginez que les extraterrestres d'un univers intergalactique, par exemple les Klingons de *Star Trek,* parlent tous l'anglais américain : peu plausible ! Les réalisateurs envisagent donc des dialogues dans les langues de la fiction, avec sous-titrage. Pour un aspect pratique évident, l'une des langues – typiquement celle du personnage principal – est celle du spectateur.

Une telle diversité linguistique a été utilisée dans la série *Game of Thrones,* avec le haut valyrien ou le dothraki, dialecte parlé par le peuple de cavaliers nomades, et appris non sans mal par la jeune Daenerys des Dragons. Là encore, les romans de George R. R. Martin ne contiennent que très peu d'indications sur le vocabulaire ou la structure de ces langues fictives. Leur élaboration en littérature, comme le Britannique J. R. R. Tolkien a pu le faire pour *Le Silmarillion* ou *Le Seigneur des anneaux,* est rare. Il est difficile en effet de demander au lecteur d'apprendre une langue pour comprendre les dialogues. Ou alors il faudrait que le roman soit bilingue, incluant la langue de la fiction et celle du lecteur : c'est le choix de l'écrivain français Frédéric Werst pour sa série *Ward* (2011, 2014).

Pour adapter à l'écran un roman confrontant des cultures diverses,

COLLECTION CHRISTOPHEL / CBS TELEVISION STUDIOS - DR

le réalisateur et son équipe ont à composer les langues de la fiction, afin de les faire parler par les acteurs et construire ainsi le monde décrit par l'écrivain. Suffirait-il de demander à ces acteurs de dire n'importe quoi ? Avec des sous-titres, on n'y verrait a priori que du feu. Mais certains des fans – le fandom ! – visionnant les films plusieurs dizaines de fois repéreraient à l'évidence les répétitions, les tics de langage, ou tout simplement le manque de cohérence, une même phrase prononcée de plusieurs façons, par exemple. Pour une meilleure vraisemblance et une adhésion du public à l'univers fictif, élaborer les langues de la fiction de la manière la plus réaliste possible est nécessaire. À cette fin, les créateurs de Hollywood et des chaînes de télévision font appel à des spécialistes : des constructeurs de langues. On appelle « conlang » – contraction de *constructed* et *language* – une langue construite, et « conlanger » son créateur.

Les langues de *Dune* et *Game of Thrones* ont été créées par le même conlanger, l'Américain David J. Peterson. Le succès de *Game of Thrones* a d'ailleurs contribué à populariser ce métier, pas une nouveauté totale, mais désormais professionnalisé. Depuis, David J. Peterson (né en 1981), linguiste et littéraire, incarne le conlanger à succès, grâce à qui un simple loisir est devenu un véritable métier.

FIXER LA PRONONCIATION

En effet, inventer des structures syntaxiques originales ou un système phonétique qui fasse sens, n'est pas à la portée de tous. La prononciation doit tout autant être soignée : les mêmes mots du haut valyrien – par exemple « *dracarys* » (« feu-dragon »), avec un accent tonique sur la deuxième syllabe – doivent avoir la même prononciation, même quand plusieurs années séparent les tournages des différents épisodes. Des phonéticiens aident ainsi les acteurs à répéter leur texte, à revoir leur articulation, avec accent et intonations identiques. Ils se fondent sur les indications du conlanger, regroupées dans des guides de prononciation, des dictionnaires et des grammaires, qui permettent une certaine maîtrise de ces locutions fictives.

Créer une langue pour une fiction revient à produire les mêmes outils constitués par les linguistes pour décrire les langues naturelles. Si le résultat peut sembler similaire, les processus d'élaboration diffèrent. Les langues naturelles évoluent en effet sans cesse, s'enrichissent de nouveaux mots dont le sens se modifie régulièrement, d'une génération à l'autre. Elles sont un objet collectif, aux mains des locuteurs. On ne peut pas les contrôler.

Si l'orthographe est soumise à des règles strictes et n'évolue qu'à

▼ *Sur cette pierre tombale dans le film* Dune *(de Denis Villeneuve, 2021), on peut distinguer des inscriptions en galach, la langue officielle de l'Imperium. Elle aurait été composée à partir d'un mélange de russe et d'anglais.*

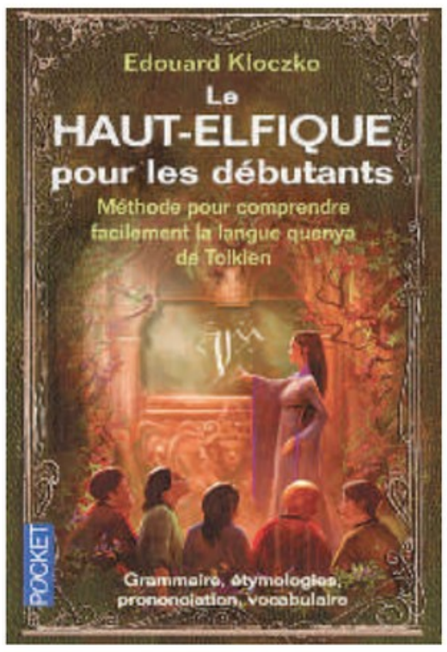


coups de réformes, l'emploi oral de nombreux mots se révèle beaucoup plus libre : l'usage prime, plutôt que les règles. Par exemple, le genre de Covid a été déclaré féminin par la secrétaire perpétuelle de l'Académie, mais le masculin est encore très employé. Seul l'avenir – c'est-à-dire l'usage – dira si le masculin ou le féminin l'emportera. Et les dictionnaires n'auront plus qu'à entériner cet usage.

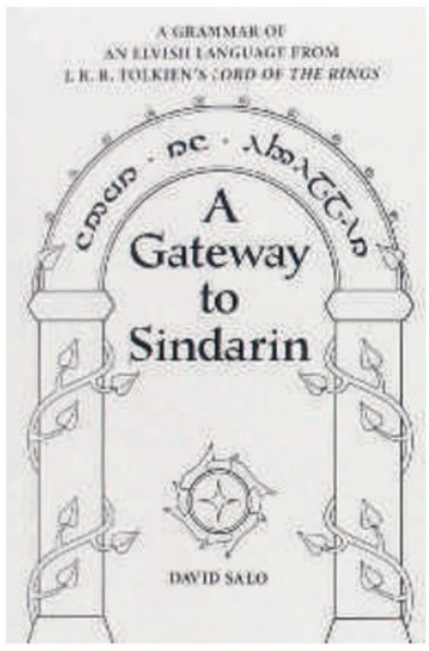
UNE LANGUE CONSTRUITE EST UN SYSTÈME FIGÉ

À l'inverse, une langue construite est un système pensé à un instant t, totalement figé (en « synchronie »). Si J. R. R. Tolkien imagine le quenya – ou haut elfique – comme une langue dotée d'une histoire, avec un vocabulaire et des règles qui évoluent (en « diachronie »), cela reste un cas particulier. La vaste majorité des langues construites ne sont pas imaginées avec un état initial et des séries d'évolutions liées à leur usage sur plusieurs siècles, car le travail d'élaboration en deviendrait totalement démesuré.
Même le volapük de Johann Martin Schleyer (1880) et l'espéranto de Ludwik Lejzer Zamenhof (1887), langues artificielles créées pour faciliter les échanges internationaux, sont initialement figés. Martin Schleyer interdit d'ailleurs toute modification de sa création.
Le succès du volapük, bien qu'indiscutable – il a été utilisé dans vingt-cinq pays – a duré peu de temps, chassé par l'espéranto. Ludwik Lejzer Zamenhof autorise, lui, les évolutions. Il en produit d'ailleurs lui-même, et va jusqu'à proposer une réforme en 1894. Surtout, des enfants apprennent l'espéranto en tant que langue maternelle. Une communauté d'espérantistes se développe : le succès est important, les variantes se multiplient, beaucoup de gens se l'approprient et le font évoluer. Aujourd'hui, cependant, l'espéranto a beau être reconnu par des organismes internationaux comme l'Unesco, et être parlé par quelques millions de locuteurs dans une centaine de pays, le constat est malgré tout sans appel : c'est le « globish » (contraction de « global » et de « *english* », qui renvoie à l'emploi de l'anglais, dans une syntaxe et un vocabulaire basiques) qui sert de langue auxiliaire pour les échanges internationaux. Qui plus est, cette langue n'étant pas parlée par tous, les entreprises et institutions font largement appel à la traduction – par exemple dans l'Union européenne, avec ses vingt-quatre langues officielles, et dont le budget de traduction reste faramineux. L'espéranto initial n'a cependant rien d'une production naturelle : pour un apprentissage plus facile, les conjugaisons sont dépourvues d'exceptions.
La démarche se veut rationnelle, comme l'est celle pour créer une langue universelle fondée sur les principes – tout autant universels – de la logique. Une telle langue existe : elle s'appelle la lingua cosmica, en abrégé lincos, et constitue une tentative sérieuse – en tout cas soutenue par des organismes de renom telle la NASA – pour former un langage susceptible d'être compris par d'éventuels extraterrestres. C'est le METI (*Messaging Extraterrestrial Intelligence*) qui se charge de fédérer les efforts réalisés dans ce sens. Le but est de formuler des messages auto-explicatifs : on commence par les chiffres et les opérateurs mathématiques ; on enchaîne avec les opérateurs logiques comme la conjonction (« et »), la disjonction (« ou ») et la négation. On le voit, ces opérateurs se rapprochent de phénomènes linguistiques. De proche en proche, des prédicats sont formulés, puis des équivalents de phrases. Résultat : en 2017, le lincos du METI est utilisé pour formuler un message envoyé à partir d'un radiotélescope situé en Norvège vers

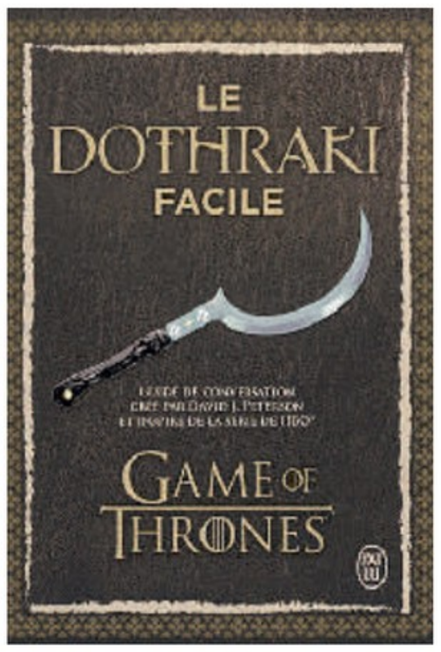
GUIDES DE CONVERSATION



▲ *Méthodes pour maîtriser le quenya, une des langues du Seigneur des Anneaux.*



▲ *Une analyse et une histoire du sindarin, autre langue de la Terre du Milieu.*



▲ *Une présentation du dothraki, de Game of Thrones, une langue orale.*

COLLECTION CHRISTOPHEL / WARNER BROS. - LEGENDARY ENTERTAINMENT - VILLENEUVE FILMS

la plus proche exoplanète connue, nommée GJ 273b. Compte tenu de la distance qui sépare la Terre de cet astre, le message arrivera à destination en 2030. Quant à savoir s'il sera réceptionné – et compris – par des êtres intelligents, c'est une autre histoire…

CRÉER UNE LANGUE PLAUSIBLE N'EST PAS UNE TÂCHE AISÉE

Construire une langue peut prendre bien des chemins. D'un côté, des initiatives rationnelles comme l'espéranto et le lincos ; de l'autre, des ersatz comme le quenya et le dothraki. Les premières peuvent prôner la régularité et s'affranchir des exceptions ; les seconds s'autorisent tous les phénomènes qui apparaissent dans les langues naturelles. Ces dernières fourmillant d'exceptions et de polysémies, causes d'ambiguïtés et de quiproquos, les conlangers sont libres d'imaginer des exceptions et des polysémies artificielles : plus il y en a, plus la langue construite est plausible !
Imaginer une langue, comme toute activité créative, ne se fait pas en partant d'une page blanche, mais en s'inspirant de ce que l'on connaît. Un humain maîtrise ainsi deux, trois, voire cinq ou six langues, ce qui constitue déjà un stock de phénomènes linguistiques intéressants. Un conlanger pressé se contentera de piocher des mots dans l'une d'entre elles, le fonctionnement de l'accent tonique dans une autre, des particularités de prononciation dans une troisième, et ainsi de suite. Le risque est alors d'aboutir à une chimère, c'est-à-dire un mélange dans lequel un locuteur de l'une des trois langues identifiera aisément la source d'inspiration, ce qui pourra « casser » la magie. Le conlanger talentueux, en revanche, polyglotte ou linguiste – voire les deux –, construit son propre système de voyelles et de consonnes, ses propres règles pour le fonctionnement de l'accent tonique (lire l'encadré ci-contre), son système de conjugaison qui fusionne, tout en les remodelant, des particularités de plusieurs langues. Il essaie de ne pas se laisser trop influencer par sa langue maternelle. Surtout, il envisage sa création

Le bon conlanger construit son propre système sans l'influence de sa langue maternelle

comme un ensemble cohérent, où chaque innovation lexicale a des conséquences sémantiques (polysémie, par exemple), chaque particularité syntaxique entraîne un ensemble – contrôlé – de répercussions sémantiques.
Contrairement à ce que montrent les guides d'apprentissage, il ne se focalise pas seulement sur le matériau linguistique tangible (vocabulaire, phrases-types, grammaire) mais s'intéresse également aux mécanismes de l'implicite, c'est-à-dire à tout ce qui est communiqué, sous-entendu, présupposé, sans pour autant être prononcé. Le conlanger débutant aura donc tout intérêt à s'intéresser à la linguistique et à étudier plusieurs langues, sans forcément les apprendre, pour repérer des phénomènes dignes d'être réutilisés.
La langue française code le mode (indicatif, impératif, etc.) et le temps verbal, mais pas l'aspect, c'est-à-dire la manière dont s'exprime le développement de l'action : sa durée, par exemple, sa progression ou son achèvement. Si l'on s'intéresse à une langue qui code l'aspect, on s'ouvre de nouvelles perspectives. Pour prendre un exemple concret, regardons la conjugaison des verbes en tariana, une langue d'Amazonie en danger d'extinction. La phrase « l'alien a mordu l'ambassadeur » comporte le verbe mordre, qui peut prendre cinq formes différentes selon que : on a vu la personne se faire mordre (le verbe mordre se prononce alors « niwhãka ») ; on a entendu les cris (mordre se dit « niwhãmahka ») ; on l'a appris de quelqu'un (« niwhãpidaka ») ; on l'a déduit directement en voyant la blessure (« niwhãsika ») ; on l'a déduit indirectement, par exemple en constatant le comportement bizarre de l'humain mordu (« niwhãnihka »). Le phénomène concerné s'appelle évidentialité. Pour quelqu'un qui ne maîtrise pas le tariana, le risque principal est d'utiliser systématiquement la forme de base « niwhãka », ce qui n'est pas vraiment pertinent pour des phrases telles que « Cerbère a mordu Héraclès » ou « le chien a mordu la reine d'Angleterre », car cela implique que l'on a assisté à ces événements…
Environ six mille langues sont actuellement parlées sur Terre. La plupart sont orales, sans système d'écriture associé. Du fait de la mondialisation, notamment, beaucoup d'entre elles ne sont plus parlées que par quelques milliers, voire quelques centaines de personnes, parfois âgées. Leur avenir est alors menacé.
Des linguistes se rendent sur le terrain pour enregistrer ces locuteurs, puis constituer des dictionnaires et des grammaires. Ce travail long et minutieux nous permet de connaître des phénomènes linguistiques

Savez-vous parler le dothraki ?

Athchomar chomakea ! Bienvenue ! Ainsi s'ouvre le manuel d'apprentissage *Le Dothraki facile,* écrit par l'Américain David J. Peterson, le conlanger pour la série à succès *Game of Thrones.*
L'exposé commence par la prononciation, avec la liste des voyelles et des consonnes. Dans le message de bienvenue, par exemple, la syllabe « cho » se dit « tcho », et « th » se prononce comme le « the » anglais. Même si David J. Peterson affirme s'être inspiré de l'arabe et de l'espagnol, l'influence anglo-saxonne est perceptible. Puis viennent les règles de l'accent tonique, placé sur l'avant-dernière ou dernière syllabe. Un système linguistique, donc, avec ses règles et même quelques exceptions ! Le manuel aborde aussi les expressions courantes, des locutions figées : marques de courtoisie, termes d'adresse (mot, nom ou titre utilisés pour s'adresser à quelqu'un), proverbes. Puis il attaque le cœur de la grammaire : pronoms, verbes, temps verbaux et inévitables conjugaisons. S'ajoute la déclinaison des noms communs, avec les cas, un système utilisé en grec, en latin ou en allemand qui indique la fonction du nom dans la phrase. Elle permet de s'affranchir de l'ordre « sujet, verbe, objet », usité dans les phrases anglaises et françaises. Ainsi Peterson s'est appliqué à développer plusieurs dimensions linguistiques pour créer sa langue imaginaire. ■ F. L.



▲ *Ces pictogrammes ont été créés pour satisfaire les fans. Seule une transcription phonétique existait, pour aider les acteurs.*

JASON HYDE / DR

remarquables comme l'évidentialité déjà évoquée. Beaucoup de langues n'ayant pas encore fait l'objet d'une telle attention, il est probable que nous ne connaîtrons jamais une quantité de phénomènes tout aussi remarquables. Bien plus qu'une perte linguistique – on estime qu'une langue disparaît environ tous les quinze jours –, cela représente aussi une perte pour notre ouverture d'esprit et notre capacité à appréhender la diversité.

Pourquoi construire autant de nouvelles langues, alors que notre patrimoine linguistique, qui plus est méconnu, est en train de disparaître ? Les conlangers ne feraient-ils pas mieux d'apprendre et documenter des langues en voie d'extinction ?

On ne peut, bien entendu, pas mettre ces activités sur un même plan : la linguistique de terrain ne rivalise pas avec l'attrait de l'industrie du divertissement. Néanmoins, les langues construites se multiplent, et très vite. Dans leur *Dictionnaire des langues imaginaires,* Paolo Albani et Berlinghiero Buonarroti recensaient en 2010 pas moins de mille cent langues construites. À l'heure actuelle, le décompte atteindrait environ trois mille cinq cents, un nombre comparable à celui des langues naturelles ! Mais qu'en est-il de leur diversité ? Vous l'aurez compris, notre point de vue – et conclusion – consiste à dire que se renseigner sur des dialectes peu connus apportera des idées intéressantes pour la construction de ceux qui sont artificiels. Profitons de la visibilité des langues fictives pour faire connaître les langues réelles. ■

Pour en savoir plus

- **Anne Abeillé et Danièle Godard (Eds.),** *La Grande Grammaire du français,* Actes Sud, 2021.
- **Edouard Kloczko,** *Le Haut Elfique pour les débutants. Méthode pour comprendre facilement la langue quenya de Tolkien,* Pocket, 2015.
- **Jean-Pierre Minaudier,** *Poésie du gérondif,* Le Tripode, 2017.
- **David J. Peterson,** *Le Dothraki facile,* J'ai Lu, 2017.
- **Paolo Albani et Berlinghiero Buonarroti,** *Dictionnaire des langues imaginaires,* Les Belles Lettres, 2010.
- **M. Yaguello,** *Les Langues imaginaires. Mythes, utopies, fantasmes, chimères et fictions linguistiques,* Seuil, 2006.
- **Frédéric Landragin,** *Comment parler à un alien ? Langage et linguistique dans la science-fiction,* Le Bélial' 2018.

Abonnez-vous à SCIENCES ET AVENIR La Recherche

et recevez

2 références de la presse scientifique française



+



11 numéros
(dont 1 numéro double)
Sciences et Avenir - La Recherche

4 trimestriels
La Recherche

+ 

L'ACCÈS À LA VERSION NUMÉRIQUE
de vos 11 numéros + 4 trimestriels

BULLETIN D'ABONNEMENT

À compléter et à renvoyer sous enveloppe affranchie à : Sciences et Avenir - La Recherche, Service abonnements - 45, avenue du Général Leclerc - 60643 Chantilly Cedex

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

OUI, je m'abonne pour 1 AN, soit 11 numéros (dont 1 N° double) de Sciences et Avenir - La Recherche + 4 numéros trimestriels de La Recherche en version papier et numérique pour 59 € au lieu de ~~99,10€~~*. Je réalise plus de 40 € d'économie.

J'indique ci-dessous mes coordonnées : ☐ M. ☐ Mme ☐ Mlle

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Téléphone : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Pour accéder à la version numérique de vos numéros, merci d'indiquer votre email :

..... @ .....

☐ J'accepte de recevoir par mail, des offres des partenaires de **Sciences et Avenir - La Recherche.**

PLRC 567

Mon mode de règlement :

Je règle par :

☐ Chèque bancaire ou postal à l'ordre de **Sciences et Avenir - La Recherche**

☐ Carte bancaire N° |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|

Date d'expiration |_|_| |_|_|

Signature obligatoire :

* Vous pouvez acquérir séparément chacun des numéros trimestriels de La Recherche au prix unitaire de 9,90 €, les numéros de Sciences et Avenir - La Recherche au prix de 5,30 € et le n° double à 6,50 €. Offre réservée exclusivement aux nouveaux abonnés résidant en France métropolitaine et valable jusqu'au 31/12/21. Service abonnements France : 01 55 56 71 15. Renseignements et tarifs pour l'étranger : 00 33 1 55 56 71 15. Les Éditions Croque Futur situées au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e, et qui éditent Sciences et Avenir - La Recherche, sont responsables de traitement et collecte des données afin de servir votre abonnement. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 7 ans à partir de votre désabonnement. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives post-mortem à l'adresse mail suivante : dpo@sciencesetavenir.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 Bis Avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sciencesetavenir.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

La Recherche

Sciences et Avenir / La Recherche: 41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris. Tél.: 0155355600 • E-mail rédaction: courrier@larecherche.fr • **Site Internet:** larecherche.fr • Pour joindre directement par mail un membre de la rédaction, libellez l'adresse sur le modèle: prénom.nom suivi de @larecherche.fr (sans accents).

Pour toute question concernant votre abonnement: Adresse: *La Recherche* 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex. **Tél.:** 0155567115. • **ABONNEMENTS: Tarif France:** 1 an 10 nos + 1 n° double + 4 trimestriels 59 euros. **Tarif international:** nous contacter. **E-mail:** abo.recherche@groupe-gli.com • **Suisse:** Edigroup. Tél.: +41 (0)22860 84 01 • **Belgique:** Edigroup. Tél.: +32 (0)70233304.

La Recherche est publiée par Croque Futur • **Président et directeur de la publication:** Claude Perdriel • **Directeur général:** Philippe Menat • **Directeur éditorial:** Maurice Szafran • **Directrice éditoriale:** Dominique Leglu • **Directrice des rédactions:** Carole Chatelain • **Rédacteur en chef:** Philippe Pajot • **Rédacteur en chef adjoint:** Vincent Glavieux • **Chef de rubrique:** Mathias Germain • **Conception graphique, couverture:** Dominique Pasquet • **Directeur artistique:** Jean-Louis Gilabert • **Rédactrice en chef adjointe photo:** Andreina de Bei • **Service photo:** Claire Balladur, Isabelle Tirant • **Première secrétaire de rédaction:** Natacha Dimakopoulos • **Ont collaboré à ce numéro:** Bruno Bourgeois, Jean-François Haït, Mehdi Harmi, Léna Hespel, François Mallordy, Françoise Roux, Sylviane Savatier • **Fabrication:** Christophe Perrusson, Sarah Rabbah • **Activités numériques:** Bertrand Clare • **Directeur des ventes et promotion:** Valéry Sourieau • **Vente messageries VIP-diffusion:** Frédéric Vinot • Numéro vert: 0800 51 49 74 • **Directeur des abonnements:** Luc Bonardi • **Responsable gestion abonnements:** Magali Viette • **Responsable administrative et financière:** Jaye Reig • **Responsable ressources humaines:** Sandrine Martin • **Comptabilité:** compta@challenges.fr • **Diffusion librairies:** Pollen Difpop. Tél.: 0143620807 Fax: 0172718451 • **Régie publicitaire:** MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris. Tél.: 0144889770. Fax: 0144889779 • E-mail: pnom@mediaobs.com • **Pour joindre directement une personne,** composez le 01 44 88, suivi des quatre chiffres placés après son nom. • **Directrice générale:** Corinne Rougé (93 70) • **Directeur commercial:** Christian Stefani (93 79) • **Directeur du pôle Sciences:** Emmanuel Lala (89 28) • **Studio/Maquette/Techniques:** Cédric Aubry (89 05) • **Imprimerie:** RotoFrance Impression (Lognes). Dépôt légal à parution. Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du trimestriel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L122-4 du Code de la propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél.: 0144074770. Fax: 0146346719). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication. Commission paritaire: 0924 K 85863. ISSN 0029-5671.

CRÉDITS DE COUVERTURE: CDC/PHANIE, ALFRED PASIEKA/SCIENCE PHOTO LIBRARY - PORTRAIT A. NELSON : DAN KOMODA - PORTRAIT P. SIMON : ARNO BRIGNON / SIGNATURES

PEFC 10-31-1557 Certifié PEFC

FR

ACPM DIFFUSION

Origine du papier : Suède
Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation PTot = 0,003 kg/tonne de papier.
Ce magazine est imprimé chez RotoFrance Impression (Lognes), certifié PEFC.

LES FILMS PELLÉAS ET BANDE À PART FILMS PRÉSENTENT

UN VOYAGE FASCINANT VERS NOTRE FUTUR



CINQ NOUVELLES DU CERVEAU

UN FILM RÉALISÉ PAR JEAN-STÉPHANE BRON



CINE+

AU CINÉMA LE 16 MARS

AD VITAM

marc paufichet pour la flibuste

LES 32 SCIENTIFIQUES QUI ONT PARTICIPÉ À CE NUMÉRO

Éric Bapteste, *biologiste,* directeur de recherche CNRS, Institut de systématique, évolution, biodiversité, Paris
Nicole Bériou, *historienne,* Institut de recherche et d'histoire des textes, Paris
Manuel Blouin, *écologue,* professeur à l'Institut Agrosup, Dijon
Bruno Corbara, *éthologue et écologue,* maître de conférences, université Clermont-Auvergne, Clermont-Ferrand
Grégoire Courtine, *physicien et neuroscientifique,* professeur, École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse)
Johan Decelle, *biologiste marin,* chercheur au CNRS, laboratoire physiologie cellulaire et végétale, Grenoble
Marie Dégremont, *chercheuse associée au Centre de sociologie des organisations,* Institut d'études politiques, Paris
Arnaud Diemer, *économiste,* maître de conférences, Université Clermont-Auvergne, Clermont-Ferrand
Jean-Gabriel Ganascia, *informaticien,* professeur, Sorbonne Université, Paris
Tatiana Giraud, *biologiste,* directrice de recherche CNRS, laboratoire écologie, systématique, évolution, Orsay
Cara H. Haney, *microbiologiste,* professeure, université de la Colombie-Britannique, Vancouver (Canada)
Thierry Hoquet, *philosophe,* professeur, université Paris-Nanterre
Claudia Hulbert, *chercheuse,* École normale supérieure, Paris
Frédéric Landragin, *directeur de recherche CNRS,* laboratoire Lattice, Montrouge
Silvia Melzi, *neuroscientifique,* chercheuse, université Claude Bernard Lyon 1
Manuel Eduardo Morales, *économiste,* université de Kaunas (Lituanie)
Hélène Morlon, *directrice de recherche CNRS,* Institut de biologie de l'École normale supérieure, Paris
Alondra Nelson, *directrice du bureau de la politique scientifique et technologique de la Maison-Blanche (OSTP),* Washington DC (États-Unis)
Fabrice Not, *biologiste marin,* directeur de recherche CNRS, Station biologique de Roscoff
Mathieu Noucher, *géographe,* chargé de recherche CNRS, laboratoire Passages, Bordeaux
Federica Paglialunga, *chercheuse,* École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse)
François Passelègue, *mécanicien des roches,* chargé de recherche CNRS, université Côte-d'Azur, Nice
Benoît Perez-Lamarque, *biologiste,* chercheur post-doctorant, Institut de biologie de l'École normale supérieure, Paris
Christelle Peyron, *neuroscientifique,* directrice de recherche CNRS, Centre de recherche en neurosciences de Lyon
Laurent Polidori, *géomaticien,* directeur de recherche CNRS, Centre d'études spatiales de la biosphère, Toulouse
Liva Ralaivola, *directeur de la recherche au Criteo AI Lab,* Paris
Jeanne Ropars, *biologiste,* chargée de recherche CNRS, laboratoire écologie, systématique, évolution, Orsay
Alexandre Schubnel, *mécanicien des roches,* chercheur CNRS, École normale supérieure, Paris
Marc-André Selosse, *biologiste,* professeur, Muséum national d'histoire naturelle, Paris
Patrice Simon, *chimiste,* professeur, université Toulouse-III-Paul-Sabatier
Emmanuel Trélat, *mathématicien,* professeur, Sorbonne Université, Paris
Vincent Zonca, *écrivain,* diplômé de l'École normale supérieure de Lyon, agrégé de lettres modernes

DANS LE PROCHAIN NUMÉRO, RETROUVEZ NOTRE
GRAND DOSSIER « LA NOUVELLE PRÉHISTOIRE »
SORTIE LE 16 JUIN 2022

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

L 13412 - 569 - F: 9,90 € - RD

• ALLEMAGNE 11.20 € • BELGIQUE 10.90 € • LUXEMBOURG 10.90 € • ITALIE 10.90 € • ESPAGNE 10.90 € • GRÈCE 10.90 €
• PORTUGAL PORT-CON 10.90 € • SUISSE 15.90 CHF • DOM/S 10.90 € • CANADA 16.50 $CAN • TOM/S 1320 XPF
• MAROC 102 MAD • TUNISIE 14.40 TND