Peter Gluckman
Conseil international des sciences, Paris
LES SCIENTIFIQUES DOIVENT ÊTRE MOINS ARROGANTS
p.6

Guilaine Lagache
Astronome, Marseille
DÉVOILER L'AUBE DE L'UNIVERS GRÂCE À L'INFRAROUGE
p.112

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE - JUILLET / SEPTEMBRE 2022 - 9€90

LA PRÉHISTOIRE REVISITÉE

- La révolution paléogénétique
- Introgressions anciennes
- Les étapes du peuplement humain
- Isotopes et régimes alimentaires
- Inégalités prénéolithiques
- Des paléoartistes accomplis

Géothermie
L'ÉNERGIE SOUS NOS PIEDS
p.84

Physique
LA MATIÈRE ACTIVE SYNTHÉTIQUE
p.92

Écologie
INONDATIONS ET ARCHIVES CLIMATIQUES
P.98

Biologie
LA FORME DES CHOUX
p.72

Mathématiques
LES GRAPHES ALÉATOIRES
p.106

mgen

GROUPE vyv

POUR SON AUTHENTICITÉ

J'AI CHOISI MGEN

MUTUELLE SANTÉ - PRÉVOYANCE

Martin Fourcade a choisi MGEN pour son engagement à protéger la santé des personnes en toutes circonstances. Authentiquement mutualiste, MGEN rend accessibles les meilleurs soins à tous. Rejoignez-la.

www.antigel.agency - 02209 - Mars 2021 - © Hervé Thouroude - Document publicitaire n'ayant pas de valeur contractuelle.

MARTIN FOURCADE

CHAMPION DU MONDE &
CHAMPION OLYMPIQUE
DE BIATHLON

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, immatriculée sous le numéro SIREN 775 685 399, MGEN Vie, immatriculée sous le numéro SIREN 441 922 002, MGEN Filia, immatriculée sous le numéro SIREN 440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du Code de la mutualité. MGEN Action sanitaire et sociale, immatriculée sous le numéro SIREN 441 921 913, MGEN Centres de santé, immatriculée sous le numéro SIREN 477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du Code de la mutualité. Siège social : 3 square Max-Hymans - 75748 Paris CEDEX 15.

Le pouvoir d'être humain

La visite des grottes ornées – ou de leurs très fidèles reproductions, comme celle de la grotte Cosquer, qui vient d'ouvrir à Marseille – est une expérience inoubliable. Que l'on contemple l'art pariétal de la grotte de Lascaux, qui remonte à environ 20 000 ans, ou les peintures de la grotte Chauvet – dont les premières, datées de 37 000 ans, font partie des plus anciennes au monde –, on est stupéfait par la maîtrise picturale des humains – des *Homo sapiens,* déjà – qui ont réalisé ces œuvres, ce qui fait dire à l'archéologue Carole Fritz qu'*« il n'y a pas d'enfance de l'art »* (lire p. 54).

Homo sapiens… Alors qu'il y a 300 000 ans coexistaient sur Terre cinq ou six espèces d'Hominines, elle est la seule, désormais, à peupler la planète. *« Ce remplacement de formes archaïques locales par une humanité que l'on appelle parfois "moderne" est certainement l'épisode le plus marquant de l'évolution humaine du dernier million d'années »*, expose le paléoanthropologue Jean-Jacques Hublin, qui détaille comment l'on comprend beaucoup mieux désormais, malgré la rareté des vestiges anciens, cette dynamique des populations (lire p. 29).

Philippe Pajot
RÉDACTEUR
EN CHEF

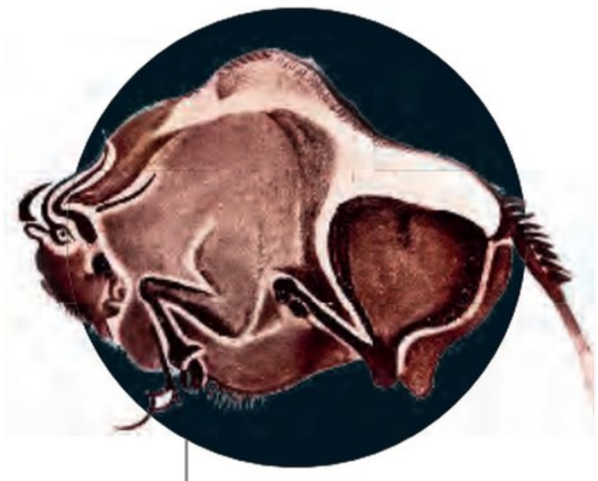
Au centre de ce renouvellement de la science préhistorique, des technologies qui permettent de retrouver et d'analyser les génomes anciens en reconstituant leur ADN à partir de fragments épars. Cette nouvelle science paléogénomique a d'abord révolutionné la paléontologie humaine en analysant l'ADN mitochondrial, moins fragile, révélant l'existence de lignées archaïques encore inconnues il y a quinze ans à peine, en particulier les Denisoviens (lire p. 24). Puis l'ADN nucléaire, celui qui se trouve dans le noyau des cellules, a pu commencer à être reconstitué, permettant d'établir des arbres de parentés témoignant de nouvelles histoires d'hybridations entre espèces anciennes. Aujourd'hui, c'est l'ADN de victimes de l'éruption de Pompéi qui vient d'être reconstitué à partir de fragments, bien que cet ADN ait été dégradé par des températures importantes (1). Demain, peut-être les préhistoriens n'auront-ils même plus besoin de restes identifiés pour travailler : il leur suffira de ramasser du matériau de l'environnement et d'analyser les petites molécules d'ADN pour faire parler le passé. Mais revenons à *Homo sapiens…* Quel est le moteur de sa conquête de l'intégralité des territoires de la planète et, peut-être un jour, de l'espace environnant ? Une curiosité insatiable, certainement. De l'ingéniosité scientifique, aussi. Deux caractéristiques dont ce numéro se fait l'écho. Et si, finalement, ce qui faisait de nous des humains était précisément cette capacité à nous interroger sur nous-même et à produire de l'art ? Une pensée à avoir si vous profitez de l'été pour visiter le riche patrimoine de grottes ornées que l'on trouve en France. ■

(1) G. Scorrano *et al., Sci. Reports, 12,* 6468, 2022.

BERNARD MARTINEZ

SOMMAIRE

Juillet / Septembre 2022 - n° 570



3 Édito

6 **GRAND ENTRETIEN AVEC PETER GLUCKMAN**
Président du Conseil international des sciences
« Nous, scientifiques, devons être moins arrogants »

14 Trois mois dans le monde

DOSSIER

16 **LA PRÉHISTOIRE REVISITÉE**

18 Repenser le temps long de l'histoire humaine
Anne Lehoërff

22 « Retisser le lien entre histoire très ancienne et histoire récente »
Entretien avec Boris Valentin

24 Sur les pas de nos cousins, les Dénisoviens
Diyendo Massilani et Stéphane Peyrégne

29 Les premiers *sapiens* européens
Jean-Jacques Hublin

32 Le peuplement de l'Océanie relu par la génétique
Jérémy Choin et Lluis Quintana-Murci

36 L'oppression des femmes existait-elle avant le Néolithique ?
Anne Augereau

41 Le soin des uns, le choix des autres
Valérie Delattre

44 Une lumière nouvelle sur l'alimentation au Paléolithique
Klervia Jaouen et Théo Tacail

48 L'habillement, une affaire de plus en plus ancienne
Lysianna Ledoux et Jacques Jaubert

50 Le jeu de pistes de la domestication du chien
Laurent Frantz

53 Conflits armés dans la vallée du Nil
Isabelle Crevecoeur

54 « Il n'y a pas d'enfance de l'art »
Entretien avec Carole Fritz

59 L'Histoire commence avec les tombes *Éric Crubézy*

62 Start-up : des technologies au service de l'archéologie
Pierre Vandeginste

FONDAMENTAUX

64 **PORTFOLIO** Coups de tonnerre dans l'atmosphère *Philippe Pajot*

72 **BIOLOGIE** Les mystères biologiques de la formation des choux-fleurs
François Parcy et Christophe Godin

78 **NEUROSCIENCES** La voix, une stratégie de soin pour les bébés prématurés *Manuela Filippa*

84 **ÉNERGIE**
De la chaleur sous nos pieds
Béatrice Ledésert

92 **PHYSIQUE** Les liquides actifs : du chaos à l'ordre
Denis Bartolo et Amélie Chardac

98 **GÉOSCIENCES** Décrypter les crues et leur évolution à partir d'archives naturelles
Bruno Wilhelm

106 **MATHÉMATIQUES** Transitions de phase dans les graphes aléatoires : une preuve inespérée
Nicolas Curien

112 **ASTROPHYSIQUE**
« L'aube de l'Univers se dévoile en infrarouge »
Entretien avec Guilaine Lagache

122 **HISTOIRE DES SCIENCES**
Champollion, la pierre de Rosette et les débuts de l'égyptologie
Laurent Coulon

LIVRES

130 La sélection de la rédaction

RÉFLEXIONS

134 Transition énergétique
Marie Dégremont

136 Numérique et IA *Arnaud Latil*

137 La chronique dessinée *Boulet*

138 Éthique *Jean-Gabriel Ganascia*

SCIENCE ET FICTION

140 Pourquoi les aliens ne nous aiment-ils pas ? *Laurent Vercueil*

THE UNIVERSITY OF AUCKLAND - WORLD HISTORY ARCHIVE / AURIMAGES - JORDAN VEGA - GIDEON MENDEL

LES ACTEURS, LES ÉVÉNEMENTS, LES AFFRONTEMENTS

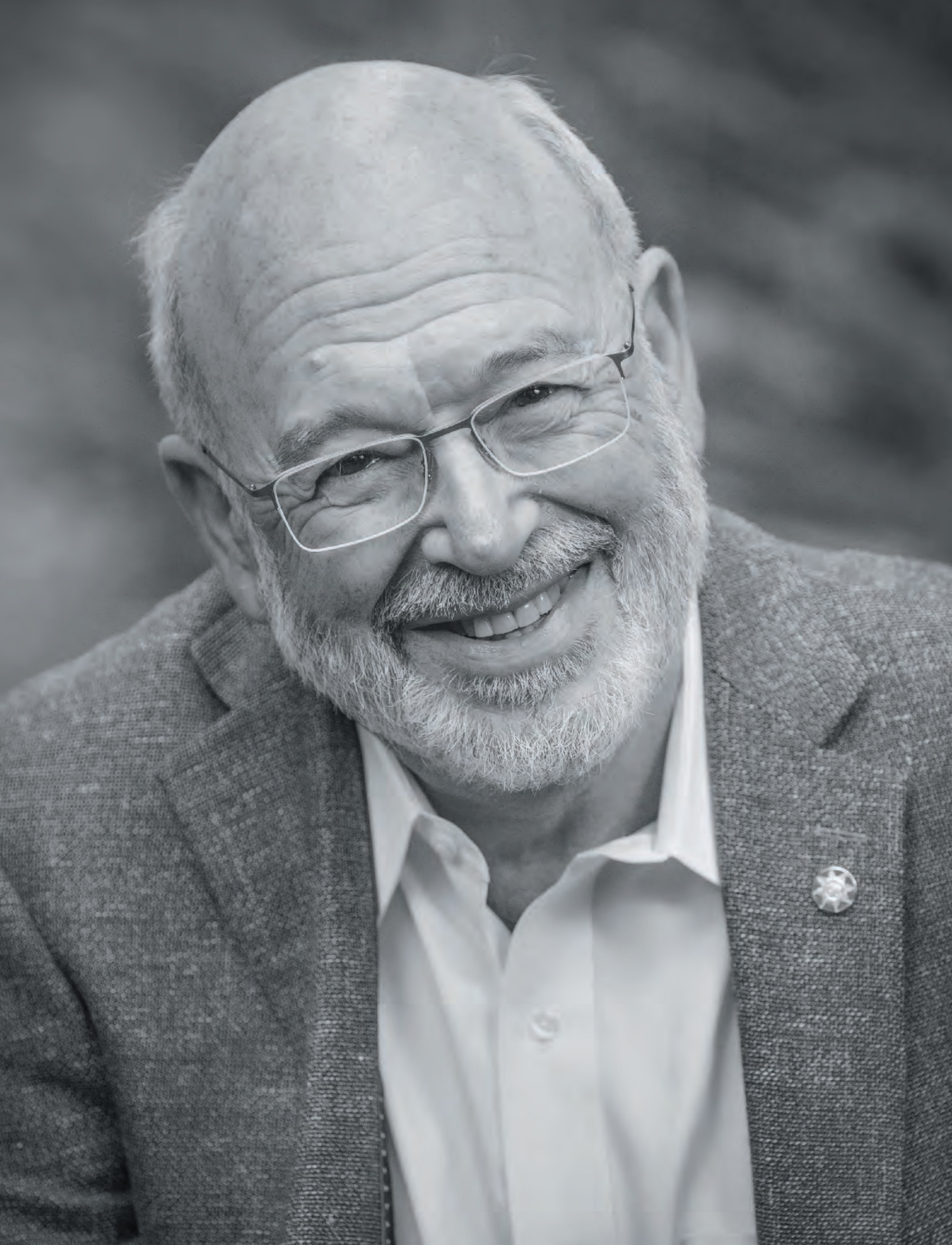
JOUR APRÈS JOUR, COMME ILS N'AVAIENT JAMAIS ÉTÉ MONTRÉS

LE LIVRE-ÉVÉNEMENT
60 ANS APRÈS
LES ACCORDS DE PAIX

500 PAGES
2000 PHOTOS

Historia

Les éditions du cerf



Entretien avec **Peter Gluckman**

PRÉSIDENT DU CONSEIL INTERNATIONAL DES SCIENCES

“NOUS, SCIENTIFIQUES, DEVONS ÊTRE MOINS ARROGANTS”

Amener les connaissances jusqu'à la politique est un art difficile, souligne Peter Gluckman, président du Conseil international des sciences. Le monde académique oublie parfois que c'est la politique qui décide, et qu'elle doit tenir compte d'une multitude d'autres aspects. L'ancien conseiller scientifique du gouvernement néo-zélandais décrit également comment les scientifiques de la région Asie-Pacifique du Sud-Est coopèrent, malgré une très grande diversité démographique et politique.

La Recherche À quoi ressemble le paysage scientifique de l'Asie-Pacifique du Sud-Est ?

Peter Gluckman En matière de recherche, nous avons deux superpuissances : Singapour et l'Australie. Singapour, petit pays de cinq millions d'habitants, fait bien mieux que son poids démographique en termes de contributions scientifiques. Cet État s'est rendu compte qu'en l'absence de ressources naturelles, son meilleur atout, ce sont les gens. Il a donc développé une politique d'accueil des scientifiques venant du monde entier. Singapour investit par ailleurs près de 2 % de son produit intérieur brut (PIB) dans la recherche, dispose de compétences très solides en sciences de l'ingénieur et en sciences de la vie, et met fortement l'accent sur l'innovation. L'Australie est l'autre puissance scientifique régionale ; elle dispose d'instituts de recherche remarquables dans tous les domaines – dont l'agence de recherche gouvernementale Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) –, d'une douzaine de lauréats du prix

THE UNIVERSITY OF AUCKLAND

BIO

- **1949** Naissance à Auckland (Nouvelle-Zélande).
- **1988** Professeur de biologie pédiatrique et périnatale à l'université d'Auckland, il mène des recherches en biologie de l'évolution et en épigénétique. Il publiera plus de 700 articles.
- **2001** Premier directeur de l'Institut Liggins à l'université d'Auckland.
- **2009** Premier conseiller scientifique du Premier ministre de Nouvelle-Zélande.
- **2014** Crée le Réseau international pour les conseils scientifiques gouvernementaux (INGSA).
- **2019** Fondateur et directeur du Koi Tū : The Centre for Informed Futures, consacré aux grands changements sociétaux et à l'intégration des connaissances dans les prises de décisions.
- **2021** Président du Conseil international des sciences (ISC), rassemblant plus de 200 académies des sciences et organisations de financement de la recherche nationales et régionales.

Nobel tels que l'astronome Brian Schmidt et la biologiste Elizabeth Blackburn, et d'un soutien philanthropique à la recherche sain. Le pays investit d'ailleurs dans la recherche 1,8 % de son PIB. La Nouvelle-Zélande y consacre une part moins importante – environ 1,4 % –, mais elle s'en sort relativement bien, notamment dans certains domaines de la recherche médicale, de la bio-ingénierie et de l'environnement. La Thaïlande et la Malaisie, elles, sont toutes deux en train de développer leur présence, cette dernière ayant clairement augmenté son financement de la recherche. Et de nombreux scientifiques des deux pays ont apporté des contributions importantes.

La région est très hétérogène : des démocraties côtoient des gouvernements autoritaires, des cités-États voisinent avec des pays-continents… Existe-t-il un sentiment de communauté chez les scientifiques ?

Pas de manière formelle. Cela est dû en partie à l'immense diversité des pays : nous avons de petits pays insulaires comme Nauru, dont la population avoisine les 10 000 habitants et, à l'autre bout du spectre, de grands pays comme le Vietnam, qui compte près de 100 millions d'habitants. Le niveau de puissance économique varie : Papouasie-Nouvelle-Guinée, Indonésie, etc. Il y a tout de même eu de bons programmes de recherche internationaux dans la région sur des sujets comme les sciences de la mer ou l'aide au développement. On compte aussi de nombreuses collaborations sur des sujets ciblés, par exemple la lutte contre les moustiques vecteurs de maladies, ou encore sur l'agriculture tropicale.

Comment s'organisent ces collaborations ?

Elles s'appuient souvent sur des relations informelles entre scientifiques, à l'échelle des individus, ou sont parfois soutenues par des initiatives collectives, comme l'Association scientifique du Pacifique ou les réunions scientifiques Asie-Pacifique. Les relations formelles, elles, sont essentiellement bilatérales, comme celles qui existent entre l'Australie et la Nouvelle-Zélande ou avec Singapour. Elles règlent aussi le partage de l'accès aux infrastructures de recherche, comme le cyclotron de Melbourne, avec lequel la Nouvelle-Zélande a des accords formels. Les scientifiques de pays comme l'Indonésie ou les Philippines sont de plus en plus connectés aux grandes puissances de la région, mais leurs systèmes scientifiques sont encore en phase de maturation.

La science occidentale est de plus en plus critiquée pour son hégémonie et son indifférence à l'égard des connaissances locales. Qu'en pensez-vous ?

Je préfère parler de science moderne – et non occidentale – car elle a intégré des connaissances issues de nombreuses cultures différentes, et pas seulement européennes. En outre, les méthodes de recherche utilisées en Chine ne diffèrent guère de celles qui ont cours aux États-Unis.

Cette critique de la science moderne pourrait-elle résulter d'un déséquilibre dans les collaborations ?

Il ne fait nul doute que trop de collaborations ont profité au pays financeur, économiquement puissant, plutôt qu'au pays bénéficiaire, économiquement plus faible. J'ai travaillé avec des scientifiques de petits États insulaires pour les aider à devenir responsables de projets de recherche internationaux – l'élaboration de meilleurs modèles de partenariat entre les pays du Nord et du Sud est d'ailleurs très importante pour le Conseil international de la science, ISC, dont je suis président. Une autre question concerne la relation entre la science moderne et les systèmes de connaissances indigènes, en particulier dans les pays où les communautés locales sont fortes, comme la Malaisie, la Papouasie-Nouvelle-Guinée, l'Australie ou la Nouvelle-Zélande. Il s'agit d'une question complexe, et il n'existe pas de consensus sur la meilleure façon d'y répondre. D'un point de vue épistémologique et ontologique, cette discussion devrait être raisonnablement facile à mener, mais elle est très sensible, en raison des dimensions de justice sociale qu'implique la nécessité de traiter les reliques de la colonisation.

Quelle serait votre suggestion pour avancer sur cette question ?

La science est un ensemble de processus visant à mieux comprendre le monde sur la base d'explications rationnelles. Elle a toujours interagi avec des personnes qui ont des visions du monde, des systèmes de croyances et des connaissances locales différents. Ce dernier point apporte une autre dimension, car certaines de ces connaissances peuvent informer la science. Il s'agit donc

L'art de conseiller la politique

Présenter des données et lister des préconisations ne suffit pas. Peter Gluckman a synthétisé dix règles d'or à adopter pour donner du poids à la science dans les prises de décisions politiques.

1 Écouter les besoins des décideurs pour leur fournir le type d'évaluation scientifique qui leur est utile au bon moment. Des informations non sollicitées ont peu de chances d'avoir un impact.

2 Considérer le cycle de l'action politique – agenda politique, élaboration des politiques, prise de décision, implémentation et évaluation – pour comprendre le type d'analyse désiré et son objectif : le pour et le contre d'une technologie pour anticiper des régulations à venir ? Une liste d'options avec l'évaluation de leurs conséquences ? L'analyse d'une mesure ?

▲ *Session plénière lors des négociations climatiques onusiennes, à Bonn, en 2015.*

3 S'assurer auprès des décideurs politiques que la question posée est vraiment la bonne. Par exemple, l'évaluation de l'efficacité d'un test peut être demandée alors que les politiques voudraient savoir avant tout si la campagne de tests elle-même est nécessaire.

4 Évaluer l'étendue et la qualité des informations scientifiques synthétisées, identifier les points manquants et y remédier. Il faut intégrer des évaluations multidisciplinaires incluant les sciences humaines.

5 Communiquer le consensus scientifique lorsqu'il existe ou, dans le cas contraire, les différentes positions mais sans donner au politique le rôle d'arbitre.

6 Expliciter la solidité de l'évaluation scientifique, ses incertitudes, limites et faiblesses, et faciliter la compréhension à l'aide d'indices ou de tableaux. Anticiper le risque de voir les chiffres et graphiques instrumentalisés, ou que l'absence de la preuve d'un effet soit comprise comme la preuve de son absence.

7 Reconnaître le fossé déductif entre une connaissance et une conclusion.

8 Accepter que la prise de décision politique inclut toujours des considérations de valeurs.

9 Considérer dans l'analyse scientifique les éventuels impacts sociétaux négatifs des options considérées.

10 S'assurer que la forme de la communication choisie permette au conseil d'être compris et assimilé par les décideurs.

UNFCCC/IISD

de les respecter, mais sans prétendre qu'elles sont synonymes de science. Pour relever ce défi, il faut accepter les approches transdisciplinaires et de coconception, couramment utilisées lorsque des scientifiques de différentes disciplines interagissent ou s'engagent avec des acteurs de la société.

Quelles leçons faut-il tirer des conseils scientifiques donnés lors de la pandémie de Covid-19 ?

Primo, avant le Covid-19, les chercheurs avaient bien prédit le risque élevé d'une pandémie de virus zoonotique dans les années à venir. Les alertes ont été nombreuses et argumentées. Beaucoup de gouvernements avaient inscrit le risque de pandémie dans leur registre des risques, mais le niveau de préparation était plutôt faible – c'est la même situation avec le changement climatique : des preuves très claires des dangers, mais une action pas assez efficace. Secundo, le système multilatéral n'était pas prêt à faire face à une pandémie. La notification et les réponses ont été lentes. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) travaille actuellement à l'élaboration d'un nouveau traité sur les pandémies, et il est clair que nous devons réformer de toute urgence son Règlement sanitaire international, une loi juridiquement contraignante visant à lutter contre les pandémies. Tertio, il faut distinguer les conseils donnés en situation d'urgence de ceux donnés dans des conditions normales. La phase aiguë de démarrage de la pandémie a été

très inhabituelle. En partie parce que beaucoup pensaient que le Covid-19 n'était qu'une autre version de la grippe, ce qui a influencé le type de modélisation, de recommandations et de décisions. Les choses devaient se faire dans l'urgence, et certains pays ont pris des décisions en sous-estimant le potentiel du Covid-19, avec des conséquences très dommageables. Cependant, l'incertitude était grande et il est facile d'être critique après coup – nous devons apprendre pour la prochaine fois… Enfin, félicitons la collaboration scientifique internationale entre les secteurs public et privé, qui a permis de produire des vaccins en un temps record.

Avez-vous constaté des erreurs flagrantes du côté des scientifiques durant la pandémie ?

Certaines des premières modélisations étaient inadéquates, car elles négligeaient les effets du comportement humain. Il y avait également une compétition entre les scientifiques pour faire entendre leur voix, qui a joué en leur défaveur. Ce fut le cas par exemple au Royaume-Uni, où il existait un conseil scientifique officiel, le «*Sage*», et un autre, non officiel, appelé «*Independent Sage*». Les gouvernements ont eu du mal à donner un sens à ces voix divergentes.

Les politiciens ont semblé très irrités par les critiques émanant des scientifiques…

Il s'agit là d'un phénomène général. En tant que scientifiques, nous nous devons d'être beaucoup moins arrogants. De nombreux chercheurs sont devenus des célébrités nationales pendant la pandémie. Régulièrement invités dans les médias, certains ont semblé y prendre goût et ont peut-être perdu la mesure nécessaire. Il faut faire très attention à la façon dont vos commentaires vont être perçus – par exemple, il n'est pas utile de dire «*je vous l'avais dit*» aux politiciens, alors que ceux-ci sont élus pour prendre des décisions difficiles dans des circonstances où les connaissances sont parfois très limitées.

Comment éviter que la science soit politisée, comme elle l'a été par exemple sous la présidence de Donald Trump aux États-Unis ?

La science a toujours revêtu une dimension politique : la pseudo «science des races» et la prétendue «science eugéniste», apparues dans la seconde moitié du XIXe siècle, ont contribué à l'avènement des régimes fascistes. Je crains que la méfiance envers la science soit devenue un insigne politique dans notre ère de la «post-vérité». Sans compter que certains sélectionnent quelles connaissances scientifiques ils acceptent de prendre en considération et de croire, comme s'il s'agissait d'un choix à la carte. Ainsi, certains, à droite, nient la science du changement climatique pour couvrir d'autres intérêts, tandis que d'autres, à gauche, s'opposent aux cultures génétiquement modifiées pour des motifs philosophiques qui peuvent être authentiques, mais ne relèvent pas de la science. Il s'agit d'une véritable menace pour la façon dont la science peut faire progresser la condition humaine et le sujet de la durabilité. L'un des grands défis est de faire reculer cette politisation excessive.

Plus les scientifiques interagissent avec la politique, plus ils seront accusés d'être politiques. Ce qui met en danger la neutralité perçue de la science. Comment y remédier ?

Il faut un cadre approprié pour le conseil scientifique. Cette activité doit être indépendante, aussi transparente que possible et ses acteurs ne doivent pas être nommés par les politiques. Deux composantes doivent être soigneusement conçues. La première concerne la synthèse et le résumé des preuves scientifiques disponibles. Cela peut être fait par des comités d'experts scientifiques coordonnés par des académies des sciences, des unités d'évaluation des technologies ou, au niveau international, par des organisations telles que le Giec, pour le climat, ou la Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES, pour la biodiversité). La deuxième composante, c'est le «courtage de connaissances», à savoir la transmission de cette synthèse et de ses implications aux décideurs politiques, en s'assurant que ces informations répondent à leurs besoins. Un diffuseur doit être capable d'entrer en contact avec la communauté scientifique pour obtenir une synthèse des données et la transmettre à la communauté politique.

Comment ce courtage fonctionne-t-il le mieux ?

Il est préférable de le faire en tête-à-tête ou dans le cadre de réunions informelles, où vous avez plus de chances de pouvoir expliquer à un responsable politique de haut niveau ce que dit la science ou de souligner l'urgence d'une question. Cela donne l'occasion d'avoir des discus-

CASSANAS SIMON

“Le rôle du « courtier » est de transmettre à la communauté politique une synthèse des données scientifiques”

sions franches. Un ministre hésitera à admettre devant une commission qu'il ne sait pas quelque chose, mais il se sentira plus à l'aise en présence d'une personne qu'il connaît.

Qui peut être courtier de connaissances ?

Cela peut être le président d'une académie des sciences ou un conseiller scientifique indépendant relevant du gouvernement, comme c'est le cas en Nouvelle-Zélande ou au Royaume-Uni. Il doit gagner la confiance de nombreuses parties prenantes : avant tout celle des décideurs – et aussi, idéalement, celle des partis d'opposition, pour éviter que ses conseils ne soient qualifiés de politiques –, celle des médias et, bien sûr, celle de la communauté scientifique. Il doit à la fois rester fidèle à la science et la communiquer de manière qu'elle soit comprise par son public. Il ne doit jamais oublier que la science analyse et que la politique décide. Les conseillers scientifiques doivent respecter cette séparation. Ils peuvent avoir des opinions personnelles sur la politique, l'économie ou la diplomatie, mais doivent les garder pour eux. Ce sont les décideurs politiques qui doivent trouver un équilibre entre les options disponibles, les conséquences de ces différentes options, les intérêts des diverses parties prenantes et le contrat électoral qui les lie aux citoyens dans une démocratie.

Quelles sont les compétences nécessaires ?

D'innombrables scientifiques et organisations excellent dans l'art de rassembler des preuves et de les analyser. Mais ils sont moins nombreux à posséder les compétences diplomatiques et interprétatives nécessaires pour faire le lien entre science et politique. Il faut vraiment comprendre la culture des décideurs politiques, la manière dont ils interpréteront les informations qui leur seront fournies. Il faut par ailleurs comprendre leur culture, leur langage corporel, leurs coutumes. C'est pourquoi certains rapports rédigés par les académies des sciences ont souvent peu d'impact, car ils ont tendance à être rédigés pour la communauté scientifique plutôt que pour le décideur politique.

Les avis scientifiques devraient-ils s'appuyer davantage sur des scénarios, en offrant un véritable choix aux décideurs politiques plutôt que de leur dire quoi faire ?

C'est exactement ce que font les bons avis scientifiques. Toute décision politique est un choix entre différentes options. Il faut également leur exposer honnêtement les incertitudes et les réserves, ce qui est connu et ce qui est inconnu. Travailler avec des fourchettes de chiffres plutôt qu'avec des chiffres uniques, expliquer les hypothèses qui sous-tendent les modèles. Et surtout, il faut être très conscient de l'écart entre ce que l'on sait et ce que l'on conclut. Les politiciens savent gérer l'incertitude, souvent mieux que les scientifiques, et sont conscients qu'il y a toujours des retombées.

Que pensez-vous des rapports du Giec : sont-ce de bons outils de conseil scientifique ?

Ils font un travail remarquable en consolidant et en résumant les preuves. Mais leur courtage n'est pas parfait : les résumés destinés aux décideurs sont encore trop complexes pour de nombreux fonctionnaires. De plus, le Giec ne cible pas bien certaines personnes qui peuvent faire la différence : les politiques nationaux. Bien qu'un

consensus international sur la science du changement climatique soit nécessaire, il faut aussi convaincre les acteurs nationaux d'agir.

Début 2022, des scientifiques néo-zélandais ont réclamé un moratoire sur la science du changement climatique. Que pensez-vous de cette initiative ?

Il est important de poursuivre la recherche sur le changement climatique, pour mieux savoir quel sera l'avenir des glaciers ou comment le niveau des mers augmentera. Mais les résultats des sciences sociales, comportementales et décisionnelles nous font vraiment défaut. Nous devons comprendre pourquoi les décideurs politiques ne réagissent pas, pourquoi les communautés disent qu'elles craignent le changement climatique alors qu'elles ne modifient pas leurs comportements, comment convaincre la société de penser à long terme, de manière intergénérationnelle, et d'accepter les transitions économiques alors que les impacts les plus évidents ne seront peut-être pas visibles avant des décennies. Ces questions sont assez nouvelles, car ce n'est que récemment que nous avons été en mesure de nous projeter dans l'avenir comme l'a montré le Giec. Nous ne disposons pas des compétences nécessaires.

Les pandémies et la guerre en Ukraine ont montré que les gouvernements et les entreprises peuvent agir rapidement, et accepter le type de sacrifices économiques nécessaires pour lutter contre le changement climatique. Une raison d'espérer ?

Il est malheureusement difficile d'être optimiste. En cas d'urgence, le public peut s'accomoder des décisions qu'il n'accepterait pas dans une situation normale ou après la crise. Or un trop grand nombre de gens ne perçoivent pas le changement climatique comme une urgence.

Quel est votre avis sur les sanctions prises à l'encontre de la science russe, à la suite du déclenchement de la guerre en Ukraine ?

La guerre lancée par Vladimir Poutine est horrible et inacceptable. Mais le Conseil international de la science défend l'idée que la science constitue un bien public mondial. Cela signifie que nous devons entretenir des relations et des coopérations avec tous les pays si nous voulons résoudre des problèmes mondiaux cruciaux tels que le changement climatique et la durabilité. Nous ne pouvons pas compromettre l'avenir de la planète à cause de tensions politiques avec la Russie qui vont probablement durer pendant plusieurs années. Nous devons être prêts à utiliser la diplomatie scientifique – lorsque le moment sera venu – pour tenter de panser les plaies. La science a joué un rôle similaire durant la guerre froide. Les sanctions globales telles que celles prises à l'encontre de la Russie soulèvent de plus la question de savoir où tracer les limites. Les sanctions prononcées contre les institutions sont une chose, celles prises contre les individus en sont une autre. Elles entraveront les relations personnelles qui pourraient être à l'origine de changements positifs.

Les scientifiques sont encouragés à s'impliquer dans la communication scientifique et à interagir avec la société. Ne devraient-ils pas avoir le droit de se concentrer sur leur tâche principale, à savoir la recherche ?

La science doit être pleinement accessible au public, notamment parce qu'il l'a financée. Mais cela ne signifie pas que tout scientifique doive devenir un communicateur. Il y a des professions et des personnalités très diverses dans la science, de la même manière qu'il y a des médecins qui travaillent au contact des patients et d'autres qui exercent en laboratoire. Il est déjà assez difficile pour les scientifiques de parler à des collègues d'autres disciplines, étant donné l'existence de jargons spécialisés très différents, nous ne devrions donc pas attendre d'eux qu'ils soient également tous compétents pour s'adresser à la société. ■

Propos recueillis par Daniel Saraga

“La science doit être accessible au public, ce qui ne veut pas dire que tout scientifique doive être un communicateur”

72H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER
LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

GRAND OCEAN

DU 7 AU 9 OCT. 2022

À LA CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN
À SAINT-VAAST-LA-HOUGUE

& EN DIGITAL

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

Cherbourg en Cotentin
leCotentin Communauté d'Agglomération
Naval Group

Partenaires Associés

La Manche Le Département
Région Normandie

Partenaires

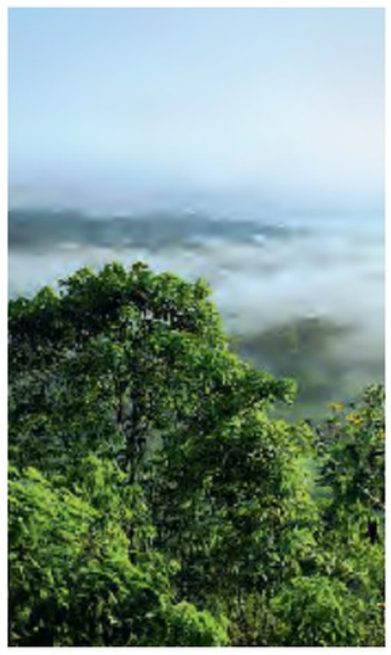
CMN
SFA Agitateur d'eau

Organisé par

Les Echos Le Parisien Événements
Sciences et Avenir La Recherche

TROIS MOIS DANS LE MONDE

La recherche est souvent une histoire de temps long. Nouvelle démonstration avec ce florilège de l'actualité scientifique du dernier trimestre. Au menu : trou noir, épave centenaire ou encore génome humain.



▲ 7 mars
La forêt amazonienne pourrait bientôt ne plus être une forêt.

▲ 8 mars
Le rover Perseverance a mesuré la vitesse du son sur Mars.

▲11 avril
Un espoir pour les malades de Parkinson.

4 MARS

Des chercheurs français affirment avoir trouvé un moyen de déstabiliser la barrière hémato-encéphalique afin d'améliorer l'accès au cerveau par des molécules thérapeutiques. Une première.
K. Boyé *et al.*, *Nat. Commun.*, *13*, 1169, 2022.

7 MARS

La forêt amazonienne est proche du point de non-retour qui la verrait devenir une savane plutôt qu'une forêt tropicale.
C. A. Boulton *et al.*, *Nat. Clim. Change*, *12*, 271, 2022.

8 MARS

240 mètres par seconde (m/s) : c'est la vitesse du son sur la planète Mars, mesurée par les deux microphones du rover Perseverance de la Nasa. Sur Terre, le son se déplace à 340 m/s.
https://tinyurl.com/sound-speed-mars

9 MARS

▶ Décès du premier patient au monde à avoir reçu une greffe de cœur d'un porc génétiquement modifié, deux mois après son opération (lire *La Recherche* n° 569, p. 14).
https://tinyurl.com/death-pig-heart-patient

▶ Plus de cent ans après avoir coulé, le bateau de l'explorateur Ernest Shackelton, réputé comme étant l'épave la plus inaccessible du monde, est retrouvé dans la mer de Weddell (Antarctique) par 3 000 mètres de fond !
https://tinyurl.com/Decouverte-Endurance

23 MARS

Le prix Abel, l'une des plus prestigieuses récompenses en mathématique, est décerné à l'Américain Dennis Sullivan pour ses travaux sur la topologie et les systèmes dynamiques.
https://tinyurl.com/5h5rep65

24 MARS

Le sang humain contiendrait des particules de microplastiques, d'après une étude néerlandaise. C'est la première fois qu'une telle pollution du corps humain est prouvée. Les risques sanitaires sont inconnus.
H. A. Leslie *et al.*, *Environ. Int.*, *163*, 107199, 2022.

31 MARS

▶ Enfin ! Vingt ans après l'annonce du séquençage du génome humain en 2001, une équipe américaine publie les résultats du séquençage des 8 % qui manquaient à l'appel. Parmi eux, la séquence complète du chromosome Y.
S. Nurk *et al.*, *Science*, *376*, 44, 2022.

▶ Le télescope Hubble détecte la plus lointaine étoile jamais observée, Earendel, située à 12,9 milliards d'années-lumière de notre planète.
B. Welch *et al.*, *Nature*, *603*, 815, 2022.

4 AVRIL

▶ Parution du troisième volet du nouveau rapport du Giec, qui détaille les actions à engager en matière d'atténuation et d'adaptation face au réchauffement global. Pour limiter celui-ci à 1,5 °C, l'humanité devra atteindre son pic d'émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2025, puis réduire ces dernières de 43 % d'ici à 2030.
https://tinyurl.com/Rapport-du-GIEC

11 AVRIL

Premiers résultats encourageants pour un essai clinique contre la maladie de Parkinson. Quatre patients à court d'options thérapeutiques, qui ont bénéficié d'une nouvelle technologie permettant de délivrer en continu la dopamine dont ils manquent directement dans le cerveau, ont vu diminuer de deux tiers les surdosages ainsi que les mouvements et immobilisations involontaires caractéristiques de la maladie.
https://tinyurl.com/injection-dopamine-cerveau

13 AVRIL

Une équipe d'archéologues américains annonce avoir mis la main, au Guatemala, sur des fragments d'un calendrier rituel maya datant

DEZALB/PIXABAY - NASA/JP CALTECH - CHU LILLE

du IIe ou IIIe siècle avant notre ère, ce qui en ferait le plus ancien trouvé à ce jour.
D. Stuart *et al.*, *Sci. Adv.*, doi : 10.1126/sciadv.abl9290, 2022.

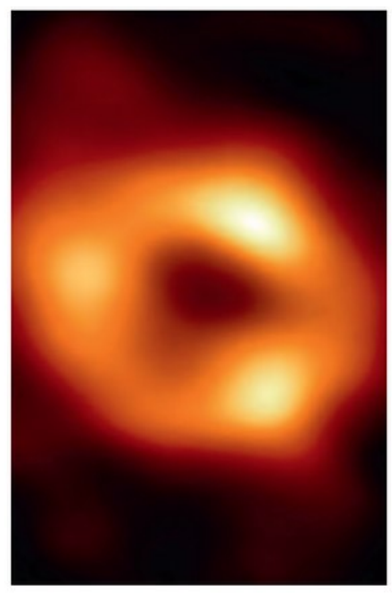
26 AVRIL
Les cinq bases du vivant (adénine, thymine, cytosine, guanine et uracile), nécessaires à la synthèse de l'ARN et de l'ADN, ont été détectées sur des échantillons de météorites carbonées.
Y. Oba *et al.*, *Nat. Commun.*, *13*, 2008, 2022.

27 AVRIL
Jusqu'à 40 % de la surface des terres est dégradée, d'après un rapport de la convention des Nations unies contre la désertification. Les scientifiques proposent plusieurs scénarios d'action afin de lutter contre ce phénomène.
https://tinyurl.com/rapport-desertification

5 MAI
14,9 millions de décès supplémentaires ont été associés à la pandémie de Covid-19 en 2020 et 2021, d'après un nouveau rapport de l'OMS.
https://tinyurl.com/surmortalite-Covid-19

12 MAI
Le groupe de recherche international officiant sous la bannière de l'Event Horizon Telescope révèle la première image du trou noir qui réside au centre de la Voie lactée, Sagittarius A*.
K. Akiyama *et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, *930*, L12, 2022.

▲ 13 avril
Voici le plus ancien calendrier rituel maya jamais trouvé.



▲ 12 mai
Sagittarius A* montre enfin son visage.

À VENIR

DU 4 AU 8 JUILLET LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'OPTIQUE ORGANISE SON CONGRÈS À NICE. Y INTERVIENDRONT NOTAMMENT ALAIN ASPECT ET JEAN DALIBARD, MÉDAILLES D'OR DU CNRS.
https://tinyurl.com/congres-sfo-nice

EN AOÛT LA NASA PRÉVOIT DE LANCER LA SONDE PSYCHÉ EN DIRECTION DE L'ASTÉROÏDE DU MÊME NOM. SA MISSION PRINCIPALE EST DE DÉCOUVRIR SI CELUI-CI EST LE CŒUR D'UNE PROTOPLANÈTE OU BIEN UN ASTÉROÏDE RICHE EN MÉTAUX.
https://psyche.asu.edu/

DU 12 AU 14 SEPTEMBRE SE TIENT LE 16^E CONGRÈS SUR LES VACCINS SUR LES RIVES DU LAC DE GARDE (ITALIE). IL Y SERA QUESTION DES INTERACTIONS VACCINS/IMMUNITÉ, DE LA VACCINATION EN AGRICULTURE, ETC.
https://tinyurl.com/16th-Vaccine-Congress

AU FIL DES TWEETS

De l'Antarctique à l'Égypte, en passant par l'Ukraine… Notre sélection de fils Twitter scientifiques vous fait voyager un peu partout sur la planète, ce trimestre.

Prof. Akiko Iwasaki (@VirusesImmunity), *virologue à l'université Yale (États-Unis),* résume dans ce fil les récentes découvertes faites sur des variants du SARS-CoV2 et leur capacité à interagir avec le système immunitaire de l'hôte. En l'occurrence, on y apprend comment le coronavirus inhibe l'expression de certaines protéines de surface dans le but d'échapper à certains lymphocytes T, en charge de détruire les cellules infectées.
https://tinyurl.com/Akiko-Iwasaki

Alex Wild (@Myrmecos), *conservateur à l'université du Texas à Austin (États-Unis),* propose, dans cette série de messages, un voyage en photos dans l'univers des œufs d'insectes. De toutes les formes et de toutes les couleurs, ces pupes d'insectes sont fascinantes.
https://tinyurl.com/Alex-Wild

Pierre Tallet (@PierreTallet), *égyptologue à Sorbonne Université, Paris,* nous fait suivre au jour le jour la nouvelle campagne de fouilles que son équipe et lui ont menée, entre le 10 mars et le 11 avril, sur le site du Ouadi el-Jarf, un port de l'Ancien Empire (environ 2 700 à 2 200 avant notre ère) situé sur le bord de la mer Rouge.
https://twitter.com/PierreTallet

Anna Colin Lebedev (@colinlebedev), *historienne spécialiste des sociétés postsoviétiques à l'université Paris-Nanterre,* donne ici une liste – non exhaustive – de jeunes chercheurs francophones travaillant sur l'Ukraine, pour

tous ceux qui veulent s'informer de manière approfondie sur le pays et l'invasion contre laquelle il lutte.
https://tinyurl.com/Anna-Colin-Lebedev

Dr. Robert Rohde (@RARohde), *physicien à l'université de Berkeley (États-Unis),* revient sur l'invraisemblable épisode de chaleur survenu en Antarctique en début d'année. Les scientifiques de la base de Concordia ont en effet enregistré une température de – 10 °C au lieu d'un habituel – 50 °C pour cette période de l'année. Inquiétant !
https://tinyurl.com/Robert-Rohde

John Speakman (@JohnSpeakman4), *professeur de zoologie à l'université d'Aberdeen (Écosse),* présente la nouvelle publication de son équipe, qui nuance une assertion couramment partagée selon laquelle avoir un métabolisme rapide réduirait la durée de vie des organismes. Le travail du groupe de John Speakman introduit un facteur souvent délaissé : la température corporelle comme régulateur de durée de vie.
https://tinyurl.com/John-Speakman

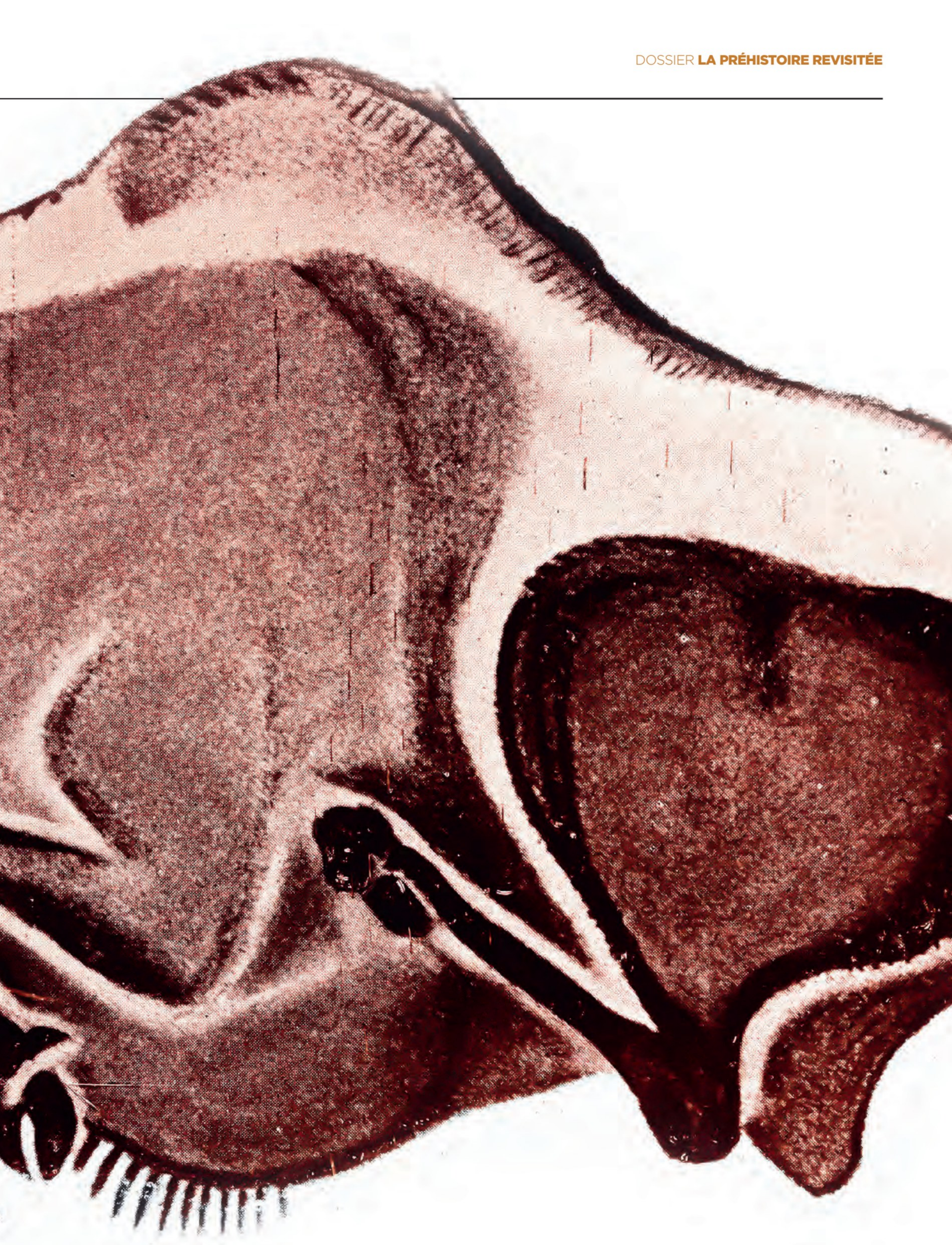
KARL TAUBE, COURTESY OF THE PROYECTO REGIONAL ARQUEOLÓGICO SAN BARTOLO-XULTUN. - EHT COLLABORATION - DR

LA PRÉHISTOIRE REVISITÉE

Nos connaissances sur la Préhistoire ont été profondément renouvelées ces dernières années. Qu'il s'agisse des espèces humaines, du peuplement des continents, de l'organisation des sociétés, des pratiques alimentaires ou encore de l'apparition de l'art et des rites funéraires, les découvertes se multiplient, bouleversant notre approche de cette période fascinante, qui s'étend sur plus de trois millions d'années. Pour reconstituer la réalité de ces temps reculés, dont il subsiste très peu de traces, l'analyse des fossiles et artefacts issus de fouilles archéologiques reste le moyen privilégié. Elle a largement bénéficié de l'irruption de nouvelles technologies, au premier rang desquelles la paléogénomique (étude de l'ADN ancien), et de la collaboration croissante avec des spécialistes d'autres disciplines (chimie, etc.).

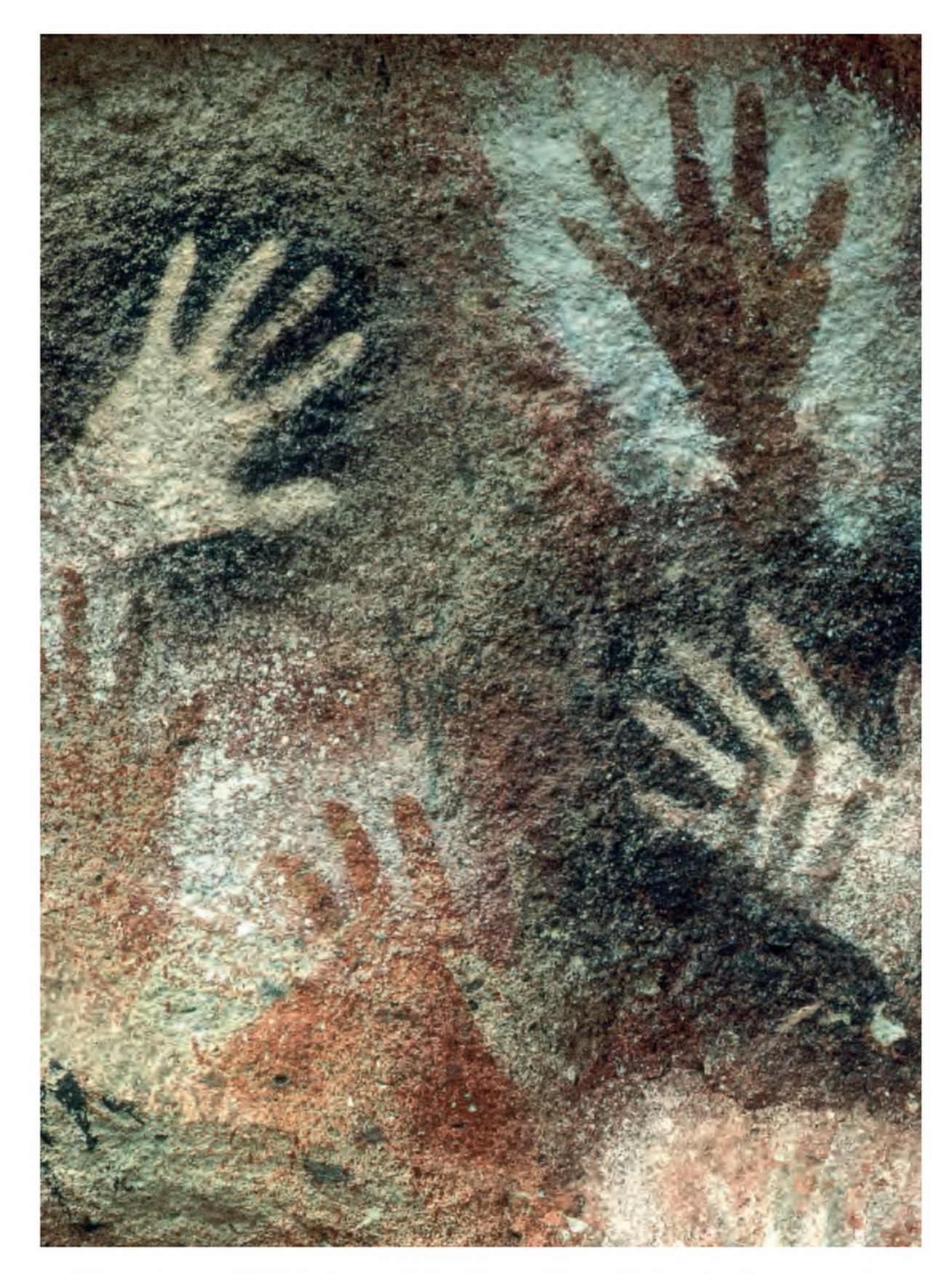
WORLD HISTORY ARCHIVE / AURIMAGES

▶ *« Le bison couché retournant la tête » est un relevé provenant de la grotte d'Altamira, en Espagne, découverte en 1879 et datant du Magdalénien, culture archéologique de la fin du Paléolithique supérieur (qui s'étend entre environ 17 000 et 14 000 ans avant notre ère).*



Repenser le temps long de l'histoire humaine

Plus de cent ans après la parution du roman de J.-H. Rosny Aîné, *La Guerre du feu,* qui a marqué l'imaginaire collectif, notre connaissance de la Préhistoire a considérablement évolué. Les chercheurs ont repoussé les limites réelles, méthodologiques et intellectuelles sur cette période, en la revisitant littéralement.



▲ *Mise au jour en 1876, la Cueva de las Manos (Argentine) présente un grand nombre de mains négatives. Celles exposées ci-dessus datent d'il y a 9 000 ans.*

DANIELLE PELLEGRINI / SCIENCE PHOTO LIBRARY / SUCRÉ SALÉ

« *Les Oulhamr fuyaient dans la nuit épouvantable. Fous de souffrance et de fatigue, tout leur semblait vain devant la calamité suprême : le Feu était mort.* » Cet incipit du roman de J.-H. Rosny Aîné, *La Guerre du feu,* annonce la catastrophe qui vient de s'abattre : l'extinction du feu et de ses bienfaits. Paru en 1911, le livre rencontra un énorme succès, toujours d'actualité puisque l'ouvrage n'a cessé d'être réédité.

L'année n'est pas anodine, la forme non plus. À cette date, la « Préhistoire » existe. Le mot a été officiellement adopté en 1867 par les savants réunis à Paris pour l'Exposition universelle, après diverses tentatives de dénomination pour désigner ce temps ancien, surgi d'un passé très lointain et auquel personne ne s'attendait un siècle plus tôt, tout au moins pas sous cette forme. Depuis les années 1820, la Préhistoire s'est imposée grâce à différentes découvertes en Europe et bientôt hors de ses frontières. Plus encore, elle a débordé le monde de la science. Le public s'en est emparé, avide de comprendre les origines de l'humanité. Prudents et mesurés, les savants de l'époque n'osèrent pas mettre en récit une telle épopée. Ce fut donc un écrivain, Rosny, qui se lança. Son talent fit le reste.

En 2022, en introduction d'un dossier consacré à la Préhistoire qui invite à revisiter cette période grâce aux connaissances actuelles, *La Guerre du*

feu a-t-elle sa place ? Étonnamment, le texte a encore valeur pédagogique pour deux raisons principales. La première tient au fait que les attentes du public restent inchangées. L'*Homo sapiens* du XXIe siècle est toujours aussi attiré par la Préhistoire. Sa curiosité a, de surcroît, été nourrie par les multiples découvertes réalisées depuis le début du XXe siècle, étudiées par des méthodes de plus en plus nombreuses et dont les possibles semblent parfois extraordinaires. La Préhistoire, de ce point de vue, occupe une place à part en archéologie comme dans l'imaginaire collectif, avec laquelle les chercheurs doivent composer, qu'il leur faut parfois rectifier (déconstruire les mythes) mais qui leur sert également à promouvoir leurs travaux. La seconde raison tient dans son contenu. Tout y est vrai et tout y est faux. Plusieurs thématiques qui traversent l'ouvrage sont toujours d'actualité : la question des peuplements, l'alimentation, l'habillement, les rapports entre les humains et les milieux, etc. En même temps, tout est faux car les descriptions sont souvent simplistes, parfois erronées, au point que le monde préhistorique de Rosny y est impossible. Des animaux y coexistent sans avoir jamais vécu de manière contemporaine ou ne sont attestés par aucune documentation archéologique, les paysages ne tiennent pas compte des réalités climatiques, le temps est dilué dans une forme de flou qui intègre une aventure ponctuelle à une échelle temporelle difficile à atteindre par les chercheurs, celle de l'événementiel.

Anne Lehoërff
ARCHÉOLOGUE, CY CERGY PARIS UNIVERSITÉ
Professeur des universités sur une chaire d'excellence Inex, « Archéologie et Patrimoine », elle a publié récemment L'Archéologie *(PUF – Que sais-je ?, 2019, nouvelle édition 2022),* Préhistoires d'Europe *(Belin, 2016, édition en poche 2022),* Le Néolithique *(PUF – Que sais-je ?, 2020) et* Dictionnaire amoureux de l'archéologie *(Plon, 2021).*

ANNE LEHOËRFF

DES REPÈRES CHRONOLOGIQUES

Plus d'un siècle de recherche sur ces sujets a permis de passer de la fiction à l'histoire, et de poser peu à peu un regard différent sur ces époques, y compris au-delà du cercle restreint des préhistoriens. Déjà, l'École des Annales, fondée en 1929 par les historiens Marc Bloch et Lucien Febvre, militait pour une mobilisation de toutes les sources. Cette réalité prit du temps et nécessita une évolution des esprits et la mise en œuvre de méthodes (des sciences historiques, mais aussi du vivant et de la Terre), qui démontraient la capacité à comprendre les sociétés du passé à partir de traces matérielles. L'un des apports majeurs du XXe siècle a été d'offrir des repères chronologiques. Par la datation, le temps s'est allongé, étendant les limites des origines humaines, et il s'est affiné, permettant d'approcher l'humain (*homo* et ses prédécesseurs) dans son quotidien. L'ensemble de ce dossier souligne cette réalité chronologique qui sort du « flou » les sociétés de la Préhistoire. Dans ce cadre, les chercheurs ont repoussé les limites réelles et méthodologiques (dont des technologies de pointe), mais aussi intellectuelles, revisitant littéralement ce qui fut nommé « Préhistoire ». Les textes rassemblés ici montrent le chemin parcouru : la question de la violence est posée par les travaux des paléoanthropologues, celle de l'alimentation par les études environnementales et en particulier sur les isotopes, les peuplements sont abordés par la paléogénétique qui permet de cartographier et dater des mouvements, y compris dans des régions jusqu'à lors délaissées comme l'Océanie, d'identifier un cousin dénisovien grâce à une modeste phalange ou encore de mieux comprendre la domestication du chien, premier compagnon de l'homme. Le sujet de l'art, émergeant au début du XXe siècle avec les premières découvertes de parois ornées en grotte, est très dynamique, avec de nombreux renouvellements, dont l'ancienneté des réalisations d'exception, qui met à mal toute dimension évolutionniste du sujet. Des thématiques contemporaines, qui font écho à des préoccupations de nos sociétés actuelles, sont aussi intégrées aux travaux en Préhistoire : ceux sur les gestuelles funéraires très anciennes, qui constituent un marqueur des humains en société, ceux sur le soin apporté aux membres de la communauté, qui met en évidence un altruisme dès la Préhistoire, ceux sur la place des femmes et la domination masculine, qui en montrent la précocité mais aussi des résultats concrets sur de possibles divisions des tâches.

L'archéologie est une science cumulative dont les horizons sont aujourd'hui très larges, mobilisant des outils et incluant des sujets qu'aucun chercheur n'aurait osé imaginer – sans parler du temps de Rosny – il y a quelques décennies encore. La Préhistoire a su merveilleusement en faire son miel. Ce dossier s'en fait l'écho, invitant à penser que de belles surprises sont encore à venir, dignes peut-être même d'ouvrir à un nouveau roman ! ■

Entretien avec **Boris Valentin**

« Retisser le lien entre histoire très ancienne et histoire récente »

La notion de préhistoire est fermement ancrée dans l'imaginaire collectif. Apparue dans le courant du XIXe siècle, cette convention désigne à la fois une période historique et une méthode d'investigation. Elle semble aussi, de par son préfixe « pré », rejeter hors du champ historique 99,7 % de l'histoire de l'humanité. Une ambiguïté que le préhistorien Boris Valentin s'évertue à clarifier.

▲ *Boris Valentin travaille à développer, autant que possible, des perspectives historiques dans l'étude de la Préhistoire afin de révéler l'évolution des sociétés.*

RAFAEL YAGHOBZADEH

La Recherche **Qu'appelle-t-on préhistoire ?**

Boris Valentin Nous, les préhistoriens, avons un seul et même mot pour désigner à la fois un champ chronologique immense – trois millions d'années – et une démarche, une méthode d'investigation. De ce point de vue, nous nous trouvons dans la même situation que les historiens, qui font face à cette même ambiguïté. Au sens chronologique, l'intuition de ce qu'on appelle « préhistoire » prend forme entre les années 1830 et 1859, date officielle donnée, a posteriori, à la naissance de la préhistoire. Ce processus est lié à la reconnaissance par le milieu académique de la justesse des thèses de Jacques Boucher de Perthes (1788-1868), connu en tant que fondateur de la science préhistorique. Selon ce dernier, il existait une « humanité antédiluvienne ». Lorsqu'émerge ce premier terme pour parler de la Préhistoire, il prend place dans la doxa catastrophiste alors en vigueur, qui est en particulier défendue par un grand nom des sciences, le naturaliste Georges Cuvier (1769-1832) ; cette théorie reste compatible avec

le discours religieux dominant et veut que plusieurs catastrophes successives aient eu lieu dans l'histoire du globe, la dernière en date étant le déluge rapporté par la Bible – d'où le nom d'« humanité antédiluvienne ». Mais très vite, les notions moins connotées d'antéhistoire et de préhistoire émergent. Il y a alors une période de flou pour désigner la période chronologique et la démarche. Il y a par exemple un moment où l'on utilise des termes distincts pour se référer à l'une et à l'autre : les termes Préhistoire et Antéhistoire sont employés pour la période, et paléoethnologie pour la démarche.

Quand la notion de préhistoire prend-elle définitivement le pas sur les autres ?

C'est durant la seconde moitié du XIXe siècle que « préhistoire » finit par désigner, comme « histoire » chez les historiens, à la fois le champ chronologique et la démarche. Le Royaume-Uni va suivre à peu près le même chemin. En Allemagne, il y aura pendant longtemps une hésitation entre trois termes : *Vorgeschichte,* que l'on peut traduire par « avant l'histoire » et qui serait un peu l'équivalent d'antéhistoire en français ; *Urgeschichte,* soit « l'histoire des commencements » ; et *Prähistorie,* qui est calqué sur le terme utilisé en France et au Royaume-Uni. Aujourd'hui, les Allemands privilégient les termes *Vorgeschichte* et *Urgeschichte.* Celui-ci est pratique, je trouve : « l'histoire des commencements », c'est bien de cela qu'il s'agit lorsque l'on parle de la Préhistoire. De plus, ce terme évite la terrible ambiguïté que nous, Français, connaissons avec le préfixe « pré », qui a tendance à chasser 99,7 % de l'histoire de l'humanité hors du champ historique et qui a tendance aussi, dans l'esprit de nos concitoyens, à figer cette idée curieuse que « l'histoire commence à Sumer », comme le suggérait le titre du livre de l'assyriologue américain Samuel Noah Kramer (1897-1990).

La notion de préhistoire semble européocentrée. Est-ce le cas, ou existe-t-elle par ailleurs et dans quelle acception ?

À la faveur de la mondialisation des savoirs, l'utilisation de cette notion s'est répandue un peu partout, mais c'est une utilisation qui mérite des précautions. En Europe, là où elle a été forgée, on entend classiquement par « Préhistoire » tout ce qui précède la pratique de l'écriture. Sont ainsi considérées comme « préhistoriques » toutes les cultures qui ne pratiquent pas l'écriture, qui ne la connaissent pas et sur lesquelles il n'y a pas de témoignages écrits. Or il y a beaucoup d'endroits sur la planète – par exemple en Amazonie, en Australie, en Afrique centrale ou australe – où cette acception est intenable car il y existe encore, à côté des sociétés contemporaines « historiques », des peuples qui ne pratiquent pas l'écriture ; ces peuples ont généralement un mode de vie de chasseurs-cueilleurs analogue à celui qui a prédominé en Europe pendant très longtemps. Peut-on pour autant les qualifier de « préhistoriques » ? On se rend compte avec cet exemple que le découpage – spatial en l'occurrence, et non temporel – entre Préhistoire et Histoire ne fonctionne pas bien. Cette distinction est inconcevable, également, sur les plans politique et éthique. Elle découlerait d'une conception hiérarchisante, qui a pu être dominante en sciences humaines avant 1945 – l'idée de « fossiles vivants de la Préhistoire » a demeuré très longtemps – mais qui, heureusement, n'a plus cours depuis. Enfin, cette distinction Préhistoire/Histoire fondée sur l'écriture est d'autant moins pertinente quand on voit – tous les historiens des périodes récentes le savent – à quel point l'écrit reste marginal, même dans nos sociétés, jusqu'à une période encore très récente.

Dans quelle mesure l'absence de données, ou le fait que l'on n'ait que des données tronquées ou fragmentaires, n'ont-ils pas favorisé, aussi, cette distinction entre Préhistoire et Histoire ?

Ce débat est ancien. Dès le XIXe siècle et le début du XXe siècle, les historiens du passé récent se posent la question et, selon l'importance qu'ils donnent aux textes dans l'historiographie (*), ils vont prendre en compte ou non la Préhistoire. Par exemple, le spécialiste de l'histoire de la Gaule, Camille Jullian (1859-1933) revendiquait une continuité entre préhistoire et histoire,

BIO

- **1985 à 1991** Élève à l'École normale supérieure (Paris).
- **1995** Doctorat en Préhistoire de l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- **Depuis 1989** Membre de l'équipe « Ethnologie préhistorique » de l'UMR Archéologies et sciences de l'Antiquité (ArScAn), puis de l'UMR Technologie et ethnologie des mondes préhistoriques (TEMPS)
- **1996** Nommé maître de conférences à l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- **2003-2015** Responsable du Projet collectif de recherche (PCR) « Paléolithique final et Mésolithique dans le Bassin parisien et ses marges. Habitats, sociétés et environnements ».
- **Depuis 2012** Professeur des universités à l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- **Depuis 2017** Responsable des fouilles sur le site magdalénien d'Étiolles (Essonne).
- **Depuis 2017** Responsable du PCR « Art rupestre préhistorique dans les chaos gréseux du Bassin parisien ».

(*) **L'historiographie** désigne la façon d'écrire l'histoire.

parce qu'il était attentif à la matérialité des sources. Mais certains lui rétorquaient que l'on ne pouvait pas faire grand-chose de ces témoignages non-écrits. Donc le débat existe depuis longtemps au sein de la science historique elle-même. Cette distinction est aussi alimentée par un autre point : le fait que les préhistoriens, en tout cas ceux qui vont être nommés comme tels, ne viennent pas des mêmes formations intellectuelles que les historiens. Alors que l'histoire relève des humanités, la préhistoire dépend pendant longtemps des sciences naturelles, et en particulier de la géologie. Ce qui n'empêche pas le dialogue. Les historiens du passé récent en ont été à l'initiative à quelques reprises : dans les années 1930, autour de la *Revue de synthèse historique* créée par Henri Berr ; ou quelques décennies plus tard, autour de l'historien médiéviste Georges Duby (1919-1996) qui avait invité des préhistoriens à contribuer à son *Histoire de la France des origines à nos jours*, publié en 1970.
Et aujourd'hui, le dialogue est grandement facilité par le fait que les historiens du passé récent ont intégré les autres sources qu'écrites, en particulier les sources archéologiques. C'est le cas des médiévistes, ce qui a beaucoup changé leur pratique de l'histoire du Moyen Âge.

“ L'idée d'une Préhistoire figée, où les évolutions n'existent pas, domine encore ”

En quoi les nouvelles techniques en archéologie préhistorique, la paléogénomique par exemple, redéfinissent-elles la manière d'aborder la Préhistoire ?

La préhistoire invente tous les jours des moyens pour extraire des informations supplémentaires à partir des rares documents parvenus jusqu'à nous. Et surtout afin de contourner le problème des bases statistiques faibles – le fait que l'on n'ait pas beaucoup de sites préhistoriques, que l'on n'ait pas beaucoup de découvertes (fossiles, artefacts) non plus. De ce point de vue, la paléogénomique fait partie des percées extraordinaires qui nous permettent aujourd'hui de proposer des scénarios beaucoup moins spéculatifs sur diverses choses, la relation phylogénétique (*) entre les espèces par exemple, puisque la typologie des crânes a fait son temps. Personnellement, je n'y ai jamais tellement cru au vu, justement, des bases statistiques faibles sur lesquelles elle s'appuie. La paléogénomique commence aussi à nous apprendre des choses sur les mouvements de population alors que, jusque-là, les réponses à cette question restaient très spéculatives et soumises aux oscillations théoriques. Ainsi, on a tout expliqué au début du XXe siècle par les mouvements de peuples, ce qu'on a appelé le « diffusionnisme ». Puis ces interprétations ont été discréditées parce qu'elles avaient été instrumentalisées, en particulier par l'archéologie nationale-socialiste. Il était donc devenu presque tabou de parler de diffusion de peuples, alors qu'on sait bien, grâce à l'étude des périodes plus récentes, qu'il y a des mouvements continuels. Avec la paléogénomique, on dispose désormais d'outils pour évaluer l'importance de ces déplacements de populations de manière objective permettant de retisser le lien entre histoire très ancienne et histoire récente. Ce à quoi j'œuvre à mon modeste niveau.

Quel est le sens de cet engagement ?

Si je m'évertue à retisser ce lien, c'est parce que je suis bien conscient que domine encore dans les mentalités l'idée d'une Préhistoire figée, où les évolutions sont inexistantes ou très lentes, quelque chose qui est en dehors du temps. Or c'est précisément ce qui s'appelle un mythe ! Tant qu'on ne fait pas l'effort d'historiciser avec nos moyens cette Préhistoire, on tourne en rond autour de ce mythe, que nous alimentons parfois, nous aussi, préhistoriens, quand nous nous improvisons spécialistes de trois millions

(*) **La phylogenèse** est la filiation des espèces vivantes à travers l'évolution.

(*) **Le Paléolithique** est une période qui s'étend de – 3 000 000 d'années à – 12 000, et correspond à la phase la plus ancienne de l'évolution technique et culturelle des humains.

d'années par exemple. L'idée, c'est donc de réintroduire du mouvement, de la diversité, de réintroduire les changements tels que nous les percevons. Ces changements ne se sont pas forcément produits au rythme de l'Histoire plus récente – ça, c'est un autre gros sujet, ce ne sont certainement pas les mêmes régimes d'historicité, comme on dit. Néanmoins, on n'est pas non plus dans *La Guerre du feu [référence au film de Jean-Jacques Annaud sorti en 1981, NDLR]*, où coexistent des espèces complètement différentes, alors que celles-ci, dans la réalité, ont vécu à des époques séparées de plusieurs centaines de milliers d'années.

S'il fallait lui trouver une autre désignation, comment renommeriez-vous la préhistoire ?

La notion de préhistoire est ce qu'on appelle une convention. Comme toutes les conventions, elle est un héritage qu'il ne faut pas prendre pour plus que cela. À la limite, il faut en rire avec l'historien Lucien Febvre (1878-1956), qui disait que la notion de préhistoire est des plus cocasses : ce serait de l'histoire… sans en être vraiment ! Mais de là à troquer le mot « préhistoire » contre un autre… Lequel ? On pourrait parler de l'histoire des commencements, ou de l'histoire très ancienne. Pourquoi pas après tout, on parle déjà d'histoire ancienne. Néanmoins, je pense que le terme « préhistoire » est trop fortement ancré pour qu'on puisse lui en substituer un autre. Cela a été merveilleusement démontré il y a quelques années par l'historien de l'art Rémi Labrusse, avec l'exposition « Préhistoire, une énigme moderne », au Centre Pompidou à Paris (1). Cette exposition montrait à quel point la Préhistoire reste un mythe, y compris à l'époque contemporaine, et combien ce mythe garde de la puissance, un effet important sur les avant-gardes artistiques. Toutefois, si, selon moi, il ne sert à rien de remplacer le terme, notre impératif, à nous les scientifiques, c'est de rappeler que le mot « préhistoire » est une convention ancienne, plaquée sur un déroulement historique véritable. On peut aussi faire bouger les lignes à l'intérieur de la période désignée, comme les médiévistes le font pour le Moyen Âge. Par exemple, je milite avec un certain nombre de collègues pour que l'on parle de Paléolithique (*) « ancien », « moyen » et « récent », plutôt que de Paléolithique « inférieur », « moyen » et « supérieur » – des qualificatifs hérités de la géologie qui peuvent passer pour des jugements de valeur. On peut également tenter d'aborder ces périodes en historien, ce que je m'emploie à faire pour la fin de la Préhistoire, en revendiquant une démarche que j'ai appelée « paléohistorique ».

Que désigne-t-elle ?

Ici, le préfixe « paléo » a sa valeur, pour dire que ce n'est pas la même histoire, bien sûr, que celle que pratiquent mes collègues sur le Moyen Âge, l'époque moderne, etc. C'est une histoire qui se construit exclusivement à partir de sources matérielles ou iconographiques. Et puis c'est une histoire qui est aussi très spéciale parce que l'appréciation des durées est limitée par l'imprécision de nos méthodes de datation, notamment le carbone 14 : par exemple, sur l'époque que j'étudie plus spécifiquement, celle des derniers chasseurs-cueilleurs en Europe occidentale, qui s'étend du 14e au 6e millénaire avant notre ère, la précision de la datation au carbone 14 est de l'ordre d'un siècle ou deux. C'est une histoire particulière parce que, avec une telle imprécision, il faut faire le deuil de l'événementialité : il faut fabriquer, écrire un récit, non pas dépourvu d'événements à l'origine, mais dont les événements ne sont pas saisissables. C'est une histoire spéciale, enfin, parce que c'est celle des anonymes. Une histoire qui est parfois individuelle, puisqu'on saisit ponctuellement les activités de tel ou tel individu, dont on peut qualifier la compétence et même l'âge, mais sans jamais pouvoir suivre cette personne précise dans d'autres aspects de son existence. La démarche paléohistorique recouvre toutes ces dimensions temporelles. Elle consiste à essayer de comprendre le mouvement des choses, la transformation des habitudes techniques, et ce que celle-ci peut nous dire de la transformation des modes de vie. ■

Propos recueillis par Vincent Glavieux

POUR EN SAVOIR PLUS

- Boris Valentin, *Jalons pour une paléohistoire des derniers chasseurs*, Éditions de la Sorbonne, 2008.
- Boris Valentin, *Le Paléolithique*, PUF, coll. « Que sais-je ? », 2011.
- Jean-Michel Geneste et Boris Valentin, *Si loin, si près : pour en finir avec la Préhistoire*, Flammarion, 2019.
- **archeologie.culture.fr/etiolles/fr** Site Internet consacré aux fouilles archéologiques menées sur le site archéologique d'Étiolles, où ont été retrouvés des vestiges de campements magdaléniens.

(1) tinyurl.com/prehistoire-enigme-moderne

Diyendo Massilani
GÉNÉTICIEN, INSTITUT MAX-PLANCK D'ANTHROPOLOGIE ÉVOLUTIONNISTE, ALLEMAGNE
Postdoctorant au sein du groupe développant des techniques avancées de séquençage.

Stéphane Peyrégne
GÉNÉTICIEN, INSTITUT MAX-PLANCK D'ANTHROPOLOGIE ÉVOLUTIONNISTE, ALLEMAGNE
Postdoctorant au sein du groupe étudiant la diversité génétique dans le temps et l'espace.

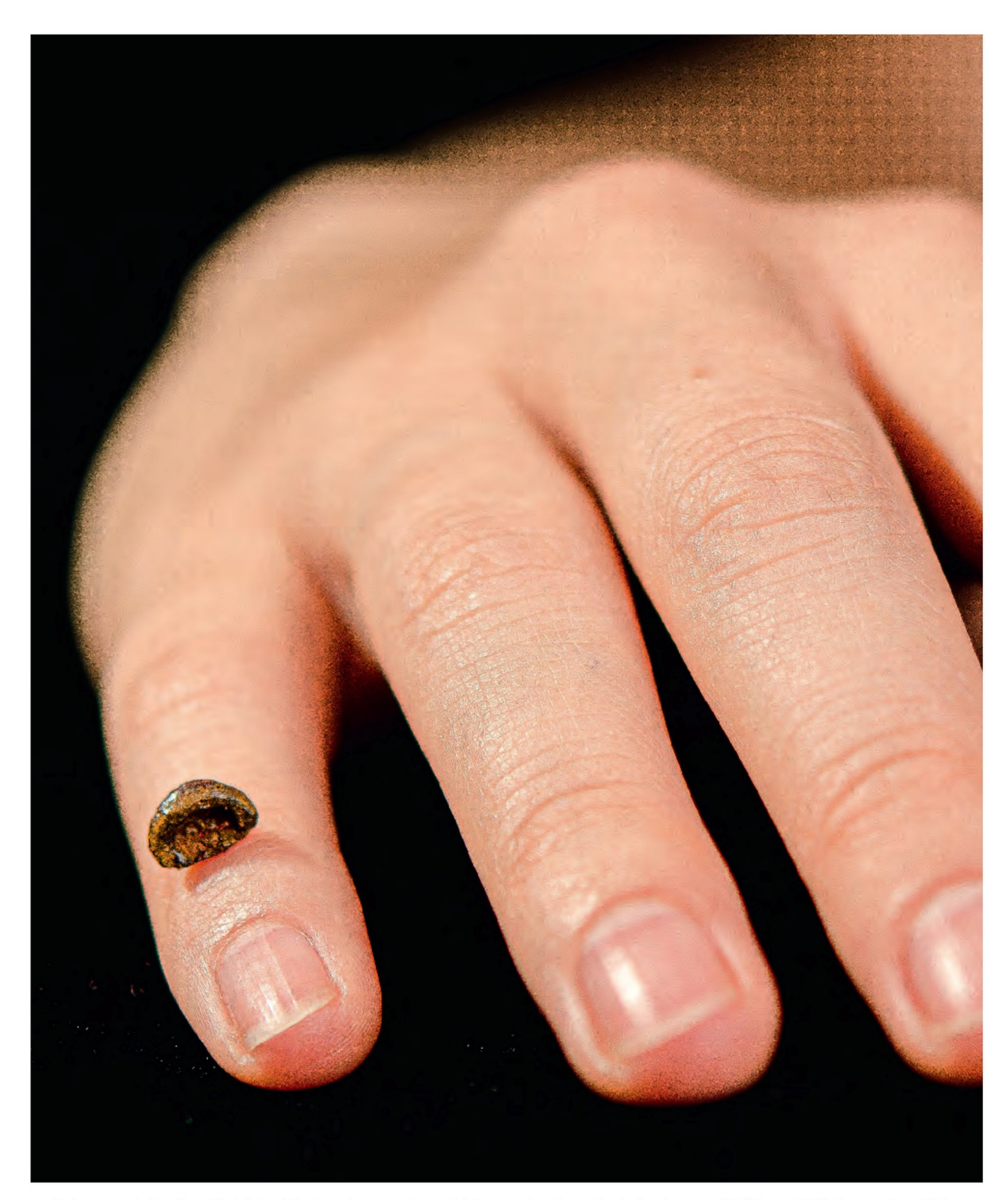
Sur les pas de nos cousins, les Dénisoviens

Une phalange gracile, trois molaires larges et une mâchoire robuste. Ces éléments constituent le portrait fragmentaire de nos mystérieux cousins, les Dénisoviens, dont l'apparence, la culture et le mode de vie nous échappent encore. Depuis la découverte de ce groupe humain en 2010, nous arrivons toutefois à reconstruire son histoire grâce à son ADN.

Dans la grotte sibérienne de Denisova, nichée au sein des montagnes de l'Altaï, des archéologues mettent au jour, en 2008, un fragment d'os de petit doigt. Grâce à des conditions environnementales favorables, l'ADN contenu dans ce reste archéologique a été remarquablement préservé. Son extraction et son analyse ont conduit en 2010 à une découverte aussi surprenante qu'inattendue : la séquence est très différente de notre ADN et de celui des Néandertaliens. Pas de doute pour autant, le propriétaire de cette phalange appartient à un groupe humain jusqu'alors inconnu, que les archéologues nomment les « Dénisoviens » en référence à la grotte où ce fragment a été trouvé (1). Qui sont les Dénisoviens ? Où et quand ont-ils vécu ? Combien étaient-ils ? À quoi ressemblaient-ils ? Comment vivaient-ils ? Autant de questions auxquelles les scientifiques tentent d'apporter des réponses.

À ce jour, neuf restes anciens ont été attribués à ce groupe. Huit ont été retrouvés dans la grotte de Denisova : le fragment d'os du petit doigt ayant permis l'identification des Dénisoviens (Denisova 3) ; trois molaires (Denisova 2, 4, 8) et quatre restes osseux ne présentant aucun caractère morphologique distinctif (Denisova 11, 19, 20, 21). Ceux-ci sont les quatre dernières traces fossiles de Dénisoviens découvertes, en 2018 et

DR



MAX PLANCK INSTITUTE FOR EVOLUTIONARY ANTHROPOLOGY

▲ *Ce fragement d'os de petit doigt a été mis au jour par des archéologues dans la grotte de Denisova, en Sibérie, en 2008. Son analyse ADN a permis de le relier à un groupe humain jusqu'alors inconnu et que les chercheurs ont appelé les Dénisoviens.*

2021 (2). Les études menées sur ces fragments ont montré qu'ils proviennent de couches sédimentaires déposées il y a entre 55 000 et 250 000 ans, indiquant la présence des Dénisoviens dans cette région pendant au moins 200 000 ans. Quant au neuvième reste osseux, il s'agit d'une mandibule dite « mandibule de Xiahe » (3). Retrouvée dans la grotte de Baishiya, au Tibet, celle-ci comportait des croûtes de sédiments attachées à sa base. La datation de ces croûtes indique que la mâchoire serait vieille de près de 160 000 ans.

Quel portrait dresser des Dénisoviens à partir d'aussi peu d'éléments ? Il reste encore difficile de se faire une idée précise de leurs caractéristiques morphologiques. Tout juste est-on en mesure de dire que la « mandibule de Xiahe » est très robuste. Elle ne présente pas de menton et a, entre autres caractéristiques, une arcade dentaire large et aplatie à l'avant, comme observé chez les Néandertaliens. Les molaires sont par ailleurs beaucoup plus larges que les nôtres et celles des Néandertaliens. La phalange est gracile, similaire aux nôtres. Et… c'est tout.

Les connaissances sur les Dénisoviens sont tout aussi limitées en ce qui concerne leurs moyens de subsistance et leurs industries lithiques. Les analyses de la faune associée avec les restes que l'on a retrouvés de ce groupe humain suggèrent que ce dernier exploitait des espèces vivant en forêt : le chevreuil, le cerf rouge de Sibérie, le cerf géant, le cheval, le bison, le rhinocéros laineux ou encore la gazelle de Mongolie. Pour ce qui est de l'outillage, les spécialistes disposent d'à peine plus d'informations. Nous savons toutefois que la couche sédimentaire à trois ou quatre mètres de profondeur dans la grotte de Denisova, datée d'il y a 200 000 ans, où Denisova 19, 20 et 21 ont été retrouvés, est riche en artefacts attribués à une industrie d'outils qui n'a pas d'équivalent direct en Asie du Nord et centrale. Le complexe culturel le plus proche, dit « acheulo-yabrudien », a été identifié dans plusieurs grottes et sites de plein air au Proche-Orient, et a été daté entre 400 000 et 250 000 ans.

LEUR TERRITOIRE S'ÉTENDAIT SUR DES MILLIERS DE KILOMÈTRES

Dans ce contexte de registre archéologique limité, l'ADN ancien extrait des restes paléontologiques et archéologiques dénisoviens devient une source d'informations encore plus précieuse. Grâce à la mise au point de nouvelles techniques d'extraction d'ADN et d'analyse plus sensibles, Svante Pääbo et ses collègues – de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste (Leipzig, Allemagne) – sont parvenus dès 2012 à reconstituer le génome complet de Denisova 3 (4). Les scientifiques ont découvert que les Néandertaliens et les Dénisoviens descendent d'une même population avec laquelle nous partageons un ancêtre commun il y a un demi-million d'années. Néandertaliens et Dénisoviens se sont ensuite séparés il y a environ 400 000 ans. Les Dénisoviens semblent par ailleurs s'être métissés avec un groupe humain d'une lignée plus ancienne encore, qui se serait

MAX PLANCK INSTITUTE FOR EVOLUTIONARY ANTHROPOLOGY - BENCE VIOLA, MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE - KATERINA DOUKA ET AL. / MAX PLANCK INSTITUTE

DIX ANS DE DÉCOUVERTES

2010
Découverte des Dénisoviens à partir de l'analyse de l'ADN contenu dans un fragment d'os de petit doigt (Denisova 3), confirmée ensuite par une molaire (Denisova 4).

2012
Publication du génome dénisovien complet.

2015
Deuxième molaire attribuée à un Dénisovien (Denisova 8).

2017
Découverte d'ADN dénisovien dans des sédiments de la grotte de Denisova. L'analyse d'une molaire (Denisova 2) met en évidence l'existence d'un quatrième spécimen de ce groupe humain.

séparé de la lignée commune aux Néandertaliens, Dénisoviens et populations actuelles il y a plus d'un million d'années.
L'existence et l'origine de cette ascendance sont encore débattues. En revanche, le génome des Dénisoviens montre qu'ils se sont métissés avec les Néandertaliens. Les deux populations se sont rencontrées au moins dans la région de la grotte de Denisova, comme en témoigne Denisova 11 : un des fragments d'os découvert dans cette grotte (5). L'analyse de l'ADN ancien contenu dans ce reste paléontologique a en effet établi qu'il appartenait à une jeune fille dont le père était dénisovien et la mère néandertalienne. Malgré ces métissages sans doute fréquents, les rencontres étaient occasionnelles et probablement limitées géographiquement puisque les Néandertaliens d'Europe ne semblent pas avoir hérité d'ADN dénisovien et que ceux d'Asie centrale n'ont laissé que peu de traces dans le génome des Dénisoviens.
En comparant l'ADN qu'une personne a hérité de ses deux parents, il est aussi possible d'estimer la taille de la population à laquelle elle appartient. Le génome est effectivement constitué de segments d'ADN transmis par une multitude d'ancêtres : chaque segment d'ADN du père partage un ancêtre commun avec celui de la mère, plus ou moins distant dans le temps suivant le nombre de différences observées. Ainsi, nous pouvons déterminer quand ces ancêtres ont vécu et combien ils étaient à différents moments, ce qui permet d'estimer la taille de la population au cours du temps. Ces analyses ont montré que les Dénisoviens étaient

Une population peu nombreuse, concentrée en Asie et peut-être en Océanie

peu nombreux au cours de leur histoire, environ dix fois moins que nos ancêtres africains. Elles ont aussi permis de déterminer que, comme les Néandertaliens, la population dénisovienne était en déclin des milliers d'années avant que les populations modernes ne colonisent l'Eurasie.
L'épicentre de l'ascendance génétique dénisovienne se trouve aujourd'hui dans le sud-est de l'Asie et en Océanie, ce qui signifie que la plupart des Dénisoviens vivaient probablement dans ces régions. Leur territoire s'étendait ainsi sur des milliers de kilomètres, plus au Sud et à l'Est que les deux grottes sibérienne et tibétaine où les restes dénisoviens ont été retrouvés. Ce territoire aurait été fragmenté, car la majorité de l'ADN dénisovien retrouvé dans les populations actuelles (entre 70 % et 100 % suivant la population considérée) a été héritée d'une population dénisovienne séparée depuis plus de 300 000 ans de la population à laquelle les individus de la grotte de Denisova appartenaient. Par ailleurs, les personnes vivant aujourd'hui en Asie de l'Est (Chine, Japon) possèdent une ascendance dénisovienne supplémentaire, héritée d'un groupe plus proche de

2018
L'analyse de Denisova 11 (fragment d'os) montre, pour la première fois, une métisse avec un père Dénisovien et une mère Néandertalienne.

2019
Mise au jour du premier fossile dénisovien hors de la grotte de Denisova : une mandibule trouvée dans la grotte de Baishiya, au Tibet.

2020
ADN dénisovien retrouvé dans des sédiments de la grotte de Baishiya.

2021
Découverte de trois nouveaux fossiles de Dénisoviens (Denisova 19, 20 et 21). Ces restes osseux, qui ne présentent aucun caractère morphologique distinctif, sont les plus récentes traces de ce groupe humain mises au jour.

SCHOOL OF ARCHAEOLOGY OXFORD UNIVERSITY - DONGJU ZHANG, LANZHOU UNIVERSITY - KATERINA DOUKA ET AL. / MAX PLANCK INSTITUTE

DEUX GROTTES POUR UN GROUPE

Neuf restes humains ont été mis au jour entre 2008 et 2021 : huit en Sibérie et un au Tibet. La première découverte a permis d'identifier un groupe nommé les Dénisoviens, dont l'ADN est très différent du nôtre et de celui des Néandertaliens.

celui qui vivait dans la région de Denisova. Les ancêtres des populations actuelles de l'Asie de l'Est ont donc rencontré plusieurs populations dénisoviennes pendant et/ou après leur colonisation de l'Asie.

En conquérant le monde, les populations modernes se sont aussi retrouvées dans de nouveaux environnements dans lesquels les Néandertaliens et les Dénisoviens vivaient depuis des centaines de milliers d'années et s'y étaient adaptés. Le métissage avec ces populations a donc parfois permis aux populations modernes d'intégrer ces informations génétiques. Ainsi, l'effet de l'ADN dénisovien sur les individus qui le portent aujourd'hui révèle indirectement des aspects de la biologie des Dénisoviens. Les Tibétains ont par exemple hérité d'une version du gène EPAS1 des Dénisoviens. Cette information génétique les aurait aidés à s'acclimater à la vie en altitude, en leur permettant de mieux tolérer les faibles concentrations en oxygène de cet environnement. Les scientifiques continuent de montrer que cet ADN a toujours une influence aujourd'hui, particulièrement sur le système immunitaire – en procurant des résistances à certains pathogènes – mais aussi sur le métabolisme ou sur la morphologie du visage. Autre exemple, l'ADN dénisovien dans la région des gènes WAR2 et TBX15 est associé à une meilleure résistance au froid chez les Inuits.

Il semblerait cependant que l'ADN dénisovien n'a pas toujours été bénéfique ou anodin. Il existe en effet des régions dans le génome humain où il n'y a aucune trace de cet ADN, probablement parce qu'il avait un effet délétère sur les individus qui le portaient. Nous retrouvons par exemple peu d'ADN dénisovien dans les gènes impliqués dans le fonctionnement des testicules, ce qui peut laisser penser qu'il réduisait la fertilité (6). Les hommes qui avaient cet ADN dans ces gènes n'avaient effectivement pas ou peu d'enfants à qui le transmettre. L'ADN en question a en conséquence fini par disparaître. Il est toutefois possible que ces régions de notre génome dépourvues d'ADN hérité des Dénisoviens (et des Néandertaliens) aient des fonctions importantes pour notre existence. Celles-ci peuvent en effet être à l'origine de nouvelles capacités cognitives et pourraient représenter la clé de notre singularité. Ces régions sont particulièrement intéressantes pour comprendre d'éventuelles différences fondamentales entre l'humain moderne et les Dénisoviens et/ou les Néandertaliens.

COMPRENDRE L'INFLUENCE DE L'ADN HÉRITÉ DES DÉNISOVIENS

Les scientifiques ont de nombreuses autres pistes pour reconstruire l'histoire et l'évolution des Dénisoviens. Les récents développements technologiques ont par exemple montré que les populations du passé ont laissé leur ADN dans leur environnement. Des échantillons ont ainsi été extraits de couches sédimentaires de la grotte de Denisova, confirmant la longue présence des Dénisoviens dans l'Altaï. D'autres ont été extraits de la grotte de Baishiya, soutenant l'idée de leur présence au Tibet durant au moins 40 000 ans, il y a entre 100 000 et 60 000 ans (7). D'autre part, de nombreux efforts sont en cours pour séquencer le génome de millions de personnes et collecter des informations sur leur santé, leur morphologie ou leur mode de vie. Cette ressource permettra de comprendre avec plus de détails l'influence de l'ADN hérité des Dénisoviens. Enfin, il est aujourd'hui possible d'introduire l'ADN dénisovien dans des cellules grâce aux techniques de manipulation génétique, puis d'étudier son effet en laboratoire. Grâce à ces nouvelles méthodes, l'avenir promet de nombreuses découvertes sur ces mystérieux cousins disparus. ■

(1) J. Krause *et al.*, *Nature, 464,* 894, 2010 ; D. Reich *et al.*, *Nature, 468,* 1053, 2010.
(2) S. Brown *et al.*, *Nat. Ecol. Evol., 6,* 28, 2022.
(3) F. Chen *et al.*, *Nature, 569,* 409, 2019.
(4) M. Meyer *et al.*, *Science, 338,* 222, 2012.
(5) V. Slon *et al.*, *Nature, 561,* 113, 2018.
(6) S. Sankararaman *et al.*, *Curr. Biol., 26,* 1241, 2016.
(7) D. Zhang *et al.*, *Science, 370,* 584, 2020.

BRUNO BOURGEOIS

Les premiers Sapiens européens

Après être sortis d'Afrique, les humains modernes ont peu à peu remplacé les formes archaïques locales sur l'ensemble de la planète. Comment, pourquoi et à quel rythme ? Ce sont les questions auxquelles tentent de répondre les paléoanthropologues. Pas facile de s'y retrouver tant les restes humains de cette époque de transition sont rares, et les outillages difficiles à interpréter.

Depuis son apparition, le groupe des Hominines (le rameau séparé il y a sept millions d'années de celui des chimpanzés et au sein duquel les humains ont émergé) s'est diversifié en une grande variété de formes. Il y a 300 000 ans, au moins cinq ou six d'entre elles coexistaient, le plus souvent séparées par des barrières géographiques majeures. Aujourd'hui, une seule espèce humaine, *Homo sapiens,* peuple toute la planète. Malgré ses variations régionales, elle présente une remarquable homogénéité qui implique une origine commune récente de toutes les populations actuelles. Ce remplacement de formes archaïques locales par une humanité que l'on appelle parfois « moderne » est certainement l'épisode le plus marquant de l'évolution humaine du dernier million d'années. Quand, comment et pourquoi ce remplacement s'est-il produit ?

Homo sapiens est une espèce originaire d'Afrique et son évolution s'est poursuivie longtemps sur ce continent (1). À l'époque, l'Eurasie était peuplée de Néandertaliens à l'ouest et d'un groupe proche, les Dénisoviens, à l'est. On a longtemps pensé que la sortie d'Afrique de notre espèce s'était opérée pour la première fois il y a un peu plus de 100 000 ans, dans une zone limitée au Proche-Orient, puis de façon beaucoup plus importante vers le reste de l'Eurasie vers 40 000 ans, avec un remplacement rapide de tous les autres Hominines. Or, les découvertes de ces dernières années indiquent que les rencontres entre populations africaines et eurasiatiques remontent, en réalité, bien plus loin dans le temps. Et que le remplacement des Néandertaliens et des Dénisoviens a été un processus complexe qui a duré plusieurs millénaires en Europe.

Jean-Jacques Hublin, PALÉO-ANTHROPOLOGUE, COLLÈGE DE FRANCE, PARIS
*Spécialiste de l'évolution des Néandertaliens et des origines africaines d'*Homo sapiens, il *est titulaire de la chaire de paléoanthropologie du Collège de France.*

MAX-PLANCK INSTITUTE FOR EVOLUTIONARY ANTHROPOLOGY

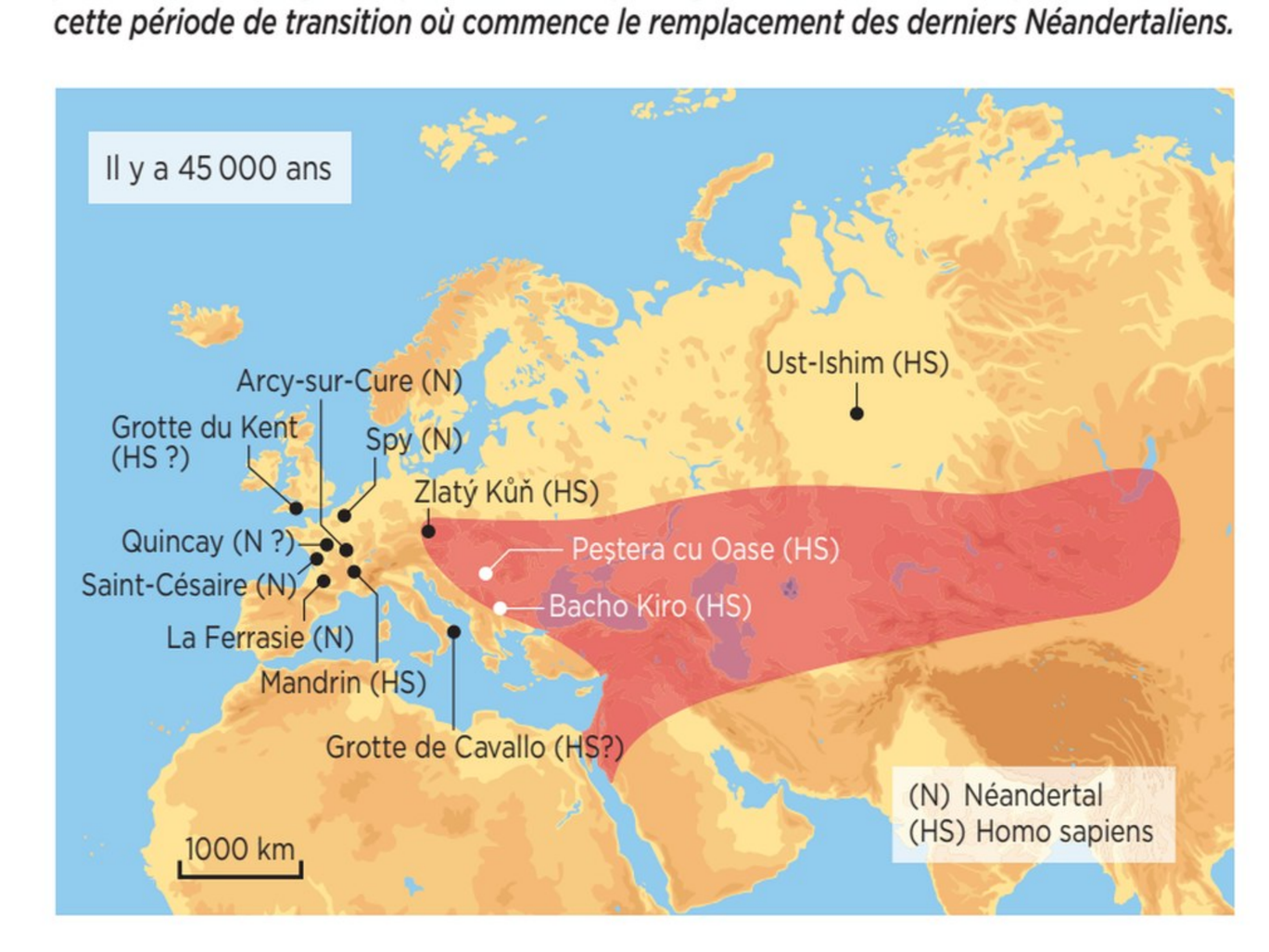
UNE DIFFICILE IDENTIFICATION

Pour déchiffrer cet épisode décisif dans l'évolution humaine, on se heurte toutefois à une difficulté majeure : si les sites archéologiques de cette époque ne manquent pas et livrent parfois par milliers des outillages de pierre taillée, les restes humains y sont fort rares, particulièrement au cours de cette période. Seule l'Europe – berceau historique de l'archéologie préhistorique – présente pour cette période une densité de sites fouillés, qui permet d'espérer la résolution des questions qui se posent à nous (2).

Devant la rareté des restes humains, on a souvent été tenté de se tourner vers l'archéologie afin de reconstituer l'histoire des peuplements de l'Europe. Il faut cependant noter que la signification des assemblages d'outils reconnus par

HOMO SAPIENS, DE L'EUROPE À L'ASIE

La répartition (en rouge) des sites du Paléolithique supérieur initial, première trace d'*Homo sapiens *dans les moyennes latitudes de l'Eurasie. Néandertal est alors encore présent dans une grande partie de l'Europe. Figurent aussi les sites importants de cette période de transition où commence le remplacement des derniers Néandertaliens.



les préhistoriens comme des « industries » distinctes dans le Paléolithique (*) varie suivant les époques. Pour les périodes très anciennes, les contraintes liées à la disponibilité des matières premières et le type d'activité pratiqué dans chaque site influencent fortement la production d'outils. Pour les périodes récentes, les objets produits sont plus stéréotypés mais il reste toutefois difficile de les attribuer à des populations humaines biologiquement homogènes.

Pendant la période qui a vu, en Europe, l'effacement des Néandertaliens au profit d'*Homo sapiens* « modernes » (entre 50 000 et 40 000 ans), on connaît toute une variété d'industries. Leur extension géographique est circonscrite et leur durée relativement limitée. Pour les désigner, on parle souvent d'« industries de transition », car elles présentent parfois un caractère hybride. Des techniques héritées du Paléolithique moyen (350 000 ans– 40 000 ans environ), exclusivement utilisées en Europe par des Néandertaliens, se mêleraient à d'autres évoquant le Paléolithique supérieur (45 000 ans – 10 000 ans), qui est l'œuvre de populations d'*Homo sapiens.* Une chose est pourtant certaine : comme le prouve la paléogénétique (*), les premiers *Homo sapiens* européens ne descendent pas de Néandertaliens locaux. On observe en outre que, en dehors d'Europe, les plus anciens *Sapiens* ont eux aussi fabriqué des outillages qui se rattachent au Paléolithique moyen. En l'absence de restes humains, il n'existe donc pas de critères déterminants pour attribuer tel ou tel assemblage à des Néandertaliens tardifs ou à des *Sapiens* arrivés du Proche-Orient depuis peu. De surcroît, la mise en évidence par des dizaines d'études paléogénétiques d'épisodes d'hybridation entre les deux groupes ouvre la possibilité que certains de ces outillages aient été fabriqués par des populations mixtes ou hybridées.

(*) **Le Paléolithique** est la première et la plus longue période de la Préhistoire. Il s'étend des premiers témoignages de l'activité humaine, il y a plus de 3 millions d'années, jusqu'à la fin du dernier stade glaciaire. Il se sépare habituellement en Paléolithique archaïque, qui court jusqu'à 1,76 million d'années, date où débute le Paléolithique inférieur ; suit le Paléolithique moyen, qui commence il y a 350 000 ans ; la dernière sous-période est le Paléolithique supérieur.

DERNIERS NÉANDERTALIENS ET PREMIERS EUROPÉENS MODERNES

Dans l'ouest de l'Europe, notamment en France et en Belgique, des restes de Néandertaliens sont directement datés vers 41 000 ans environ (3). Certains sont associés à une industrie de transition, le Châtelperronien, qui a perduré jusque vers 39 000 ans. De façon assez surprenante, il s'agit d'un assemblage d'aspect très Paléolithique supérieur. On y trouve notamment des lamelles de silex, des outils en os et des parures faites de dents de mammifères et de mollusques fossiles. Pour certains archéologues, ce type d'assemblages trop « moderne » ne peut pas être l'œuvre de Néandertaliens. Pourtant, sur la base des datations directes par le radiocarbone, la contemporanéité locale entre Néandertaliens et outillage châtelperronien peut difficilement être contestée.

Longtemps, la datation des premiers européens modernes a été plus problématique encore. Le complexe aurignacien (43 000 ans – 29 000 ans), un ensemble d'industries du début du Paléolithique supérieur, n'a livré en Europe occidentale que des vestiges d'*Homo sapiens,* même s'ils sont très rares. En Allemagne et en Italie, ces assemblages lithiques remontent aux alentours de 42 000 ans. Dans deux sites, la Grotte de Kent en Angleterre et celle de Cavallo au sud de l'Italie, des restes humains très fragmentaires semblent témoigner d'une présence encore plus ancienne d'*Homo sapiens* car ils sont

BRUNO BOURGEOIS

associés à des industries de transition précédant l'Aurignacien (4). Dans les deux cas néanmoins, il n'y a pas eu de datation directe des fossiles – uniquement celle des couches – et le contexte stratigraphique de ces ossements est matière à discussion.

C'est avec nos travaux récents dans la grotte de Bacho Kiro, en Bulgarie, qu'une avancée déterminante a été faite : y a été trouvé un assemblage qui se rattache au vaste ensemble des industries du Paléolithique supérieur initial (46 000 ans – 43 000 ans), présent de la région du Néguev, au sud d'Israël, jusqu'à l'Europe centrale vers l'ouest, la Mongolie et l'Altaï vers l'est. Cet assemblage combine des traits technotypologiques qui évoquent les industries bien plus anciennes, avec une riche industrie osseuse et de spectaculaires pendentifs façonnés dans des dents de carnivores. Le traitement d'une grande série de fragments osseux par une technique moléculaire (ZooMS) – qui permet par l'analyse du collagène une détermination du genre, parfois de l'espèce – a conduit à l'identification de plusieurs vestiges humains dans un niveau archéologique très riche recouverts de sédiments stériles (5). Plus important encore, ces vestiges humains ont pu être datés directement. Le site de Bacho Kiro montre ainsi la présence certaine d'*Homo sapiens* modernes dans les moyennes latitudes de l'Europe de l'Est, entre 45 000 et 43 000 ans, dans un climat relativement rigoureux, comparable à celui de la Scandinavie actuelle. Ces dates précèdent de plusieurs milliers d'années celles de l'extinction des derniers Néandertaliens dans l'ouest. Les similitudes frappantes entre les objets de parure de Bacho Kiro et ceux, plus tardifs, découverts dans le Châtelperronien, confirment l'idée que c'est bien l'arrivée d'hommes modernes en Europe qui a entraîné la diffusion de comportements nouveaux dans les populations locales. C'est d'autant plus cohérent que l'ADN des hommes de Bacho Kiro montre qu'ils ont été en contact direct avec des Néandertaliens, et qu'ils possèdent tous dans leur ascendance au moins un aïeul néandertalien les précédant de seulement quelques générations (6).

En 2022, une nouvelle publication analysant les découvertes de la grotte Mandrin (Drôme) suggère qu'une incursion en Europe de l'Ouest de ces pionniers modernes aurait pu avoir lieu encore bien plus tôt, peut-être dès 54 000 ans. Cette conclusion se fonde sur l'identification morphologique d'une dent de lait humaine dans un niveau Néronien, une industrie jusque-là attribuée aux Néandertaliens, qui n'est connue que dans une petite région de la vallée du Rhône (7). Si cette interprétation est confirmée par d'autres découvertes, avec des datations directes et de l'ADN humain ancien, ce sera alors la preuve qu'un petit groupe de *Sapiens* venu du Proche-Orient a pu pénétrer très loin vers l'ouest avant de disparaître.

LES RÉVÉLATIONS DE L'ADN ANCIEN

L'analyse de l'ADN ancien apporte de nombreuses précisions sur les processus de peuplement de l'Eurasie par *Homo sapiens*. C'est le cas des restes humains de la grotte de Peştera cu Oase, en Roumanie, probablement contemporains de ceux de Bacho Kiro mais mal datés. Là encore, leur analyse témoigne d'épisodes d'hybridation récents entre ces populations pionnières d'humains modernes et les Néandertaliens (8). Pourtant, ce phénomène n'a pas été universel. En République tchèque, un crâne de femme découvert en 1950 à Zlatý Kůň a été l'objet d'une nouvelle étude paléogénétique. La taille des segments d'ADN néandertalien dans son génome permet de lui attribuer un âge d'au moins 45 000 ans. Curieusement, cet ADN n'a pas été acquis localement : il résulte de contacts plus anciens de plusieurs milliers d'années au Proche-Orient (9). Il semble donc que ces premiers arrivants formaient de petits groupes dont les contacts avec les Néandertaliens ont été bien différents d'une région à l'autre. Ce qui est frappant, surtout, est le fait qu'ils n'ont guère laissé de descendance dans les populations modernes plus tardives de l'Europe. Ils se sont perdus dans le monde néandertalien ou ont connu l'extinction, remplacés plus tard par les groupes aurignaciens qui s'étendront bien plus loin vers l'ouest. Leur arrivée marquera réellement la fin des Néandertaliens, dont persistent aujourd'hui quelques traces d'ADN, toujours présentes dans le génome de tous les *Homo sapiens* non-Africains. ■

(*) **La paléogénétique** est l'étude des séquences d'ADN ancien que l'on retrouve dans les restes fossiles et dans l'environnement. Elle permet d'établir des filiations génétiques entre espèces.

(1) J.-J. Hublin *et al.*, *Nature, 546*, 289, 2017.
(2) J.-J. Hublin, *Quaternary Sci. Rev., 118*, 194, 2015.
(3) F. Welker *et al.*, *PNAS, 113*, 11162, 2016.
(4) T. Higham *et al.*, *Nature, 479*, 521, 2011 ; S. Benazzi *et al.*, *Nature, 479*, 525, 2011.
(5) J.-J. Hublin *et al.*, *Nature, 581*, 299, 2020.
(6) M. Hajdinjak *et al.*, *Nature, 592*, 253, 2021.
(7) L. Slimak *et al.*, *Sci. Adv., 8*, eabj9496, 2022.
(8) Q. Fu *et al.*, *Nature, 524*, 216, 2015.
(9) K. Prufer *et al.*, *Nat. Ecol. Evol., 5*, 820, 2021.

Jérémy Choin
POSTDOCTORANT
À L'INSTITUT PASTEUR
(PARIS), UNITÉ DE
GÉNÉTIQUE ÉVOLUTIVE
HUMAINE (CNRS, UMR 2000).

Lluis Quintana-Murci
GÉNÉTICIEN DES POPULATIONS
Directeur de l'unité de génétique évolutive humaine (CNRS, UMR 2000) à l'Institut Pasteur (Paris). Il est aussi professeur au Collège de France, titulaire de la chaire de génomique humaine et évolution.

Le peuplement de l'Océanie relu par la génétique

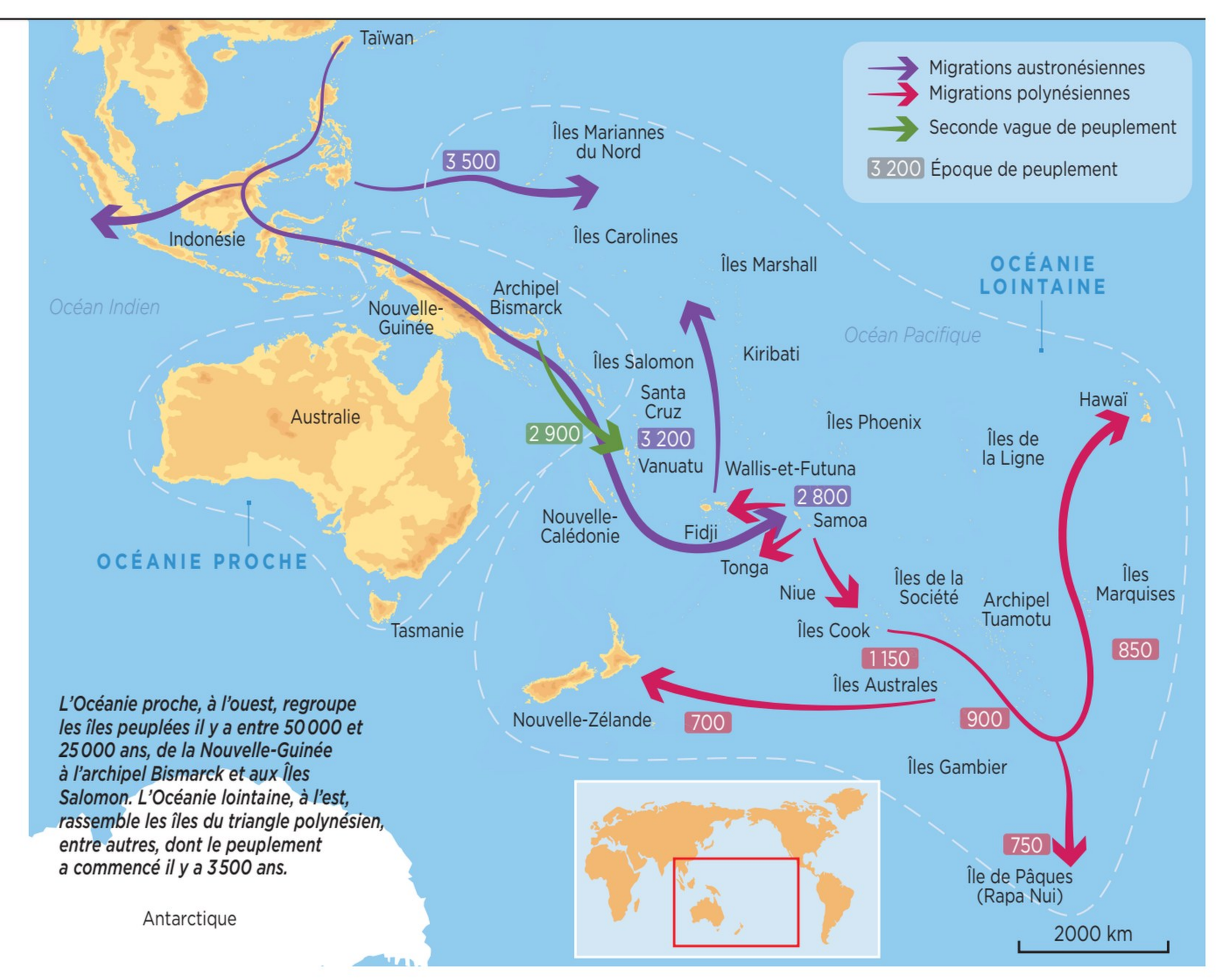
Longtemps délaissé par les généticiens, l'ADN des peuples d'Océanie, anciens ou contemporains, commence tout juste à livrer ses secrets. Il fournit de précieuses informations sur le peuplement singulier de cette région, qui réunit deux extrémités : le point final de la première migration humaine hors d'Afrique il y a environ 60 000 ans et le point d'arrivée des derniers mouvements de populations vers des territoires inoccupés jusqu'alors.

Qui sont les peuples d'Océanie ? D'où viennent-ils ? Quand les différentes régions d'Océanie ont-elles été peuplées ? Dès le milieu du XVIIIe siècle, ces questions ont suscité l'intérêt des premiers explorateurs européens. En 1852, Jules Dumont d'Urville (1790-1842), un navigateur et botaniste français, divisa l'Océanie en trois régions : la Mélanésie, la Polynésie et la Micronésie. Cette classification géographique ne reflétait toutefois aucune réalité culturelle. Les chercheurs préfèrent aujourd'hui utiliser un autre découpage : l'Océanie proche, regroupant les îles peuplées il y a entre 50 000 et 25 000 ans (de la Nouvelle-Guinée à l'archipel Bismarck et aux Îles Salomon) ; et l'Océanie lointaine, rassemblant les îles dont le peuplement a commencé il y a 3 500 ans, telles que la Micronésie, le Vanuatu et toutes les îles et atolls contenus dans le triangle polynésien (*).

La Nouvelle-Guinée orientale, l'archipel Bismarck et les Îles Salomon forment l'entité géographique, archéologique, linguistique et anthropologique de l'Océanie proche, la première et seule région d'Océanie peuplée durant le Pléistocène, époque géologique s'étendant d'il y a 2 580 000 à 11 700 ans environ. Les territoires actuels de la Nouvelle-Guinée, de l'Australie et de la Tasmanie étaient autrefois reliés

(*) **Le triangle polynésien** désigne les îles composant la région « Polynésie ». Les sommets de ce triangle imaginaire sont définis par la Nouvelle-Zélande, Hawaï et l'île de Pâques.

DR - PATRICK IMBERT/COLLEGE DE FRANCE



L'Océanie proche, à l'ouest, regroupe les îles peuplées il y a entre 50 000 et 25 000 ans, de la Nouvelle-Guinée à l'archipel Bismarck et aux Îles Salomon. L'Océanie lointaine, à l'est, rassemble les îles du triangle polynésien, entre autres, dont le peuplement a commencé il y a 3500 ans.

BRUNO BOURGEOIS

en une seule masse continentale nommée Sahul. Cet ancien continent était séparé par environ 100 kilomètres d'eau de l'Indonésie et de l'Asie du Sud-Est continentale, qui étaient rassemblées elles aussi en un seul continent, connu sous le nom de Sunda. Le niveau de la mer était 150 mètres plus bas qu'aujourd'hui, ce qui a facilité le peuplement de Sahul par le biais de Sunda, il y a environ 65 000 à 50 000 ans (1).

Quant aux îles les plus à l'ouest de l'Océanie lointaine (îles de la Micronésie, Santa Cruz, Vanuatu, Nouvelle-Calédonie, Fidji, Samoa, Tonga, Wallis-et-Futuna), elles ont été peuplées pour la première fois il y a seulement entre 3 500 ans et 2 800 ans par les Lapita (2), des peuples de navigateurs hors pair. « Lapita » fait référence à un assemblage culturel qui se caractérise notamment par un type spécifique de poteries, avec une grande variation spatio-temporelle dans les motifs, les décorations, le style et la forme. Au cours de leurs voyages, ces marins horticulteurs et agriculteurs, probablement originaires de Taïwan si l'on se réfère au modèle Out of Taiwan (*), auraient diffusé leur culture ainsi que les langues austronésiennes. À ce jour, environ trois cents sites archéologiques Lapita ont été fouillés. Les plus anciens d'entre eux, datés d'environ 3 500 ans, se situent dans l'archipel Bismarck, ce qui fait de cette région le berceau le plus probable du complexe culturel Lapita. Ces peuples auraient eu tendance à s'installer dans de petites zones inhabitées, principalement le long des côtes ou dans des îles au large.

(*) **Le modèle Out of Taiwan** est une hypothèse suggérant que tous les peuples parlant les langues austronésiennes ont pour origine un groupe de riziculteurs ayant quitté Taïwan il y a un peu moins de 5 000 ans.

Archéologues, paléoanthropologues et linguistes ont proposé différentes hypothèses pour expliquer le peuplement par la culture Lapita. Le modèle le plus communément admis est celui du « Triple-I » : intrusion, innovation et intégration. Le complexe culturel Lapita serait ainsi apparu en Océanie proche, dans l'archipel Bismarck, et résulterait d'interactions complexes entre des peuples d'Asie du Sud-Est et des peuples autochtones d'Océanie proche, aussi nommés les peuples papous. Par conséquent, certains éléments caractérisant le complexe Lapita auraient été directement introduits dans l'archipel Bismarck (les langues austronésiennes, l'horticulture, l'agriculture, la céramique), d'autres correspondraient à des innovations locales (les motifs caractéristiques de la poterie), et des éléments culturels des peuples autochtones d'Océanie proche auraient également été incorporés (le travail de la pierre obsidienne, par exemple). Ces premiers peuples Lapita de l'archipel Bismarck auraient ensuite migré vers l'Océanie lointaine il y a environ 3 200 ans, selon un modèle dit de « saute-mouton », comme pour les Îles Salomon dont une grande partie aurait été contournée.

Le peuple Lapita, probablement originaire de Taïwan, aurait diffusé les langues austronésiennes

DE NOMBREUX MÉTISSAGES ENTRE SAPIENS ET DÉNISOVIENS

Un peu plus à l'est, dans les îles de la Polynésie occidentale (Fidji, Samoa, Tonga, et Wallis-et-Futuna), la disparition du complexe Lapita a laissé place à l'émergence de la société ancestrale polynésienne. Toutefois, ce n'est qu'après une longue pause d'environ deux millénaires que les premiers navigateurs polynésiens ont peuplé les îles de la Polynésie orientale (Îles Cook, îles de la Polynésie française, Île de Pâques, Hawaï et la Nouvelle-Zélande), sans doute à partir des îles de Tonga et Samoa, berceau probable de la société polynésienne.

Depuis une vingtaine d'années, les approches de génétique des populations, combinées à l'essor des algorithmes mathématiques, de l'informatique et des méthodes de séquençage de l'ADN à haut débit, ont permis la reconstruction détaillée de l'histoire des populations humaines. Il est désormais possible d'estimer les changements de taille des populations au cours des périodes, leurs temps de divergence, les événements de métissage entre populations modernes ou bien avec des groupes d'humains éteints, mais aussi les événements de sélection naturelle qui ont permis aux populations de s'adapter aux différents environnements rencontrés depuis leur sortie d'Afrique, il y a environ 60 000 ans. Ainsi, les informations issues des données génomiques sont complémentaires de celles d'autres disciplines telles que l'archéologie, l'anthropologie ou la linguistique. Elles ajoutent une autre dimensionnalité à l'histoire complexe des populations d'Océanie.

En 2010, deux équipes de recherche ont séquencé l'ADN provenant d'un petit morceau de phalange découvert dans la grotte de Denisova, en Sibérie. Son étude a révélé qu'il s'agissait d'une forme humaine jusqu'alors inconnue, proche de Néandertal, qu'ils ont nommée Homme de Denisova (lire p. 26). Contrairement aux Néandertaliens qui se sont métissés avec nos ancêtres *sapiens* à peine ces derniers sortis d'Afrique, les Dénisoviens ne se seraient métissés qu'avec les ancêtres des peuples d'Océanie, d'Asie de l'Est et d'Asie du Sud-Est. Notre étude publiée dans le journal *Nature* en 2021 (3), fondée sur l'analyse de l'ADN de 317 individus actuels du Pacifique, s'est penchée sur la question. Elle a montré que, si le niveau de métissage avec Néandertal est très similaire dans toute la région Pacifique (entre 2,2 et 2,9 %), celui observé avec Denisova est fortement hétérogène (de 0 à 3,1 %), le taux le plus élevé étant trouvé chez les populations d'origine papoue. Ce travail, ainsi que ceux d'autres équipes, a également révélé que le métissage avec les Dénisoviens aurait eu lieu à de nom-

POUR EN SAVOIR PLUS

- Lluis Quintana-Murci, *Le Peuple des humains*, Odile Jacob, 2021.
- Arnaud Noury et Jean-Christophe Galipaud, *Les Lapita, nomades du Pacifique*, IRD éditions, 2011.
- A. L. Gosling et E. Matisoo-Smith, *Curr. Opin. Genet. Dev., 53*, 53, 2018.

breuses reprises, entre 45 000 et 25 000 ans, impliquant différentes populations dénisoviennes ou du moins génétiquement apparentées à Denisova.

Notre équipe a également exploré les conséquences fonctionnelles du métissage entre les ancêtres *sapiens* du Pacifique et les humains « archaïques ». Tandis que les variants génétiques d'origine néandertalienne sont retrouvés dans des gènes impliqués dans des fonctions biologiques multiples (pigmentation de la peau, métabolisme, développement neuronal), les variants d'origine dénisovienne recouvrent principalement des gènes impliqués dans la régulation du système immunitaire. Ces observations soutiennent l'hypothèse que le métissage avec les Dénisoviens aurait facilité une meilleure adaptation des premiers *sapiens* de la région Asie du Sud/Pacifique aux pathogènes locaux qu'ils auraient rencontrés.

▲ *Un tesson de poterie caractéristique de la culture Lapita : ce peuple de marins, d'agriculteurs et horticulteurs a été le premier à s'implanter dans les îles à l'ouest de l'Océanie lointaine, il y a environ 3500 ans.*

PETER JOSEPH SHEPPARD

DES ORIGINES ASIATIQUES ET PAPOUES

Les premières études génomiques sur les populations de la région, faites à partir de l'ADN d'individus actuels, ont montré qu'environ 80 % de l'ADN des peuples de la partie occidentale de l'Océanie lointaine est d'origine papoue, contre environ 20 % d'origine asiatique provenant de l'expansion austronésienne. Ces premières observations ont aussi soutenu l'idée que les Lapita se seraient d'abord métissés avec les Papous d'Océanie proche avant de peupler les premières îles d'Océanie lointaine, comme celles du Vanuatu (4). Plus récemment, des études paléogénomiques (*) se sont intéressées à l'histoire du peuplement de l'Océanie. En 2016, des généticiens de l'université Harvard ont publié la séquence d'ADN de trois individus provenant des îles du Vanuatu et d'un individu des îles Tonga, en Polynésie occidentale, tous datés de la période Lapita (5). Cette étude a révélé que l'ascendance génétique des premiers peuples d'Océanie lointaine était quasi entièrement d'origine asiatique.

Comment expliquer alors que les populations actuelles de cette région présentent une composante génétique majoritaire d'origine papoue ? La paléogénomique a permis d'y répondre : le métissage (aussi appelé « flux génique » par les généticiens) avec les populations papoues n'aurait eu lieu que lors d'une deuxième vague de migration, vraisemblablement en provenance de l'archipel Bismarck, il y a environ 2 700 ans. Plus étonnant encore, bien que les peuples actuels du Vanuatu soient majoritairement d'origine génétique papoue, ils ont gardé les langues austronésiennes provenant des premiers Lapita habitant la région. En complément de ces études, nos travaux suggèrent que les flux géniques en Océanie proche, entre les groupes d'Asie de l'Est et les groupes papous, auraient été multiples et n'auraient débuté qu'après l'apparition des premières poteries Lapita.

Qu'en est-il du peuplement des autres îles d'Océanie lointaine, celles les plus à l'est du triangle polynésien ? Des travaux récents, fondés sur l'ADN de plus de 400 individus actuels, ont permis d'apporter un éclairage nouveau quant à la chronologie du peuplement de la Polynésie orientale : les Îles Cook, les plus à l'ouest, auraient tout d'abord été peuplées il y a environ 1 150 ans à partir des îles Samoa. L'expansion polynésienne se serait poursuivie en direction des îles de la Polynésie française, pour enfin arriver à l'Île de Pâques (Rapa Nui) il y a environ entre 900 et 750 ans.

Une observation plus controversée, provenant de la même équipe de recherche et fondée également sur les données génétiques, concerne les contacts qu'il aurait pu y avoir entre certains groupes polynésiens, des îles Marquises en particulier, et des peuples autochtones d'Amérique du Sud il y a environ 750 ans, donc datés d'avant l'arrivée des colons européens en Amérique latine et en Polynésie (6). Ces résultats suggéreraient un peuplement précoce des îles les plus à l'est des îles Marquises (Fatu Hiva, par exemple), par des groupes amérindiens avant l'arrivée des premiers Polynésiens.

L'ensemble des études en génétique des populations ou en paléogénomique – parfois en nette contradiction avec les modèles proposés par d'autres disciplines – a permis d'affiner notre compréhension de l'histoire du peuplement humain d'Océanie. Et l'ADN de ces peuples, anciens ou contemporains, commence tout juste à livrer ses secrets. ■

(*) **La paléogénomique** est une discipline scientifique visant à reconstruire des génomes anciens à partir d'ADN extrait de fossiles ou d'ossements.

(1) K. Lambeck et J. Chappell, *Science, 292,* 679, 2001 ; J. F. O'Connell *et al., PNAS, 115,* 8482, 2018.

(2) Patrick Vinton Kirch, *On the Road of the Winds,* University of California Press, 2017.

(3) J. Choin *et al., Nature, 592,* 583, 2021.

(4) A. Wollstein *et al., Curr Biol., 20,* 1983, 2010 ; J. S. Friedlaender *et al., Plos Genet., 4,* 173, 2008.

(5) P. Skoglund *et al., Nature, 538,* 510, 2016.

(6) A. G. Ioannidis *et al., Nature, 583,* 572, 2020.

Anne Augereau
NÉOLITHICIENNE À L'INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES ARCHÉOLOGIQUES PRÉVENTIVES (INRAP, MARNE-LA-VALLÉE)
Elle est spécialiste du Néolithique, de technologie lithique, d'archéologie funéraire et d'archéologie du genre. Elle est également autrice d'ouvrages.

L'oppression des femmes existait-elle avant le Néolithique ?

Avec la sédentarisation et l'essor de l'agriculture, le Néolithique a bouleversé les sociétés humaines. Y compris les rapports entre les hommes et les femmes ? Si certains préhistoriens estiment que la naissance de l'agriculture serait à l'origine des inégalités sociales et de genre, l'étude de sites funéraires montre des indices d'inégalités avant le début du Néolithique : le fait que les activités de chasse auraient été réservées au groupe masculin en constituerait une forme qui, peut-être, en cache d'autres.

La révolution néolithique émerge il y a près de 12 000 ans dans le Croissant fertile – cette région du Moyen-Orient qui s'étend de la mer Morte au golfe Persique – et se répand ensuite dans toute l'Europe (à partir de 6 000 ans avant notre ère). Cet essor de l'agriculture, de l'élevage et de la sédentarité est souvent désigné comme la cause première des inégalités sociales. Elle aurait notamment permis la domination des femmes par les hommes, pour faire des premières une ressource économique productrice d'enfants. Ce qui laisserait supposer que les sociétés de chasseurs-cueilleurs qui ont précédé auraient été égalitaires. Cette opposition binaire est reprise aujourd'hui dans divers supports de vulgarisation grand public. Elle est pourtant questionnée par des archéologues et des anthropologues sociaux qui tentent d'explorer sous cet angle les sociétés de chasseurs-cueilleurs avant le Néolithique (1). En premier lieu, il se trouve que, quel que soit le type d'économie en jeu, les situations d'inégalité

DR

ROYAL PAVILION & MUSEUMS TRUST, BRIGHTON

▲ *Au Néolithique, le rôle des femmes était circonscrit aux tâches telles que la mouture des céréales : la robustesse de leurs bras est un marqueur d'activité spécifique et répétitive. (Cette photo représente la reconstitution de « Whitehawk Woman », qui a vécu il y a 5600 ans en Angleterre).*

observées par l'ethnologie sont éminemment variées. Dans des sociétés de chasseurs-cueilleurs dites sans richesse, elles peuvent être liées à l'âge, au sexe ou au prestige. Une stratification sociale apparaît parfois lorsque des services pour la mariée sont demandés au futur mari, créant des individus redevables à une famille. Ils doivent par exemple fournir leur belle-famille en viande (en offrant le produit de leur chasse), assister ses membres en cas de conflit armé ou faire divers cadeaux.

Dans les sociétés d'agriculteurs et de chasseurs-cueilleurs qui pratiquent le stockage, les formes d'inégalité peuvent distinguer des individus riches, qui distribuent leur richesse pour gagner du prestige social ou payer une dot, ou des groupes familiaux fondés sur la transmission de la richesse et de la propriété foncière. Une chose est sûre, néanmoins : selon des degrés divers et des modalités variables, la domination masculine touche presque tous les groupes humains, qu'il s'agisse de chasseurs-cueilleurs, d'agriculteurs, d'horticulteurs et de sociétés industrielles (2).

Faire des recherches sur l'état de la domination masculine dans le passé, son apparition et son niveau d'intensité, revêt donc un enjeu majeur. Les sciences sociales révèlent des ressorts multiples : ils peuvent concerner la division du travail, les droits matrimoniaux et sexuels, la filiation, les tabous et interdits alimentaires, les mythes et les récits initiatiques, la valeur sociale attribuée aux individus des deux sexes, et même les vêtements et les parures. Si certains aspects des rapports sociaux, comme les droits sexuels ou les mythes, ne laissent guère de traces, d'autres revêtent une dimension matérielle accessible à l'archéologue. C'est le cas de certains éléments du costume (attaches, broderies, parures), des activités productives, qui peuvent laisser des empreintes lisibles sur les os et des traces d'usage sur les outils. C'est aussi le cas des traitements réservés aux morts, de l'alimentation, de la santé et des origines, approchées par des analyses ostéologiques, chimiques et génétiques sur les ossements humains.

Une division des tâches et une différenciation sociale se dessinent au Mésolithique sur le continent européen

▲ *Cette reconstitution d'une double sépulture, datant de 5500-5300 avant notre ère, mise au jour sur l'île Téviec (Morbihan), représente un homme et une femme inhumés avec des outils en silex, des parures de coquillage et des fragments de ramure de cerf.*

DIDIER DESCOUENS/ MUSEUM DE TOULOUSE

LA SOCIÉTÉ RUBANÉE, PREMIÈRE DOMINATION MASCULINE ?

En archéologie, les informations utiles à ces problématiques sont principalement tirées des sites funéraires : cimetières, petits groupes de tombes ou sépultures isolées où sont accessibles les hommes, femmes, enfants et vieillards, dont une partie de la biographie peut être retracée. Pour les temps les plus anciens, les données sont rares et peu explicites. En revanche, pour la Préhistoire la plus récente, c'est-à-dire la fin du Mésolithique et le Néolithique, les contextes funéraires sont relativement nombreux et on peut tenter de dresser un bilan de nos connaissances sur les rapports de genre chez les derniers chasseurs-cueilleurs et les premiers agriculteurs. Examinons d'abord quels indices sur les rapports homme/femme sont disponibles pour la plus ancienne culture néolithique d'Europe centrale, le Rubané. Se formant dans le bassin des Carpates aux alentours de 5600 avant notre ère, cette culture est

à l'origine de l'expansion de la sédentarité, de l'élevage et de l'agriculture dans une grande partie de l'Europe tempérée, de l'actuelle Hongrie au Bassin parisien, où elle s'achève vers 4 900 avant notre ère.

La société rubanée est dominée par quelques hommes, systématiquement enterrés avec une herminette (*) ou une hache polie. Avec les flèches, les briquets à percussion et les andouillers (*) de bois de cerf, ces objets fonctionnent comme des marqueurs du genre masculin et probablement de statut social. Ces hommes dominants sont tous nés dans le territoire où ils sont morts et devaient posséder des droits prioritaires sur les terres agricoles. Dans bien des cas, ils ont aussi une alimentation plus riche en protéines animales que le reste de la population (3).

Aux côtés de ces hommes, une majorité d'individus sont dépourvus de tout ou partie de ces caractéristiques. Parmi eux, les femmes, dont l'identité funéraire est marquée par la présence de parures : bracelets, colliers, plastrons, ceintures de coquillages et attaches de ceinture, broderies et bandeaux de tête cousus de coquillages ou de dents d'animaux sauvages. Certaines, surtout présentes dans le Bassin parisien et en Haute-Alsace, sont en « grand apparat » avec un déploiement fastueux de toutes leurs parures. D'autres sont en « petit apparat ». La majorité de ces ornements ont également été retrouvés chez les hommes, si bien qu'il n'y a pas d'objets spécifiques du genre féminin, ni parmi les parures et encore moins parmi les outils.

À ce stade de la recherche, il est encore difficile de dire si ces femmes plus ou moins parées se distinguent des hommes sur d'autres plans. Au niveau le plus général, les analyses isotopiques (lire p. 44) montrent qu'elles ont subi des stress alimentaires plus sévères que les hommes, et leur alimentation est généralement plus riche en féculents et en nourriture végétale. Leurs origines sont aussi plus variées et ce point a été mis en relation avec un système de mariage en partie patrilocal, où l'épouse vient habiter dans le village de son mari (4). Mais toutes ne sont pas d'origine extérieure et la réalité était probablement plus complexe. Il semble néanmoins que ces déplacements ont parfois été effectués dans un contexte de violence. En Allemagne et en Autriche, plusieurs fosses communes ont ainsi livré divers individus des deux sexes, massacrés, sans doute à coups d'herminette. Parmi eux, les femmes en âge de procréer sont en nombre réduit quand elles ne sont pas absentes – et l'hypothèse proposée est que ces massacres se sont conclus par le rapt des femmes les plus jeunes. Des techniques de guerre, qui ont encore cours aujourd'hui, rendues possibles lorsque les femmes sont considérées comme de moindre valeur que les hommes, puisque l'on peut en disposer comme des objets que l'on vole.

(*) **Une herminette** est une hachette servant à travailler le bois, dont le tranchant est dans un plan perpendiculaire au manche.

(*) **Un andouiller** est une ramification en forme de corne qui pousse sur le bois du cerf, du chevreuil et du daim et dont le nombre, s'accroissant généralement d'une unité chaque été à la repousse des bois, permet d'établir l'âge de l'animal.

(*) **Une meule dormante** désigne, dans un système de mouture, la partie qui reste immobile pendant l'opération de mouture et se trouvant généralement en position inférieure.

ILS MANIPULENT LES ARMES LÉTALES, ELLES DES MATIÈRES TENDRES

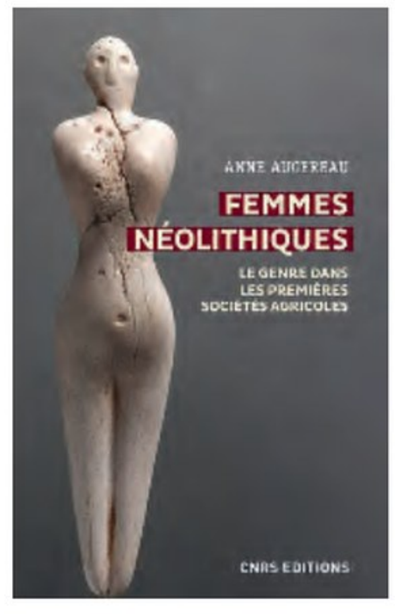
Une autre différence homme/femme réside dans la division du travail. À partir de l'étude des traces laissées par leur utilisation sur les outils déposés dans les tombes, les femmes auraient plutôt travaillé les matières tendres, comme les peaux, le cuir ou les fibres végétales. D'autres résultats, cette fois-ci sur les os, pointent la robustesse des attaches musculaires sur les bras féminins, qui pourrait résulter d'une activité spécifique comme la mouture de grains de céréales à l'aide de meules dormantes (*) (5).

À l'inverse, les hommes, et en particulier ceux à herminettes, sont investis dans le travail du bois, la boucherie, mais aussi la guerre et la chasse. Ces quelques éléments donnent toutefois l'image d'une division du travail bien incomplète ; et les multiples activités productives telles que le soin aux animaux, la fabrication de la poterie, ou encore la cueillette, ne sont pas documentées. Pour autant, les activités identifiées correspondent aux régularités de la division sexuée des tâches que divers anthropologues ont soulignée : les hommes manipulent les armes les plus létales, les femmes sont investies dans les matières meubles ou tendres (6).

Les différences entre les deux sexes, dans les premières sociétés agricoles, concernent donc les droits sur la terre, l'alimentation et la mobilité. Si l'hypothèse du rapt des femmes se confirmait, ces faits suggéreraient que la culture rubanée attache une valence moindre au sexe féminin, phénomène qui a été abondamment décrit par l'anthropologue Françoise Héritier (1933-2017) pour des sociétés contemporaines ou subactuelles observées par l'ethnologie.

POUR EN SAVOIR PLUS

■ Anne Augereau, *Femmes néolithiques – Le genre dans les premières sociétés agricoles*, CNRS Éditions, 2021.



▲ *Ces parures ont été portées par les dernières populations de chasseurs-cueilleurs en Europe. En l'absence de données archéologiques robustes sur l'identité du genre, nul ne sait à ce jour si elles ont été fabriquées – ou portées en majorité – par des femmes ou des hommes.*

Remontons dans le temps et intéressons-nous maintenant au Mésolithique, qui commence en Europe il y a environ 12 000 ans. Si l'on veut bénéficier de données suffisantes pour aborder cette période, il faut élargir notre vision à l'ensemble du continent. En outre, contrairement à celles de la société rubanée, les manifestations culturelles du Mésolithique sont variées et se placent sur une durée de cinq millénaires (9 000 à 4 500 avant notre ère). Des tendances à la différenciation semblent se dessiner à partir de quelques sites appartenant à la fin de la période, qui va de 7 000 à 4 500 avant notre ère (7).

L'ALIMENTATION ET LA MOBILITÉ AU CŒUR DES RECHERCHES

Dans certains sites des Pays Baltes (celui de Zvejnieki, en Lettonie) et de Sibérie occidentale (l'Île Oleni, au nord de la Russie), des groupes d'individus se distinguent selon la nature et la combinaison de leurs mobiliers funéraires (8). Ainsi, aux côtés d'individus entourés uniquement de pointes en os, sont aussi inhumés des personnages portant un costume abondamment brodé de dents perforées, avec des ceintures, parures de têtes, bracelets de chevilles ou chaussures décorées. Par ailleurs, les sujets masculins sont enterrés avec des pointes, des harpons, des herminettes en pierre, des couteaux et dagues en ardoise, et les femmes avec de la parure. L'hypothèse de différenciation sociale au Mésolithique est donc probable. Cette remarque peut être étendue à d'autres régions de l'Europe : la façade atlantique, l'Italie et la péninsule ibérique.
Concernant la division du travail, dans l'état actuel de la recherche, les femmes mésolithiques semblent exclues, comme au Néolithique, des activités de chasse et de guerre. Ce sont les hommes qui centralisent les armatures et pointes de flèches et ce sont également eux qui portent le plus fréquemment des traces de violence interpersonnelle : flèches fichées dans les os, fractures diverses. De plus, des microtraumatismes au niveau du coude droit, résultant de gestes répétés pouvant impliquer des armes de jet, sont présents sur plusieurs sujets masculins mais jamais sur des individus féminins. Les données manquent aujourd'hui pour aller plus loin dans l'étude de la division sexuée des tâches, même si d'autres données l'attestent, comme l'utilisation par les femmes de leurs incisives pour des travaux qui restent à déterminer, alors que, chez les hommes, ce sont les canines et les prémolaires qui sont mises à contribution. Enfin, des éléments en faveur de différenciations alimentaires entre hommes et femmes mésolithiques sont régulièrement évoqués : à Vassylivka, en Ukraine, les hommes affectés d'une plaque dentaire importante sont nombreux, conséquence d'une consommation plus fréquente de viande. En Scandinavie, à la même époque, il semble que la part de l'alimentation aquatique soit légèrement moins élevée chez les femmes que chez les hommes. L'étude d'un petit corpus d'individus du nord de l'Espagne a montré que l'alimentation des sujets féminins contient une plus grande part de produits végétaux et qu'elle est également moins riche en protéines animales que celle des hommes. Ces différences alimentaires auraient plusieurs causes, qui peuvent d'ailleurs se combiner : carences nutritionnelles accrues des femmes lors des grossesses ; tabous alimentaires ; division des rôles avec des femmes cantonnées aux activités de cueillette ; origine étrangère de certaines d'entre elles, dont l'alimentation infantile aurait différé de celle de leur lieu de vie adulte. Sur ce dernier aspect, des systèmes de mariage patrilocaux ont été évoqués mais ces hypothèses méritent plus de données pour être affirmées. Si tel était le cas, il faudrait alors admettre que l'inégalité touche les femmes du Mésolithique comme celles du Néolithique, notamment dans les domaines alimentaires et dans la mobilité.
L'approche atteint cependant ici ses limites. Pour aller plus loin, il conviendrait de croiser, individu par individu, site par site, les données archéologiques, bio-archéologiques et chimiques. Pour le Mésolithique, ce travail reste à faire. Malgré tout, ce rapide tour d'horizon montre déjà que, si les inégalités sociales existent au Néolithique rubané, rien ne permet d'affirmer qu'elles furent une invention de cette culture, ni une conséquence de l'économie de production. Même s'ils restent ténus, des indices d'inégalités entre les hommes et les femmes suggèrent leur existence au Mésolithique. ■

(1) Luc Moreau (dir.), *Social Inequality Before Farming?*, McDonald Institute for Archaeological Research, 2020.

(2) Christophe Darmangeat, *Le communisme primitif n'est plus ce qu'il était*, Smolny, 2012.

(3) P. Bickle et A. Whittle (dir.), *The First Farmers of Central Europe*, Oxbow Books, 2013.

(4) A. Masclans *et al.*, *J. Archaeol. Method and Theory, 28*, 232, 2021.

(5) A. A. Macintosh *et al.*, *Sci. Adv., 3*, eaao3893, 2017.

(6) Alain Testart, *L'Amazone et la Cuisinière*, Gallimard, 2014.

(7) J. M. Grünberg, I. M. Mărgărit & A. Boroneanț (dir.), *From Hunter-Gatherers to Farmers?*, p. 185, Cetatea de Scaun, 2017.

(8) J. O'Shea et M. Zvelebil, *J. Anthropol. Archaeol., 3*, 1, 1984.

SOLANGE RIGAUD / THE CONVERSATION AVRIL 2015

Le soin des uns, le choix des autres

L'archéologie documente nombre de situations où les groupes humains ont accompagné, soigné et assisté des personnes dépendantes. Parfois même, ces groupes ont su s'adapter à l'étrangeté de certaines anatomies et les valoriser. Les plus anciens témoignages d'altruisme.

Valérie Delattre
ARCHÉO-ANTHROPOLOGUE À L'INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHES ARCHÉOLOGIQUES PRÉVENTIVES (INRAP/UMR ARTEHIS, DIJON).
Elle mène des recherches sur le handicap et les pratiques funéraires.

▶ *Ce crâne (ici un moulage), mis au jour dans la grotte de Shanidar (Kurdistan irakien), appartient à un Néandertalien qui a vécu il y a 47 000 ans environ et présentait des lésions importantes. Toutes avaient eu le temps de guérir avant la mort du sujet. Cette constatation suggère que les Néandertaliens prenaient soin des leurs.*

DR - IMAGE COURTESY OF SMITHSONIAN INSTITUTION

C'est dans le gouffre de la Sima de los Huesos, en Espagne, daté d'il y a environ un demi-million d'années, que s'enracine l'exemple incontestable le plus ancien de la prise en charge d'un handicap perceptible en archéologie. Cette grotte abrite une trentaine d'individus prénéandertaliens, ce qui en fait l'une des principales sources de cette période en Europe. Parmi eux, un homme d'environ 45 ans qui avait souffert de la maladie de Baastrup, une pathologie dégénérative de type rhumatismale, et une enfant qui possédait un crâne déformé et asymétrique – typique de la plagiocéphalie, maladie occasionnant un retard cognitif. Ces affections ont contraint leurs proches à une prise en charge. À l'évidence, le groupe prénéandertalien n'a pas rejeté, dans la vie comme dans la mort, certains des siens au profil différent.

S'il faut compter avec la rareté de ces vestiges très anciens, à mesure que les découvertes se multiplient, les données confirment cette « paléo-compassion ». Le site moustérien (100 000 ans avant le présent) de Qafzeh (Israël) a livré la sépulture d'un adolescent âgé d'environ 13 ans, dont le crâne présentait une fracture interprétée comme un traumatisme crânio-encéphalique qui a dû entraîner des troubles neurologiques et comportementaux affectant sa relation aux autres (1). Son traitement funéraire est unique : les bois de cervidé – animal psychopompe (*) s'il en est – déposés sur ses mains ramenées à la hauteur de la face, expriment la bienveillance du groupe vis-à-vis d'un proche amoindri. De même, toujours à Qafzeh, un enfant, âgé de 6 ans et atteint d'hydrocéphalie (augmentation du volume de liquide cérébro-spinal), partage sa fosse sépulcrale avec un jeune adulte. Ce qui constitue un geste de protection tutélaire unique pour les Moustériens (2). On peut dérouler le temps et évoquer le vieillard néandertalien édenté et arthritique de La Chapelle-aux-Saints (Corrèze). Il y a environ 50 000 ans (Paléolithique moyen), il devait compter sur les siens pour se nourrir et se déplacer. Même chose pour le sujet de la grotte de Shanidar (Kurdistan irakien), il y a 47 000 ans, qui présentait de lourdes lésions liées à des traumatismes violents, avec une amputation de l'avant-bras, notamment (3).

POUR EN SAVOIR PLUS

- Valérie Delattre, *Handicap : quand l'archéologie nous éclaire*, Le Pommier, 2018.
- Valérie Delattre (directeur éditorial), *Les Nouvelles de l'archéologie – Archéologie du handicap*, les Éditions de la Maison des sciences de l'homme, n°165, septembre 2021.
- Bruno Maureille, *Les Premières sépultures*, Le Pommier – Universcience, 2013.

(*) **Un psychopompe** est un dieu, un démon, un esprit ou un animal, qui escorte les âmes des morts dans l'autre monde.

UNE PLUS-VALUE D'ORDRE RITUEL

Chacun de ces sujets amoindris a présenté un temps de dépendance aux autres qui ne semble pas lui avoir été refusé. Bien au contraire. Les diagnostics des paléopathologues sont unanimes pour confirmer le maintien des individus déficients au sein de leur corps social. Outre le fait de voir leur seule survie garantie, certaines de ces personnes diminuées semblent même avoir été dévolues à l'entretien des âmes et à la guérison des corps. Ainsi, voici 28 000 ans, un homme d'âge mûr a été inhumé, à Brno en République tchèque (site de Brno II), paré de colliers et de perles, muni d'une statuette masculine en ivoire – à ce jour unique dans la sculpture paléolithique – et entouré d'objets tels que des baguettes de tambour, des anneaux et des disques en pierre et en ivoire de mammouth. Or, son squelette, recouvert d'ocre rouge, présente des traces d'inflammation osseuse, de type périostite, qui devait contrarier chacun de ses mouvements. Il occupait, à l'évidence, une position importante dans la sphère rituelle du groupe, en raison de ses seules capacités intellectuelles.

Les exemples se multiplient à mesure que l'on avance dans le temps : une femme âgée d'environ 45 ans, inhumée en position fœtale il y a 12 000 ans dans la grotte d'Hilazon Tachtit (Israël), présente une forte asymétrie au niveau de la colonne vertébrale, affectant sa démarche. Le bassin d'un léopard, cinquante carapaces de tortues, une aile d'aigle, la patte avant d'un sanglier et… un pied humain lui sont associés, conférant à cette femme un statut unique. La sépulture de Bad Dürrenberg (Allemagne), datée d'environ 6 600 avant notre ère, renferme une femme âgée d'une trentaine d'années, autour de laquelle ont été disposés de très nombreux objets artisanaux, des centaines de restes d'animaux, dont un cerf entier et une carapace de tortue. Le squelette présente des déformations du foramen magnum (trou à la base du crâne) et de la première

vertèbre, ayant pu entraîner des problèmes neuropsychiatriques allant des céphalées à des pertes de conscience. On a sans doute prêté des pouvoirs surnaturels à ces comportements anormaux, souvent imprévisibles.
À l'évidence, la singularité de certains individus, sans doute détectée précocement, ne les éloignait pas du corps social. Le handicap physique ou des particularités mentales n'y sont pas considérés comme de sérieux déficits, mais plutôt comme une plus-value d'ordre rituel. Les humains différents, certains amputés ou atteints de troubles neurologiques, semblent s'inscrire non plus comme des êtres assistés, de rang inférieur, mais comme des intercesseurs entre des mondes ainsi ouverts, ceux des vivants, des morts et des ancêtres.

LA TRÉPANATION : UN SAVOIR-FAIRE DU NÉOLITHIQUE EUROPÉEN

À partir du Néolithique, les sépultures deviennent plus nombreuses et les études anthropologiques permettent à la fois des diagnostics précis tout en reconnaissant les indices d'interventions chirurgicales. À Buthiers-Boulancourt (Seine-et-Marne), 4 700 ans avant notre ère, un homme âgé, amputé de l'avant-bras gauche, a été déposé en position fœtale, accompagné d'un viatique prestigieux : une longue hache polie en cornéenne et un grand pic en silex de plus de trente centimètres. L'amputation n'a pas entraîné la mort du patient, si l'on en croit le bourrelet osseux cicatrisé. Les soins et sa convalescence ont été assurés par son entourage. Amoindri et dépendant, cet homme a conservé son statut social, sans que sa déficience physique ait été prétexte à le déposséder des biens liés à son rang élevé (4).
À en croire les très nombreux témoignages de trépanation, l'une des plus archaïques tentatives d'extraction destinée à soulager un organe lésé concerne le cerveau. On a retrouvé des milliers de crânes trépanés (par grattage, raclage ou rainurage) à travers le monde, attribués à toutes les époques et toutes les cultures. Mais c'est indéniablement le Néolithique européen qui livre les plus spectaculaires spécimens de ces craniotomies, souvent issues des sépultures collectives – comme celle provenant de La Chaussée-Tirancourt, dans la Somme, datée de 3 200 à 2 200 ans avant notre ère. Ces crânes perforés témoignent de l'étendue des savoir-faire empiriques de neurochirurgiens expérimentés. L'issue d'une telle opération restait aléatoire : les séquelles fonctionnelles pouvant provoquer des handicaps, voire des désordres mentaux et psychomoteurs. Une aide au patient, au-delà de la convalescence, devenait indispensable.
On ne doit cependant pas mésestimer l'impact des guerres et de la violence, des maltraitances et des relégations, et certaines altérations des corps qui en résultent. L'archéologie en fait état et prend sa part dans la restitution d'une humanité parfois barbare et sans repère, qui crispe ses fondamentaux en temps de crise. Les groupes humains ont cependant su œuvrer en collectif pour accueillir et préserver certains individus vulnérables par leur condition physique, leur grand âge ou leur égarement psychologique. Parfois même, loin de les exclure car supposés inutiles dans des sociétés productivistes, ils les ont valorisés et leur ont attribué des tâches adaptées. Celles de l'esprit et des soins. Puis ils ont su les inhumer et sécuriser leur au-delà. ■

Handicap et archéologie

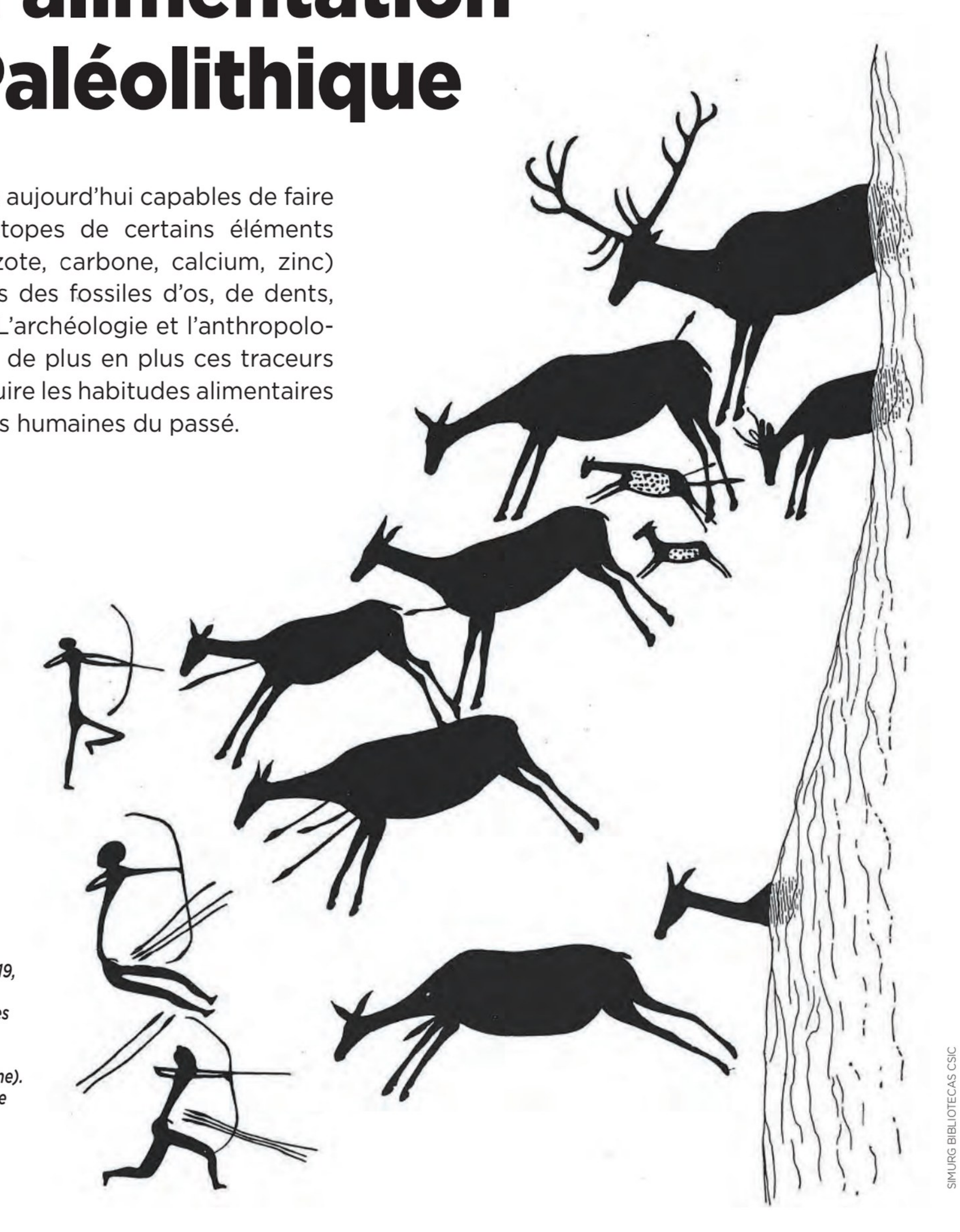
**Qu'est-ce que le handicap tel que perceptible en archéologie ?
Pour les instances internationales, le handicap est une *« déficience qui provoque l'incapacité »*.
Les juristes l'assimilent à une *« limitation d'activité ou une restriction de participation à la vie en société (…) en raison d'une altération substantielle, durable ou définitive d'une ou plusieurs fonctions physiques, sensorielles, mentales, cognitives ou psychiques, d'un polyhandicap ou d'un trouble de santé invalidant »*.
Cette acception a été reprise et développée en 2005, à l'occasion de la promulgation de la loi française pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées (1) : elle met en exergue l'idée d'empêchement d'une personne dans la société. Et c'est ainsi qu'ont été retenues les pathologies invalidantes caractérisant le handicap en archéologie, qui considèrent l'entrave dans le quotidien, la gêne pérenne liée à une maladie congénitale ou un accident de vie – y compris une simple fracture non réduite et mal consolidée –, tout en s'affranchissant des définitions administratives.**

(1) LOI n° 2005-102 du 11 février 2005 pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées, 2005.

(1) H. Coqueugniot *et al.*, *PLOS One, 9,* e102822, 2014.
(2) O. Dutour et A.-M. Tillier, *Paléo, 29,* 99, 2018.
(3) B. Maureille et E. Trinkaus, hal-03235751, 2021.
(4) C. Buquet-Marcon *et al.*, *Antiquity, 322,* 83, 2009.

Une lumière nouvelle sur l'alimentation au Paléolithique

Nous sommes aujourd'hui capables de faire parler les isotopes de certains éléments chimiques (azote, carbone, calcium, zinc) contenus dans des fossiles d'os, de dents, de cheveux… L'archéologie et l'anthropologie exploitent de plus en plus ces traceurs pour reconstruire les habitudes alimentaires de populations humaines du passé.



SIMURG BIBLIOTECAS CSIC

▶ *Ce dessin est tiré d'un livre publié en 1919, exposant l'histoire des peintures rupestres retrouvées dans les grottes du barranc de la Valltorta (Espagne). Il représente une scène de chasse aux cerfs datant d'environ 10 000 ans avant notre ère.*

Klervia Jaouan
CHARGÉE DE RECHERCHE
AU CNRS - LABORATOIRE
GÉOSCIENCES
ENVIRONNEMENT
TOULOUSE (GET)

Théo Tacail
CHERCHEUR
POSTDOCTORANT
À L'UNIVERSITÉ
GUTENBERG DE
MAYENCE, ALLEMAGNE

Si l'on vous demande quelles étapes majeures ont forgé l'espèce humaine telle que nous la connaissons aujourd'hui, peut-être répondrez-vous, la bipédie, l'amplification du volume cérébral ou encore l'acquisition du langage. Penseriez-vous à l'alimentation ? L'augmentation de la capacité crânienne entre les hominiés anciens (Australopithèques, Paranthropes) et les plus récents (Néandertaliens, humains modernes) pourrait en effet être liée à la réduction de l'appareil digestif associée à une progression croissante de la consommation de viande au cours de l'évolution humaine (1). L'énergie n'étant plus investie dans la digestion des plantes, elle aurait été allouée au fonctionnement d'un plus gros cerveau. Au-delà des évolutions biologiques, l'alimentation pourrait également être liée à la disparition de certaines espèces telles que les Néandertaliens. Leurs stratégies de subsistance auraient été incompatibles avec des changements climatiques (2).
Si l'on emploie ici autant de conditionnels, c'est parce que ces hypothèses sont difficilement testables. Certes, il existe de nombreuses méthodes documentant l'alimentation au Paléolithique (- 3,3 millions d'années à 13 700 ans) : la zooarchéologie et l'archéobotanique ; l'analyse des microrestes de plantes et de micro-ADN du tartre retrouvé sur les dents fossiles ; l'étude de la micro-usure de ces dents (les traces laissées par la nourriture sur la surface de l'émail dentaire) ; et même les peintures rupestres et les artefacts pour les périodes les plus récentes. Ces méthodes sont toutefois soumises à des limites, notamment parce qu'elles n'autorisent pas la quantification de la proportion de viande et de végétaux dans l'alimentation d'une espèce donnée. C'est ici que la chimie entre en scène. La plupart des éléments constituant notre planète mais aussi nos os, nos dents, nos cheveux ou toute autre partie de notre corps, sont présents sous la forme d'un mélange d'isotopes stables (*) ou radioactifs, dans des proportions quasi constantes. Quasi, car les réactions chimiques ou physiques provoquent d'infimes variations des proportions de ces différents isotopes dans les composés qu'elles produisent. Les réactions chimiques régulées par les systèmes biologiques n'échappent pas à la règle : les organismes vivants, eux aussi, trient subtilement les isotopes. Ce sont ces infimes variations que l'on exploite depuis la fin des années 1970 pour reconstruire des aspects quantitatifs de l'alimentation humaine des populations du passé.

DEUX ESPÈCES AVEC DES STRATÉGIES DE SUBSISTANCE DIFFÉRENTES

Cette approche a d'abord été fondée sur l'étude des isotopes stables du carbone (carbone 12 et carbone 13) et de l'azote (azote14 et azote 15), qui sont contenus dans le collagène des os et les dents, et sur l'étude des concentrations de certains éléments dans les ossements (du strontium et du baryum principalement). Les isotopes de l'azote sont utilisés afin d'estimer le niveau trophique d'un individu, c'est-à-dire sa position dans la chaîne alimentaire. Les analyses conduites sur des homininés européens de la fin du Paléolithique ont révélé que les proportions de l'isotope lourd (15) de l'azote par rapport à l'isotope léger (14), chez les Néanderta-

(*) **Un isotope stable** est un atome qui se distingue par son nombre de neutrons et qui ne se désintègre pas au cours du temps.

PHILIPP GUNZ - DR

liens, étaient un tout petit peu plus élevées que celles des animaux carnivores des mêmes sites, alors que ces proportions chez les humains modernes étaient variables mais régulièrement beaucoup plus élevées que dans le reste de la faune auxquels ils étaient associés. Il en a été conclu que ces deux espèces avaient des stratégies de subsistance différentes : les humains modernes étant capables de flexibilité et maîtrisant la pêche, alors que l'alimentation néandertalienne a été interprétée comme plus rigide, et leur légère anomalie isotopique comme la signature d'une consommation composée principalement de mammouth. Toutefois, l'analyse des isotopes de l'azote a, elle aussi, des limites. Elles tiennent par exemple au fait que le collagène contenant ces isotopes se dégrade au cours du temps, encore plus rapidement dans les régions arides ou tropicales. Nous n'avons donc pas accès à l'alimentation des homininés sur le continent africain, là où se sont déroulées des étapes clés de l'évolution humaine.

LES RÉGIMES ALIMENTAIRES AU PALÉOLITHIQUE

L'étude des différents traceurs chimiques a permis d'étoffer nos connaissances sur l'évolution de l'alimentation au Paléolithique, en fonction du groupe humain mais aussi du continent sur lequel celui-ci évoluait.

Traceurs isotopiques
- Carbone + azote (collagène)
- Carbone + azote (acides aminés)
- Zinc
- Calcium

Traceurs élémentaires
- Strontium et baryum

4 MILLIONS D'ANNÉES

AUSTRALOPITHECUS ANAMENSIS *(Afrique)*
Consommation de végétaux en forêt

≃ 3 MILLIONS D'ANNÉES

KENYANTHROPUS PLATYOPS *(Afrique)*
Herbivore généraliste (?)

LES ISOTOPES DU CALCIUM ET DU ZINC, UN OUTIL D'ÉTUDE PRÉCIEUX

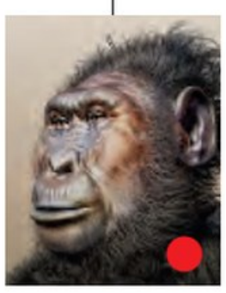
Les progrès dans le domaine de la spectrométrie de masse à partir des années 1990 ont cependant permis d'accéder à la composition isotopique de nouveaux éléments. Deux traceurs chimiques, qui peuvent être analysés dans l'émail dentaire – très résistant à la dégradation au cours du temps – se sont distingués : les isotopes stables du calcium et ceux du zinc. Le calcium présente l'avantage d'être un élément majeur de la bioapatite (*), dont il constitue près de 38 % de la masse. Cette abondance lui confère de nombreux atouts, parmi lesquels sa résistance aux modifications des compositions chimiques au cours de la fossilisation et la possibilité de réaliser des mesures à partir d'échantillons millimétriques, de quelques dizaines de microgrammes de bioapatite seulement. Depuis quelques années, les isotopes du calcium offrent donc un outil précieux pour l'étude de l'alimentation des homininés du Paléolithique. L'analyse de l'émail dentaire de près de soixante-dix homininés et autres primates fossiles du Pléistocène du bassin de Turkana, en Afrique de l'Est (entre 4 et 2 millions d'années), a ainsi montré que les premiers représentants du genre *Homo* se distinguent de leurs contemporains les plus proches, Australopithèques et Paranthropes, par une alimentation plus opportuniste et omnivore, quand les autres consomment essentiellement des ressources végétales. L'analyse des isotopes du calcium fait ressortir par ailleurs que les Paranthropes avaient une alimentation très spécialisée dans l'exploitation de ressources végétales particulières, cependant encore non identifiées. De la même manière, l'étude de l'écologie trophique d'un individu néandertalien du Sud-Ouest de la France a montré l'importance de la consommation de viande et particulièrement de la moelle osseuse de grands herbivores (3).

Les isotopes du calcium permettent aussi de traquer une ressource cruciale, riche en calcium : le lait. Auparavant, l'étude des pratiques d'allaitement et de sevrage chez les espèces fossiles était particulièrement ardue. Or la diversité des pratiques de sevrage du lait maternel reflète des stratégies écologiques diverses, produits de l'évolution. Leurs implications sont nombreuses, tant sur le plan du développement des enfants (et de leurs cerveaux) que sur les structures et fonctionnements des groupes sociaux permettant aux individus de sexe féminin d'allaiter longtemps. Une étude portant sur une quarantaine de dents d'homininés fossiles d'Afrique du Sud a ainsi montré que l'émail dentaire des premiers représentants du genre

(*) **La bioapatite** est la phase minérale de l'os et des dents.

M. CROW /CLEVELAND MUSEUM OF NATURAL HISTORY /AFP PHOTO - W. SCHNAUBELT & N. KIESER

2 À 3 MILLIONS D'ANNÉES



PARANTHROPUS BOISEI *(Afrique)*
Herbivore spécialisé

AUSTRALOPITHECUS AFRICANUS *(Afrique)*
Herbivore
Allaitement court (quelques mois)

1 À 2 MILLIONS D'ANNÉES

PREMIERS HOMO *(Afrique)*
Omnivore
Allaitement prolongé (plusieurs années)

PARANTHROPUS ROBUSTUS *(Afrique)*
Herbivore spécialisé
Allaitement court (quelques mois)

≃ 110 000 ANS

NÉANDERTAL *(Europe)*
Carnivore
Chassant le mammouth, consommant de la moelle osseuse mais pas de sang

≃ 60 000 ANS

HOMO SAPIENS DE TAM PA LING *(Asie)*
Omnivore

50 000 À 12 000 ANS

HOMO SAPIENS *(Europe)*
Omnivore
Plutôt pêcheurs ou consommateurs de viande

≃ 12 000 ANS

HOMO SAPIENS DE MECHTA-AFALOU *(Afrique)*
Omnivore
Pas de consommation de produits laitiers

Homo (*Homo habilis, Homo rudolfensis, Homo erectus* – les restes dentaires identifiés comme appartenant au genre *Homo* ne sont pas toujours aisément attribuables à l'une de ces espèces plutôt qu'une autre) enregistre des périodes d'allaitement significativement plus longues, pouvant aller jusqu'à quatre ans, alors que les jeunes Australopithèques (*A. africanus*) et Paranthropes (*P. robustus*) sont probablement sevrés au cours de leur première année de vie (4).

DES NÉANDERTALIENS 100 % CARNIVORES

Pour des périodes plus récentes, et au-delà du Paléolithique, les isotopes du calcium se révèlent utiles pour quantifier la consommation de produits laitiers tirés des animaux qui ne seront domestiqués qu'au cours du Néolithique (*). Des études portant sur des populations humaines du Paléolithique jusqu'à nos jours indiquent ainsi que le lait animal n'est devenu une ressource majeure de calcium que plusieurs millénaires après les premières révolutions néolithiques au Proche-Orient et au Levant (5). Les isotopes du zinc, eux, se sont révélés d'excellents traceurs du niveau trophique, tant dans les milieux terrestres qu'aquatiques. Pour le moment, la méthode n'a été appliquée qu'à deux homininés du Pléistocène provenant de deux contextes totalement différents : l'un des plus anciens fossiles d'*Homo Sapiens* d'Asie (40 000 à 60 000 ans), provenant du site de Tam Pa Ling (Laos) – une région alors couverte de forêt tropicale –, et un fossile d'individu Néandertalien du site du Paléolithique Moyen de Gabasa (Espagne), situé en moyenne montagne. Dans le premier cas, l'étude indique que cet humain moderne était omnivore et adapté au milieu forestier, et dans le second cas, que l'individu néandertalien était carnivore mais qu'il ou elle ne consommait pas de sang (6). Des travaux récents ont par ailleurs montré la préservation des isotopes du zinc dans des dents de requins âgés de plusieurs millions d'années (7), ce qui laisse présager des applications de ce traceur à l'alimentation de tous les homininés, même les plus anciens.

Des progrès révolutionnaires ont par ailleurs été accomplis autour des analyses isotopiques plus classiques du carbone et de l'azote. En effet, si l'émail dentaire contient peu de protéines, sa structure dense et compacte autorise la préservation de celles-ci sur de longues échelles de temps. Il en a découlé le développement de l'analyse isotopique de l'azote sur ces protéines, qui laisse

(*) **Le Néolithique** commence par l'avènement de l'agriculture et de l'élevage. La date de cette période varie selon les régions : par exemple, elle se met en place il y a 11 000 ans au Proche-Orient, mais il y a 6 500 ans en Irlande.

CICERO MORAES / MOACIR ELIAS SANTOS - D. EINSEL / GETTY IMAGES VIA AFP - SPL / SCIENCE PICTURE CO/ SUCRÉ SALÉ - SPL / J. BAVARO FINE ART - C. ARIAS/COVER/GETTY IMAGES - WALL TO WALL MEDIA/G. BARTHOLOMEW - D. HITZEMANN - CC BY-SA 4.0 - PH. PLAILLY / EURELIOS / LOOKATSCIENCES / E. DAYNES

promettre d'intéressantes applications dans les prochaines années. Si le collagène osseux ou de la dentine (la partie osseuse de la dent recouverte par l'émail dentaire) est préservé, il est également possible de réaliser, désormais, l'analyse isotopique du carbone et de l'azote non plus sur le collagène pris dans son ensemble, mais sur les acides aminés de ce collagène analysés séparément. Cette technique novatrice permet de déterminer avec précision un niveau trophique sans avoir besoin d'analyser la faune associée. On peut donc comparer des homininés venant de sites avec des contextes très différents.

Ces analyses ont confirmé la part prédominante de la viande dans l'alimentation des individus néandertaliens (80 à 100 % !). Celles-ci semblent aussi indiquer que les *Homo sapiens* du Paléolithique ne consommaient pas ou peu de ressources aquatiques mais, comme leurs cousins, beaucoup de viande (environ 70 %) et notamment du mammouth (8). L'alimentation des Néandertaliens et Néandertaliennes et des humains modernes aurait donc été très ressemblante, confirmant la similarité de leurs modes de vie, tant sur les aspects culturels que techniques, et maintenant alimentaires – après leurs rencontres au Proche-Orient et en Europe. Ces analyses seront peut-être un jour réalisables à partir des protéines retrouvées dans l'émail dentaire : il sera alors possible de quantifier la consommation de viande des Australopithèques et Paranthropes. Elles pourront être étayées par celles isotopiques du calcium et du zinc, qui apportent des informations sur la position d'un individu dans une chaîne alimentaire et d'autres sur la partie des proies consommées. ■

(1) L. C. Aiello et Peter Wheeler, *Curr. Anthropol., 36,* 199, 1995.

(2) S. El Zaatari *et al., PLOS One, 11,* e0153277, 2016.

(3) J. E. Martin *et al., Nat. Commun., 11,* 3587, 2020 ; P.-J. Dodat *et al., J. Hum. Evol., 151,* 102925, 2021 ; V. Balter *et al., Nature, 489,* 558, 2012.

(4) T. Tacail *et al., Sci. Adv., 5,* eaax3250, 2019.

(5) L. M. Reynard *et al., J. Archaeol. Sci., 38,* 657, 2011 ; T. Tacail *et al., Quat. Sci. Rev., 256,* 106843, 2021.

(6) N. Bourgon *et al., J. Hum. Evol., 161,* 103075, 2021 ; K. Jaouen *et al., PNAS,* sous presse, 2022.

(7) Mc Cormack *et al., Nat. Commun.,* sous presse, 2022.

(8) Y. I. Naito *et al., J. Hum. Evol., 93,* 82, 2016 ; K. Jaouen *et al., PNAS, 116,* 4928, 2019 ; D. G. Drucker *et al., Sci. Rep, 7,* 6833, 2017.

L'habillement, une affaire de plus en plus ancienne

En matière de technologie d'habillement et de chaussures à l'époque préhistorique, l'archéologie se heurte à un mur : le caractère extrêmement périssable des vestiges. Quelques rares témoignages existent cependant, souvent des traces ou des empreintes, ou des déductions très indirectes de leur présence. Si nous ne disposons pas d'un degré de résolution temporelle permettant de suivre l'évolution de l'habillement, il est toutefois fort probable que les modes vestimentaires devaient faire partie des préoccupations sinon quotidiennes, au moins générationnelles, de nos ancêtres.

Lysianna Ledoux
PRÉHISTORIENNE, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

Jacques Jaubert
PRÉHISTORIEN, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

De nombreux peuples vivent ou vécurent quasi nus, certes en régions tropicales ou équatoriales, mais parfois aussi sous des climats plus difficiles. Se couvrir répond en premier lieu à un besoin de protection contre le froid, coïncidant avec l'arrivée des homininés en haute latitude de l'hémisphère Nord, et sans doute aussi à la perte de leur fourrure. Fabriquant d'abord des vêtements simples et peu couvrants, les groupes humains auraient peu à peu confectionné des formes plus complexes et mieux adaptées contre le froid, ceci allant de pair avec l'élaboration d'un outillage de plus en plus spécialisé.

Un indice indirect et inattendu d'habillement est particulièrement instructif : les poux. D'après les études génétiques réalisées sur les poux du corps humain et leur divergence avec ceux de la tête, la systématisation du port de vêtement trouverait son origine dès le Paléo-

DR - V. FERUGLIO

lithique moyen (- 300 000 à - 40 000 environ) comme le suggère un exemple en Afrique du Nord (1). Mieux encore, les études génétiques sur les poux liés aux vêtements permettent d'estimer la date à laquelle les humains auraient pu les adopter : il y a 84 000 à 107 000 ans (début de la dernière période glaciaire), voire dès le cycle glaciaire précédent (il y a 170 000 ans).

FIBRES DE LIN ET POILS DE BOVIDÉ

Plus classiquement, les spécialistes ont mis au jour d'infimes vestiges de vêtements. La grotte de Dzudzuana, en Géorgie, aurait ainsi livré les plus anciennes traces de fibres de lin sauvage et de poils de bovidé, datées de 30 000 à 13 000 ans, utilisées pour tresser des paniers ou coudre des vêtements. Les empreintes ou impressions de vêtement renseignent parfois précisément, elles aussi, sur les pratiques de l'habillement. De tels témoignages sont rares mais, lorsque les conditions sont favorables, ils traversent les âges et proposent un instantané du passage des individus, de leur habillement et de leurs comportements. C'est ainsi qu'il y a environ 30 000 ans, des empreintes de textile se sont imprimées sur des fragments d'argile cuite retrouvés en République tchèque (2).

Pour la parure funéraire, des vêtements ont été réhaussés de perles ouvragées en os, en ivoire ou en pierre qui ont résisté à l'épreuve du temps. Celles-ci nous sont parvenues associées aux corps des défunts dans leur position d'origine, révélant le port d'habits et de bonnets cousus et ornés. L'un des témoignages les plus étonnants du port du vêtement concerne les somptueuses sépultures de Sunghir, en Russie : l'agencement de milliers de perles placées sur les défunts, datés de - 34 500 à - 32 600, nous laisse en effet admiratifs quant à la richesse et la sophistication de ces habits mortuaires (3).

Les premières empreintes de pieds chaussés, quant à elles, ont été retrouvées dans la grotte de Theopetra, en Grèce. Elles remonteraient à 135 000 ans, période qui correspond en Europe à l'extension des Néandertaliens. Récemment, notre équipe a mis au jour dans le sol argileux de la grotte de Cussac, en Dordogne, des empreintes de pieds probablement chaussés et datant d'il y a environ 30 000 ans (4).

Mieux conservés puisque moins fragiles, les outils utilisés pour confectionner les vêtements pourraient-ils nous fournir d'autres indices ? L'analyse d'outils en os retrouvés dans la grotte des Contrebandiers, au Maroc, attesterait la fabrication de vêtements entre 120 000 et 90 000 ans. Le travail des peaux pour les transformer en cuir est certainement maîtrisé par les premiers *Homo sapiens* et par leurs contemporains Néandertaliens comme en témoignent les outils mis au jour en Dordogne, à Combe-Capelle et à Pech-de-l'Azé. Ceux-ci (entre 45 000 et 60 000 ans) sont surtout des lissoirs pour assouplir les peaux : ils ne garantissent pas la confection de vêtements, mais au moins la transformation et l'usage de peaux pour se couvrir ou aménager un habitat. La présence fréquente de restes de carnivores non consommés, dépecés pour leur fourrure, va dans le même sens.

L'AIGUILLE À CHAS, L'OUTIL DE COUTURE

Parmi tous ces indices techniques indirects, un seul certifie de la fabrication de vêtements : l'aiguille à chas. Celle-ci permet de faire passer un fil pour assembler deux pièces, les coudre, confectionner un vêtement, une couverture. Cet outil, dont la forme et la fonction n'ont pas changé depuis le Paléolithique – sinon son matériau, de nos jours en acier, à l'époque en os – est attesté de manière certaine, pour la première fois en Europe, il y a 24 000 ans. Un exemplaire plus ancien, daté de 45 000 ans, a été signalé dans la grotte de Denisova , en Russie, mais son âge est problématique.

L'ensemble de ces témoignages nous convainc ainsi d'un fait essentiel : la fabrication de vêtements est une pratique ancienne, probablement partagée par différentes espèces humaines, qui n'a cessé d'évoluer. S'affranchissant de sa seule fonction protectrice initiale, le vêtement est devenu, au fil du temps, révélateur de bien des aspects culturels, chronologiques et sociaux propres à chaque population humaine, groupe social et culture. ■

(1) M. A. Toups *et al., Mol. Biol. Evol., 28,* 29, 2011.

(2) O. Soffer *et al., Curr. Anthropol., 41,* 511, 2000 ; D. C. Hyland *et al., Anthropologie, XL/1,* 1, 2002.

(3) E. Trinkaus *et al., Anthropologie, 53,* 221, 2015.

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

▲ *Les gravures qui ornent la tête de cette figurine féminine, sculptée dans de l'ivoire de mammouth et datant d'environ 21 000 ans avant notre ère, suggèrent le port d'un couvre-chef.*

JEAN-GILLES BERIZZI / RMN - GRAND PALAIS

POUR EN SAVOIR PLUS

■ Sophie de Beaune, *Préhistoire intime – Vivre dans la peau des* Homo sapiens, Folio, 2022.

Le jeu de pistes de la domestication du chien

Comment l'humain a réussi à transformer le loup en chien docile ? Cette question taraude les biologistes, archéologues et anthropologues depuis de longues années. Comprendre où, quand et comment s'est produite cette domestication est important pour assouvir notre curiosité, mais pas uniquement : d'un point de vue biologique, connaître les circonstances d'un tel développement peut nous donner des renseignements essentiels sur la rapidité des processus évolutifs. De nouvelles technologies, comme l'étude de l'ADN fossile, lèvent une partie du mystère.

▲ *Cette gravure rupestre a été découverte sur le site de Shuwaymis (Arabie saoudite), et pourrait être la plus ancienne représentation d'un chasseur en compagnie de canidés en laisse. Certaines analyses permettent de la dater à plus de 9 000 ans avant notre ère.*

MARIA GUAGNIN

Laurent Frantz
PALÉOGÉNÉTICIEN *Professeur de paléogénomique à la faculté de médecine vétérinaire de l'université Louis-et-Maximilien de Munich (Allemagne).*

Contrairement à tous les autres animaux domestiques – vache, cochon, poule, mouton ou cheval –, l'ancêtre du chien est la première espèce à s'être rapprochée de l'être humain, avant que nous nous sédentarisions il y a environ 10 000 ans. C'est donc le seul animal que nos ancêtres chasseurs-cueilleurs ont domestiqué, et donc la première espèce apprivoisée. Il existe plusieurs indices de cette longue histoire entre humain et chien, qui remonte à plus de 15 000 ans. Des sépultures canines ont notamment été retrouvées lors de fouilles archéologiques sur des sites datant de la fin du Paléolithique (il y a entre 18 000 et 11 700 ans) et du Mésolithique (il y a entre 11 700 et 10 000 ans) en Amérique, en Asie, au Moyen-Orient et en Europe (1). Le rôle joué par le chien dans les sociétés préagricoles est aussi visible dans l'art rupestre, comme en témoignent les fresques du site de Shuwaymis, dans la péninsule arabique. Celles-ci, datées de plus de 9 000 ans, représentent des scènes de chasse et des canidés tenus en laisse (2). D'autres éléments, matériels cette fois, ont également été mis au jour sur divers sites archéologiques. Sur l'Île Jokhov (Russie), à 500 kilomètres au nord de la Sibérie continentale, les archéologues ont ainsi retrouvé des objets de plus de 9 000 ans ressemblant à des sangles de harnais pour chiens de traîneau, taillés dans de l'ivoire de renne et de mammouth (3). Ces données sont toutefois insuffisantes pour conclure avec certitude qu'il s'agissait de chiens. Il est en effet difficile d'interpréter ce que des artistes d'il y a plusieurs millénaires ont voulu représenter, ou d'affirmer que les harnais découverts en Sibérie n'avaient pas une tout autre utilité. Il en va de même pour les ossements retrouvés dans les sépultures : des débats existent dans la littérature scientifique sur les méthodes à utiliser pour identifier chiens et loups à partir de ce type de restes.

DR

LES CONTOURS DE LA PALÉOGÉNÉTIQUE

C'est ici que la paléogénétique – l'étude de l'ADN fossile, qui s'est fortement développée au cours des dix dernières années – offre une opportunité sans égale. En effet, le code génétique d'un chien et celui d'un loup modernes diffèrent d'environ 0,15 %, ce qui autorise leur distinction par le biais de l'ADN. Il devrait donc également être possible de distinguer chiens et loups archéologiques grâce à la paléogénétique. Obtenir ce type d'informations n'est cependant pas simple, car l'ADN se dégrade vite à la suite de la mort de l'individu. Les scientifiques, comme ceux de notre laboratoire, ont néanmoins réussi ces dernières années à séquencer le génome de plusieurs chiens de plus de 10 000 ans retrouvés sur le site archéologique de Vertje, en Russie occidentale, soit plusieurs milliers d'années avant l'arrivée de communautés sédentaires dans la région (4). Ces découvertes fournissent des preuves tangibles que, contrairement aux autres animaux domestiques, le chien a bel et bien été domestiqué avant la sédentarisation de l'humain.

La paléogénétique reste dépendante de la préservation d'ADN dans les ossements. En outre, l'analyse de l'ADN fossile seul ne permet pas de répondre à toutes les questions. Par exemple,

ENTRE 14 700 ET 18 000 ANS

C'EST L'ÂGE des plus anciens restes attribués avec certitude à des chiens. Ils ont été trouvés sur les sites archéologiques de Bonn-Oberkassel (Allemagne) et d'Afontova Gora (Russie).

elle ne renseigne pas sur l'origine géographique d'un chien dont les restes ont été découverts sur un site archéologique, ni sur l'époque et le lieu effectifs de sa domestication.

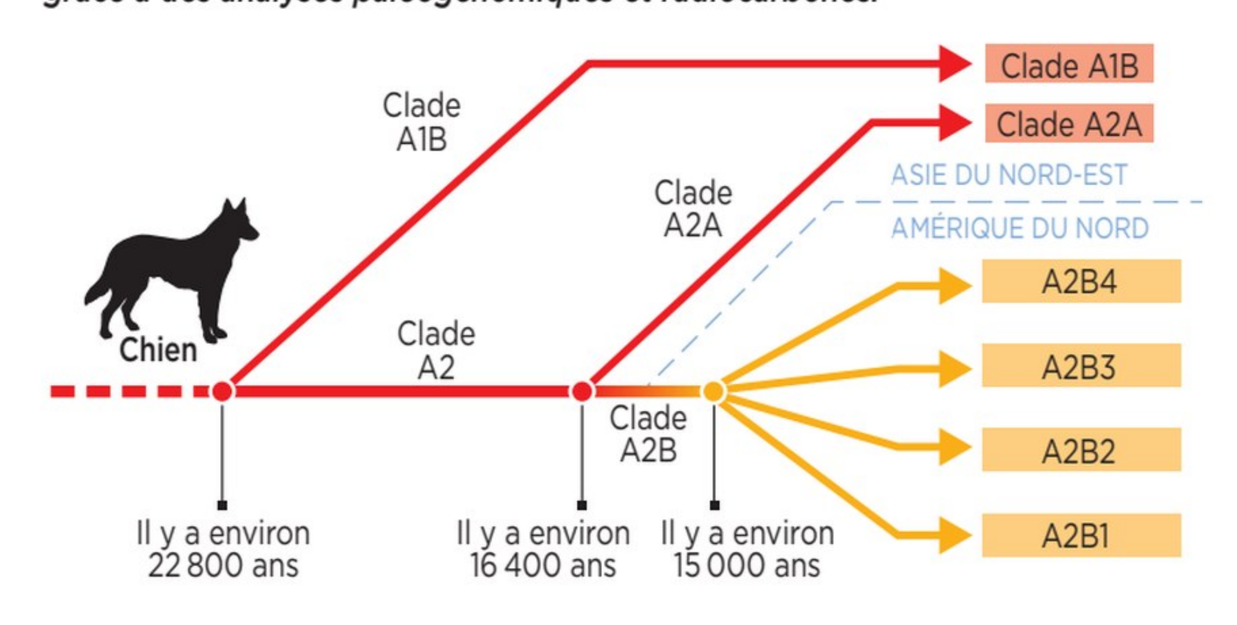
L'ANCÊTRE DU CHIEN, UN LOUP MOBILE ?

Ce problème est d'autant plus complexe que nous avons affaire à des sociétés mobiles de chasseurs-cueilleurs, qui occupaient de vastes territoires. Il est ainsi tout à fait concevable qu'en quelques centaines d'années après sa domestication, le chien ait diffusé partout en Eurasie. La répartition géographique des sites où l'on a mis au jour les plus vieux ossements de chiens (datés de plus de 12 000 ans) illustre bien le sujet : ils ont été retrouvés en Europe, en Asie et au Moyen-Orient. Ce qui nous a poussés, en 2016, à émettre l'hypothèse que le chien a été domestiqué à plusieurs reprises au cours du temps. Dans cette perspective, le faible nombre d'ossements (environ 15) attribués à des chiens de plus de 12 000 ans rend difficile la possibilité de se prononcer sur l'origine géographique du chien et le nombre possible de domestications. Pour découvrir cette origine géographique, ne devrions-nous donc pas nous intéresser à son ancêtre le loup qui, lui, occupe la plupart de l'Eurasie et de l'Amérique du Nord ? En théorie, le chien pourrait être plus proche d'une population de loups que des autres, génétiquement parlant. Cette population constituerait ainsi la source sauvage des chiens. Hélas, les analyses génétiques des dix dernières années ont montré qu'une telle population n'existe plus. En fait, nos travaux sur l'ADN ancien révèlent que toutes les populations de loups qui, de nos jours peuplent l'Eurasie et l'Amérique du Nord, sont originaires de Sibérie orientale d'où elles se sont dispersées il n'y a guère plus de 10 000 ans. En d'autres termes, la grande majorité des populations de loups qui peuplaient le monde il y a plus de 10 000 ans, y compris l'ancêtre du chien, ont disparu.

Pourra-t-on, un jour, identifier cette population ? Identifier la source sauvage du chien par le biais de l'ADN ancien suppose tout d'abord de réussir à couvrir un territoire gigantesque, du Kamtchatka en Russie à l'est au Portugal à l'ouest, et de la Sibérie au nord à l'Inde au sud.

ÉVOLUTION DE LA LIGNÉE DU CHIEN

Cet arbre représente la lignée canine la plus répandue et les époques estimées de divergence des différents groupes monophylétiques (issus d'un même ancêtre souche ou clade) pour la période -24 000 à -10 000. Ces dates ont été obtenues grâce à des analyses paléogénomiques et radiocarbones.



En outre, l'ADN n'est pas toujours bien préservé dans ces régions, particulièrement quand le climat est chaud ou humide, comme en Asie du sud ou au Moyen-Orient. Autant dire que la quête – qui s'apparente au graal des paléogénéticiens – va prendre du temps. Nous avons commencé cette recension globale, mais sans succès à ce stade : notre récente étude (sous presse), qui détaille l'analyse de plus de 100 génomes de loups d'Eurasie datant de 10 000 à 100 000 ans, n'a pas permis d'identifier de population de loups qui soit plus proche des chiens que des autres populations de loups (5).

Il est donc possible que l'on ne trouve jamais cette population ancestrale de loups. Il est aussi envisageable que cette trouvaille ne nous renseigne pas sur l'origine géographique du chien. C'est l'hypothèse de plusieurs de mes collègues, qui suggèrent que l'ancêtre du chien était un loup mobile qui, comme l'humain, suivait les troupeaux de grands herbivores en Eurasie – ce qui voudrait donc dire que le chien n'a pas d'origine géographique précise. Dans un article publié en 2021 (6), qui combine données paléogénétiques et archéologiques, nous avons montré que les chiens ont été du voyage lors d'une étape de la colonisation des Amériques par l'être humain, il y a plus de 20 000 ans. Cette découverte repousse l'âge minimum de la domestication du chien de plus de 5 000 ans et fait de la Sibérie orientale – la région d'origine des pionniers américains – une zone centrale pour la domestication. ■

(1) M. Ní Leathlobhair *et al.*, *Science, 361,* 81, 2018 ; A. Perri *et al., Am. Antiquity, 84,* 68, 2019 ; M. Germonpré *et al., J. Archaeol. Sci., 78,* 1, 2017 ; E. Tchernov et F. F. Valla, *J. Archaeol. Sci., 24,* 65, 1997 ; L. Janssens *et al., J. Archaeol. Sci., 92,* 126, 2018.

(2) M. Guagnin *et al., J. Anthropol. Archaeol., 49,* 225, 2018.

(3) V. V. Pitulko et A. K. Kasparov, *J. Archaeol. Sci. Rep., 13,* 491, 2017.

(4) A. Bergström *et al., Science, 370,* 557, 2020 ; T. R. Feuerborn *et al., PNAS, 118,* e2100338118, 2021.

(5) A. Bergström *et al., Nature*, sous presse, 2022.

(6) A. R. Perri *et al., PNAS, 118,* e2010083118, 2021.

BRUNO BOURGEOIS

Conflits armés dans la vallée du Nil

La nécropole de Jebel Sahaba, au Soudan, a longtemps été considérée comme un exemple clé de l'émergence, à la Préhistoire, de la guerre organisée. De récents travaux suggèrent qu'elle pourrait plutôt témoigner d'épisodes récurrents et sporadiques de violence interpersonnelle.

Situé dans la vallée du Nil, dans la partie soudanaise de la Nubie, le cimetière de Jebel Sahaba est emblématique de l'émergence d'une violence organisée durant la Préhistoire. Les ossements retrouvés de soixante et une personnes portant des lésions osseuses caractéristiques et remontant à 13 000 ans étaient considérés comme le plus ancien témoignage d'une guerre entre groupes de chasseurs-pêcheurs-cueilleurs. Les premières constatations ont été publiées dès 1968 par l'anthropologue américain Fred Wendorf (1924-2015). Cependant, aucune analyse n'avait été entreprise pour discuter de l'origine des lésions observées, de la spécificité de l'industrie lithique associée aux défunts et de la nature de ce complexe funéraire. C'est l'objectif du travail que nous avons entrepris entre 2013 et 2019, à partir des restes aujourd'hui conservés au British Museum à Londres (1).

Plus d'une centaine de lésions, cicatrisées ou non, ont été identifiées sur des individus grâce à un examen microscopique de tous les restes osseux et l'utilisation des critères de détermination de traces d'impacts de projectiles établis par l'archéologie expérimentale. Certaines de ces lésions présentaient des éclats lithiques non reconnus au préalable, encore fichés dans les ossements. Au total, sur les soixante et un individus inhumés, près des deux tiers présentent des lésions et plus de la moitié montrent des traces d'impacts de projectiles. Par ailleurs, toutes les catégories – femmes, hommes et enfants – ont été touchées sans distinction : l'observation chez 40 % des individus avec lésions, de traumatismes à la fois cicatrisés et non cicatrisés, montre que les épisodes de violence n'étaient pas toujours mortels et pouvaient se répéter à l'échelle de la vie d'une personne. Les armes ayant causé ces blessures auraient été des projectiles composites, c'est-à-dire des armes de jet constituées de plusieurs pièces lithiques.

À Jebel Sahaba, la présence simultanée de lésions traumatiques cicatrisées et de lésions survenues peu de temps avant la mort (péri-mortem) soutient l'idée d'une répétition d'épisodes sporadiques de violence. Ces observations, associées aux résultats de l'analyse démographique de la nécropole, laissent supposer qu'une partie des membres de la communauté de chasseurs-pêcheurs-cueilleurs inhumés ont été victimes de raids ou d'embuscades dans le cadre d'un conflit de longue durée, mais de faible importance. D'autres sites de cette période montrent des cas similaires : des traces de violence interpersonnelle ont ainsi été documentées dans le cimetière de Wadi Halfa, sur l'autre rive du Nil.

Isabelle Crevecoeur
PALÉO-ANTHROPOLOGUE, BORDEAUX
Chargée de recherche au CNRS, elle est spécialisée dans les périodes les plus récentes de la Préhistoire en Afrique et en Europe. Quand elle n'est pas sur le terrain, elle mène ses recherches au laboratoire PACEA à Bordeaux (CNRS - université de Bordeaux - ministère de la Culture).

DR

DES VARIATIONS CLIMATIQUES MAJEURES ET UNE PRESSION ENVIRONNEMENTALE

La fin du Pléistocène supérieur, entre environ 20 000 et 11 000 ans, est marquée par des variations climatiques majeures liées à la fin de la dernière période glaciaire et au début de la période humide africaine – qui débute vers 15 000 ans et ne se stabilise qu'à partir de 11 000 ans. L'abondance de sites archéologiques dans cette zone restreinte suggère que la région a pu fonctionner comme un refuge pour les populations soumises à ces fluctuations climatiques. Cette pression environnementale pour l'accès aux ressources est vraisemblablement l'une des origines de cette rivalité entre groupes humains, dont les individus inhumés dans la nécropole de Jebel Sahaba ont été acteurs ou en tout cas victimes. ■

(1) I. Crevecoeur *et al.*, *Sci. Reports, 11*, 9991, 2021.

Entretien avec **Carole Fritz**

« Il n'y a pas d'enfance de l'art »

Carole Fritz a travaillé dans différents sites d'art paléolithique, en France, en Espagne et sur d'autres continents. Surtout, depuis 2018, elle dirige l'équipe scientifique qui étudie la grotte Chauvet - Pont d'Arc, en Ardèche. Un lieu qui a bouleversé les paradigmes sur lesquels les spécialistes de l'art préhistorique travaillaient jusqu'alors.

Carole Fritz
ARCHÉOLOGUE, DIRECTRICE DE RECHERCHE AU CNRS
Elle est spécialiste de l'art préhistorique et responsable du Centre de recherche et d'études de l'art préhistorique Émile-Cartailhac (CREAP) à la Maison des Sciences de l'homme et de la société, à Toulouse.

La Recherche Vous étudiez la grotte Chauvet depuis les premières expéditions scientifiques et vous venez d'y diriger une nouvelle campagne de recherche. Est-ce toujours aussi émouvant de voir les fresques pariétales ?

Carole Fritz Oui, ça l'est. Même vingt-cinq ans après ma toute première visite ! La qualité graphique des fresques suscite un réel émerveillement. Les traits sont d'un dynamisme exceptionnel, ils nous racontent une histoire. Quand on est face aux différents panneaux, on a l'impression que, si l'on se retourne, les Aurignaciens – les premiers *Homo sapiens,* arrivés en Europe il y a 43 000 ans – sont derrière nous ! C'est Jean Clottes, spécialiste de l'art préhistorique du Paléolithique, qui m'a demandé de participer aux campagnes de recherche, en 1997. C'était époustouflant, j'y ai ressenti des émotions extrêmement fortes. Pour deux raisons : la qualité et la délicatesse des dessins, et l'état de conservation de la grotte.

Qu'est-ce qui rend ce lieu si important sur le plan artistique ?

Sa découverte, en 1994, après plus de 21 500 ans d'isolement, a bouleversé les paradigmes sur lesquels les scientifiques travaillaient. À l'époque, nous nous appuyions sur les réflexions de l'ethnologue, archéologue et historien André Leroi-Gourhan (1911-1986), qui avait publié en 1965 *La Préhistoire de l'art occidental.* Pour ce pionnier, l'art rupestre évolue au fil du Paléolithique supérieur, les dessins balbutiants des débuts aboutissant, au fil des millénaires, à des figures réalistes, comme les bisons polychromes que l'on peut admirer dans la grotte d'Altamira (Cantabrie, Espagne), peints il y a environ 18 000 à 20 000 ans. Or, les fresques de la grotte Chauvet qui comportent des dessins figuratifs complexes, polychromiques, ont été datées au carbone 14 et remontent à il y a 38 000 ans ! Autrement dit, il n'y a pas « d'enfance de l'art », pour reprendre une expression de Leroi-Gourhan. De fait, dès le début du Paléolithique supérieur, la maîtrise et la complexité des techniques sont déjà là, comme l'usage de la gravure, l'estompe et les nuances de gris, les détails anatomiques… En outre, à Chauvet, nous avons la sensation que ces dessins nous racontent une histoire.

Laquelle ?

Des mythes ! Inscrire des figures sur les parois des grottes était pour ces chasseurs-cueilleurs une manière de consigner ces histoires qui structurent leurs relations sociales, rappellent leur passé, évoquent leur futur. André Leroi-Gourhan suggérait déjà, en parlant de l'art rupestre paléolithique, qu'il s'agissait de

ROGER ARPAJOU

PATRICK AVENTURIER/GAMMA-RAPHO

▲ *Ce panneau de la grotte Chauvet (Ardèche), représentant ici le détail de têtes de lionnes, a été réalisé par des Aurignaciens il y a 38 000 ans.*

▲ *« Le panneau des Rhinocéros » de la grotte Chauvet est l'un des témoignages de la représentation importante des animaux, tels que le félin ou le rhinocéros laineux, dans l'art du Paléolithique supérieur. Ceux-ci étaient par ailleurs redoutés et avaient certainement une place prépondérante dans la mythologie des Aurignaciens.*

▶ *Page de droite : « Le pendant de la Vénus » est l'association d'une tête de lion, d'une tête de bison et d'un bassin féminin. Le sens de cette fresque reste encore difficile à déterminer.*

mythes. La grotte Chauvet nous apporte un argument fort puisque c'est certainement le premier site où on a cette impression.

Peut-on décoder ces histoires ?

Nous n'en connaissons pas la teneur, car nous ne disposons pas des clés pour décrypter le sens de ces fresques. André Leroi-Gourhan disait : *« On saisit l'ordre mais non le sens »*, comme *« l'habitant d'une autre planète qui déambulerait dans une cathédrale abandonnée »*. Les études anthropologiques montrent que, dans les sociétés sans écriture, il existe un mythe de la création. Alors, quand on observe le pendant de la Vénus dans la grotte Chauvet, où l'on distingue un bassin de femme associé à une tête de lion et de bison, on peut imaginer la mort, la vie… Mais nous ne pourrons jamais faire la démonstration de cette interprétation. Ce que nous savons, c'est que ce type d'association se retrouve dans d'autres grottes, que ces thématiques voyagent sur le territoire européen. Mais la réalité du récit relève de notre imagination…

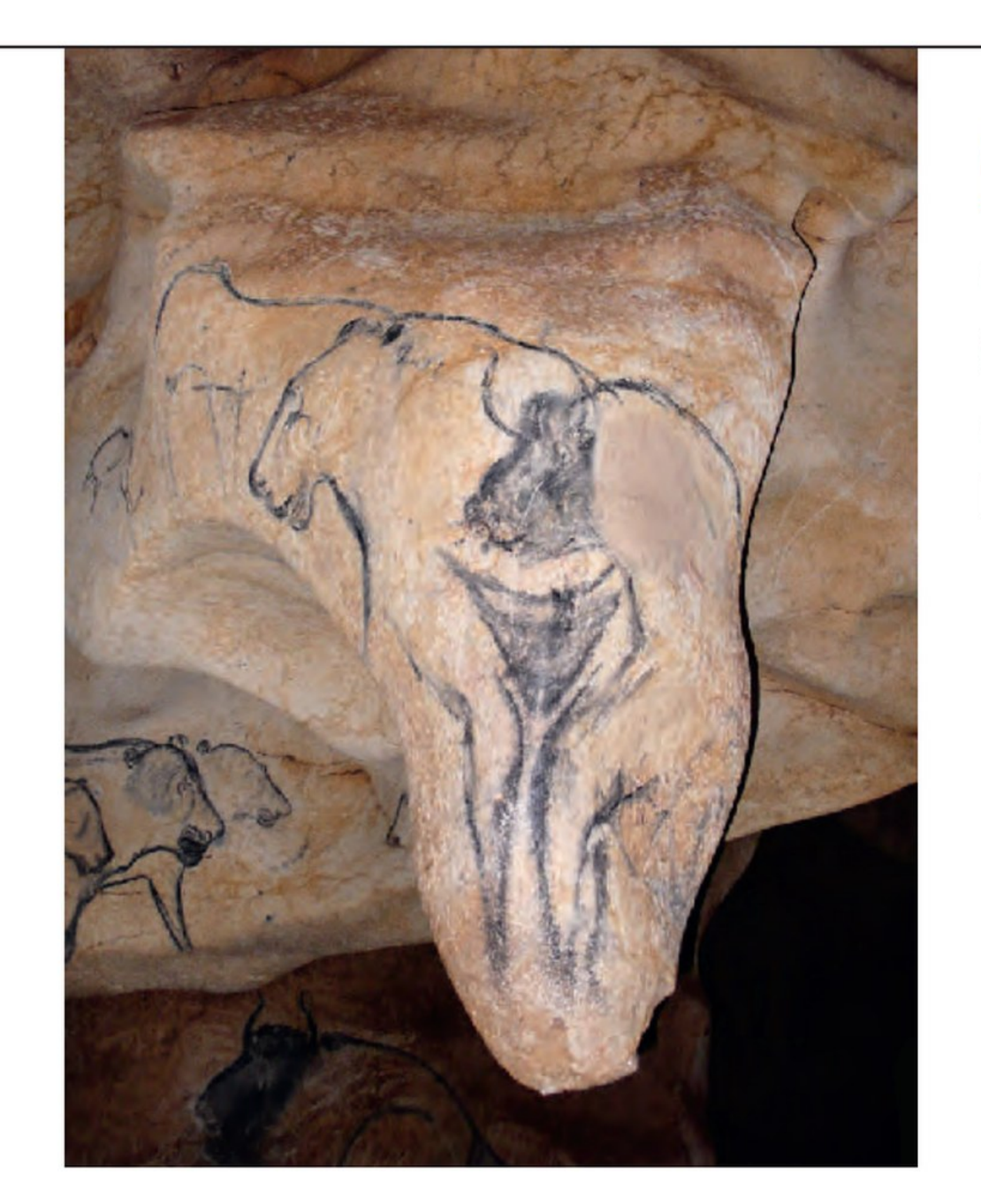
Existe-t-il d'autres grottes où cette association animaux/corps féminin est représentée ?

Oui, et pas que dans des grottes. On la retrouve sur des objets gravés. L'association femme/bison/félin qui est représentée à Chauvet a été identifiée en Europe centrale en même temps que l'association femme/félin/mammouth. Plus tard, au Magdalénien (vers - 15 000 ou - 16 000), l'on retrouve une association femme/bison/félin et une association femme/bouquetin/félin à Angles-sur-l'Anglin, en France. L'anthropologue et ethnologue Claude Lévi-Strauss (1908-2009) disait qu'un mythe ne meurt pas, il se transforme. Le récit est toujours le même ; ce qui change, ce sont les protagonistes. Dans la communauté scientifique, nous estimons être de plus en plus face à ce processus. C'est dans cette direction qu'on lance désormais les études, à savoir identifier les protagonistes que l'on retrouve sur des sites totalement différents, de l'Europe de l'Ouest jusqu'à l'Europe centrale et la Russie.

Qui sont les auteurs de ces dessins, des *Homo sapiens* ou des Néandertaliens ?

Ce sont des *Homo sapiens*. Je ne dis pas cela pour dévaloriser Néandertal, car ce dernier était certainement doué d'une pensée symbolique. Il est cependant peu probable qu'il ait été capable de réaliser des œuvres aussi spectaculaires que celles de Chauvet. Il fallait une maturité cognitive et sociale pour les produire. Le dévelop-

PATRICK AVENTURIER/GAMMA-RAPHO



CAROLE FRITZ, ÉQUIPE CHAUVET - MINISTÈRE DE LA CULTURE - CENTRE NATIONAL DE LA PRÉHISTOIRE

“La maîtrise et la complexité des techniques telles que la gravure, l’estompe et les nuances de gris sont déjà présentes au Paléolithique supérieur”

pement des nouveaux caractères dans la morphologie cérébrale et neuronale de *sapiens,* qui n’existait pas chez Néandertal, a sans doute été un processus lent qui s’est étendu sur de nombreuses générations. Cette durée pourrait expliquer le laps de temps considérable entre l’arrivée des *Homo sapiens* au Proche-Orient, vers - 90 000 ans, et les dates des premières manifestations graphiques complexes dans le Jura souabe (Allemagne), vers - 40 000 ans. Dans l’histoire anthropologique de *sapiens,* l’art est apparu à une date relativement récente et n’a ensuite jamais connu d’éclipse. Cette continuité suggère que la création et l’usage des figurations complexes auraient joué un rôle dans la cohésion sociale et la construction des cultures, à mesure que l’espèce a colonisé la planète.

Quelles sont les figures les plus représentées dans les grottes ornées du Paléolithique ?

L’art du Paléolithique supérieur est essentiellement tourné vers les animaux : cheval, bison, bouquetin, cervidés. Il figure aussi des animaux qui étaient certainement redoutés par *Homo sapiens* tels que les félins, les ours, les mammouths et les rhinocéros laineux. On comptabilise 150 félins dans tout l’art paléolithique, dont 75 sont présents dans les peintures de la grotte Chauvet ! Ils avaient sans doute une place importante dans la mythologie de ces sociétés. Généralement, ce sont les mêmes animaux que l’on retrouve, avec une fréquence différente selon les époques et en fonction de la particularité de la grotte. Prenons l’exemple de la grotte Cosquer, à Marseille : on y voit des représentations exceptionnelles de pingouins. Si ces animaux sont présents, c’est parce que la grotte se trouve au bord de la mer. Ces bestiaires spécifiques s’expliquent par le fait que les humains du Paléolithique sont si liés à leur environnement qu’ils y choisissent des porteurs de symboles.

Il y a cependant quelques représentations humaines sur les fresques de cette période…

La figure humaine correspond à 6 % des représentations connues de cette époque, c’est peu sur une période de plus de 30 000 ans. En outre, elle est très rarement naturaliste. Il y a deux ou trois exceptions mais, dans ces cas, l’humain est principalement mélangé avec d’autres éléments comme l’homme-lion de Holenstein-Stadel (Allemagne), une sculpture en ivoire de 29 cm. Par ailleurs, la majorité des représentations humaines sont des corps de femmes – c’est le cas, notamment, de toutes les statuettes du début du Paléolithique supérieur.

Comment définir les techniques picturales utilisées par les artistes préhistoriques ?

Leurs gestes techniques peuvent être classés en deux catégories : ceux qui procèdent par ajout de matière et ceux qui en éliminent. Les premiers concernent toutes les opérations liées à l’utilisation de pigments minéraux ou organiques. Et les seconds, les procédés qui concernent les préparations de support, la gravure, la sculpture. À cela, il convient d’ajouter les techniques mixtes combinant ajout et suppression de matière.

Avec quoi travaillaient-ils ?
Avec leur corps. C'est la main qui étalait le pigment, les doigts qui peignaient ou gravaient et le souffle qui projetait la couleur sur la paroi. Ce travail très physique apporte une dimension symbolique au geste. Ils utilisaient aussi des outils intermédiaires, comme le silex pour graver le calcaire et le charbon de bois pour le dessin au fusain.

D'où viennent les couleurs qu'ils utilisaient ?
Il s'agit de pigments minéraux ou organiques, tels que les charbons de bois. Les pigments minéraux demandent un investissement important : il est nécessaire de les collecter, de les préparer, de les broyer. La gamme des rouges provient des oxydes de fer, par exemple. Ils les trouvaient sous forme d'hématite (Fe_20_3). Sous cet aspect, elle paraît noire mais une fois réduite en poudre le coloris varie du brun au rouge, à l'orangé, au rouge carmin et jusqu'au violacé. Les parois des grottes fournissent aussi de la matière qu'ils associent aux pigments. Ainsi, à Chauvet, le calcaire un peu mou était mélangé au charbon de bois pour créer des à-plats gris bistre produisant ainsi des gammes allant du noir au gris clair, ce qui donnait du volume aux animaux. On peut considérer que ces artistes fabriquaient de la matière picturale, comme pour un tableau de chevalet où l'on mélange les couleurs à différents ligands. Dans ce nuancier rupestre, il existe également une main négative réalisée avec du pigment blanc à base de talc ou de talc-chlorite (silicate de magnésium et d'aluminium hydraté) dans la grotte de Gargas (Hautes-Pyrénées), unique dans l'art paléolithique.

Peut-on en déduire que l'artiste préhistorique est un spécialiste avec un statut particulier ?
Non, nous ne pouvons pas le dire. Il est toutefois certain qu'il existe une forme d'organisation sociale pour permettre la réalisation de ces fresques. Tout un groupe est impliqué. Il n'est pas concevable de descendre seul au fond d'une grotte pour faire ces dessins. Cela nécessite la préparation en amont des couleurs, de prévoir les branchages pour allumer des feux, de transporter le matériel. L'ensemble de la communauté est impliqué dans l'acte de création, même si tout le monde ne dessine pas. Certes, les dessinateurs étaient de merveilleux artistes, des Michel-Ange de -36 000 ans, mais je ne crois pas qu'ils aient eu un statut à part. Nous ne disposons en tout cas pas de preuves en ce sens.

▲ *Mise au jour dans la grotte de Marsoulas (Haute-Garonne), cette gravure datée d'il y a environ 19 000 ans représente un bison dont les quelque 500 points de pigment rouge ont été réalisés au doigt (pouce ou index).*

Certaines études de mains suggèrent la présence d'enfants, de femmes. Qu'en pensez-vous ?
L'étude des mains à partir de l'indice de Manning (*), pour déterminer s'il s'agit d'une main de femme ou d'homme, n'est pas très efficace. Les grottes présentent en effet de nombreuses empreintes, grandes et petites, mais il est délicat de déterminer à qui elles appartiennent. La participation des enfants est aussi complexe à appréhender. Les enfants peuvent avoir été présents. On sait que cela a été le cas dans la grotte du Tuc d'Audoubert (Ariège), où l'on a relevé les empreintes d'un enfant de 3 ans : il a grimpé une cheminée de 10 mètres de haut accompagné par des adultes, car il n'y a pas d'autres accès à ce réseau de grottes. Mais les enfants dessinaient-ils ? Souvent les dessins sont en hauteur. De plus, l'amplitude gestuelle d'un même trait suggère que l'artiste devait être de taille adulte. Par ailleurs, qu'est-ce qu'être enfant au Paléolithique supérieur ? À cette époque-là, l'enfance n'était pas celle de nos sociétés industrialisées ; vous étiez adulte beaucoup plus tôt qu'on ne l'imagine. Mais ce ne sont certainement pas des enfants de 3 ans qui ont réalisé ces œuvres.

Que signifient les dessins faits à la paume des mains ? Sont-ils des dessins préparatoires ?
Non, ce ne sont pas des esquisses. Il y a des dessins faits à la paume à Chauvet, comme un rhinocéros, et de grands ensembles non figuratifs de points dessinés avec les paumes colorées. On ne connaît cependant rien sur leur signification, on ne dispose pas des clés de déchiffrement.

Vous étiez à Chauvet au printemps dernier : reste-t-il des choses à découvrir vingt-cinq ans après les premières recherches ?
Oui, l'an dernier, afin d'effectuer des prélèvements pour des datations au carbone 14, nous sommes passés à côté d'un endroit où nous ne marchons pas habituellement. Et là, dans une bauge d'ours, nous avons aperçu des impacts d'outils qui forment des petits dessins. Ce n'est pas figuratif, mais c'est construit. À côté, nous avons retrouvé des petits crayons : des morceaux de stalactites qui servaient à graver les parois. Il y a encore un certain nombre d'endroits où nous ne sommes jamais allés et où nous n'irons

(*) **L'indice de Manning** est donné par le calcul du rapport entre la longueur de l'index et celle de l'annulaire de la main droite posée à plat. Le ratio entre ces deux doigts permettrait de déterminer le sexe de la personne.

(*) **La taphonomie** est la discipline de la paléontologie et de l'archéologie qui étudie la formation des gisements fossiles et tous les processus qui interviennent depuis la mort jusqu'à la fossilisation d'un organisme (y compris des pollens fossiles, étudiés par la palynologie).

C. FRITZ ET G. TOSELLO

pas pour ne pas abîmer les sols. Nous travaillons dans le strict respect de la conservation du site, qui existe depuis plus de 36 000 ans, peut-être même plus. Nous ne devons pas abîmer ce qui s'y trouve. Nous circulons seulement sur des sols durs, sinon on dispose des passerelles. La reconstitution en 3D de la grotte a également été réalisée, pour permettre des analyses à distance. Nous nous adaptons au site et non l'inverse !

Désormais, quels sont les objectifs de recherche à Chauvet ?

Le but est de comprendre les phases de réalisation des fresques, et surtout les phases d'interaction avec l'ours des cavernes qui fréquentait également le site. Debout, l'animal mesure plus de 3 mètres et il est opportuniste dans son alimentation. Nous supposons que les Aurignaciens l'évitaient. En cartographiant les griffades d'ours sur les parois et les dessins, en effectuant des datations, nous cherchons à saisir comment s'organisait la fréquentation de la grotte. Cependant, comme les datations au carbone 14 peuvent comporter une marge d'incertitude de plusieurs centaines d'années, il nous faudrait des chronomètres bien plus fins que ceux dont nous disposons pour établir dans le temps les alternances entre l'ours et l'homme dans la grotte.Pour pallier ces limites, nous combinons le plus d'informations possible.

Expliquez-nous…

Archéologues, spécialistes de la cartographie, géo-archéologues, spécialistes de l'art… Nous travaillons ensemble sur site, et nous croisons nos données depuis 2018 grâce à des documents communs. Par exemple, si un géologue regarde la taphonomie (*) de la surface de la paroi où se trouve le dessin, j'ai le même document pour faire le relevé. Nous pouvons ainsi croiser nos informations. C'est pareil avec la paléontologie et ceux qui étudient les ossements au sol : nous examinons les sols pour voir s'il n'y a pas de traces particulières des foyers ; de leur côté, ils ont l'étude des empreintes d'ours, la position des ossements… L'objectif est de percevoir le site dans sa globalité, de saisir les interactions entre les différents protagonistes des lieux, de faire de l'anthropologie sociale. Toutes les disciplines sont mobilisées pour une archéologie globalisante qui nous permettra d'en apprendre davantage. ■

Propos recueillis par Mathias Germain

DR

L'Histoire commence avec les tombes

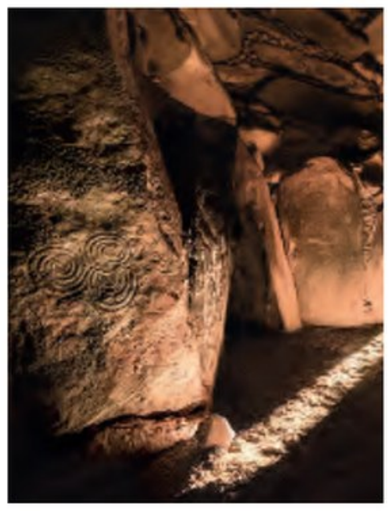
L'existence de tombes bien antérieures à l'apparition de notre espèce *Homo sapiens* est désormais reconnue. Pour les plus récentes, les techniques de paléogénomique permettent de préciser les réseaux de parenté des inhumés : les préhistoriens apprennent ainsi à mieux connaître les rites et les organisations collectives, en particulier au Néolithique européen.

Éric Crubézy
PROFESSEUR D'ANTHROPOBIOLOGIE ÉVOLUTIVE, UNIVERSITÉ TOULOUSE III – PAUL-SABATIER

Il est spécialiste des rites funéraires et de paléogénomique, ses travaux actuels portent sur la diffusion de la culture sur la base de la confrontation des données matérielles et des liens de parenté dans les ensembles funéraires.

Les premières tombes ont longtemps été considérées comme des « bornes temporelles » dans l'histoire de l'humanité. Elles auraient marqué le moment où les ancêtres de l'être humain ayant acquis une pensée symbolique seraient devenus véritablement humains, soit *Homo sapiens* voire *Homo religiosus*. Cette approche, apparue au XIXe siècle, doit beaucoup à Saint Augustin (354-430), un père de l'Église qui parlait de « devoir d'humanité » à propos des tombes. Dès lors, il ne pouvait y avoir de sépulture pour ceux qui n'étaient pas des *Homo sapiens*. Quand bien même des préhistoriens parvenaient à montrer que des corps néandertaliens avaient été inhumés, certains de leurs collègues considéraient au mieux que ceux qui avaient ainsi procédé l'avaient fait exclusivement pour se débarrasser d'une dépouille devenue encombrante… Refusant d'y voir une tombe. Celle-ci est en effet synonyme de l'expression de la peine des proches, d'un positionnement sociétal,

La « thanatologie évolutive » analyse la diversité des comportements face à la mort



▲ *Orné de gravures, ce dolmen à couloir du célèbre site de Newgrange (Irlande) est l'un des exemples les plus monumentaux de tombes collectives du Néolithique en Europe (autour de 6500 à 2300 ans avant notre ère).*

de la mise en place d'un imaginaire autour du mort. L'inhumation le métamorphose en défunt et permet de l'inclure, d'une façon différente de lorsqu'il était en vie, dans les relations des vivants. Cependant, au cours de la dernière décennie, plusieurs de ces « barrières » intellectuelles concernant les sépultures les plus anciennes sont tombées.

Au XXe siècle, des tombes de plus de 90 000 ans renfermant des humains anatomiquement modernes [proches d'*Homo sapiens*] ont été reconnues sur le site de Qafzeh, en Israël, grâce à des méthodes essentiellement basées sur l'observation. Aujourd'hui, la démonstration du caractère intentionnel du dépôt du corps joint à l'attention qui lui a été portée – deux éléments nécessaires à la reconnaissance d'une tombe –, nécessite des analyses géochimiques, granulométriques (analyse de la taille des particules), micromorphologiques (analyse des sédiments au microscope) et histologiques (analyse des tissus). Ces analyses consolident encore les hypothèses de creusement volontaire d'une fosse, puis du dépôt d'un cadavre et de sa décomposition *in situ*. C'est le travail qui a été fait pour la plus ancienne tombe connue d'*Homo sapiens* en Afrique, découverte au Kenya, et qui remonte à 78 000 ans environ (1). Ce renouveau a entraîné la reprise des fouilles et de l'analyse des contextes archéologiques sur des sites où avaient été mis au jour des Néandertaliens, faisant tomber les dernières réticences sur l'existence de tombes dans leurs populations (2). Récemment, la découverte d'une nouvelle tombe néandertalienne à Shanidar (Irak), datée de 60 000 à 70 000 ans, permet de proposer l'existence d'un ensemble sépulcral associé à des dépôts volontaires d'objets (3).

Qu'en est-il des périodes plus anciennes et des fossiles plus éloignés de nous ? Les grottes de Rising Star (Afrique du Sud) ont livré les restes d'une quinzaine de sujets pour l'une et de trois pour l'autre, attribués à une espèce appelée *Homo naledi* et datés d'il y a environ 300 000 ans. Près de cinquante mille ans auparavant, dans le gouffre de la Sima de los Huesos (Espagne), vingt-huit squelettes, ancêtres des Néandertaliens, ont été déposés dans une chambre qui communique avec la surface par une « cheminée » de 13 mètres de haut. Après avoir discuté différentes possibilités, dans les deux sites, les auteurs concluent à un dépôt intentionnel des corps (4). Cette démarche de « cacher » les corps sous terre correspond donc à un rite et, plus exactement, à un rite de séparation. Elle nécessite un effort – au moins un transport du cadavre –, et une mise en scène minimale, qui implique qu'une fois le corps déposé dans la grotte et les vivants repartis, ces derniers reconstruisent mentalement l'image qu'ils avaient de l'individu décédé désormais agrégé à un autre monde dont le support matériel était la cavité. Ces grottes définissent ainsi un espace des morts qui renvoie à un espace des vivants ; elles structurent l'environnement de la communauté. En créant une barrière, elles représentent le regard que les vivants désirent que leurs contemporains aient sur ces personnes décédées. La présence d'un biface de quartzite rouge dans le dépôt de la Sima de los Huesos a par ailleurs fait couler beaucoup d'encre sur la définition d'« offrande ». Toutefois, la présence du don de cet outil renforce l'hypothèse du deuil, qui ne paraît plus extravagante aujourd'hui comme elle pouvait l'être il y a encore quelques décennies.

LA RECONNAISSANCE DE LA MORT, OU LE DÉVELOPPEMENT DE LA CONSCIENCE

Les comportements de nos ancêtres face à la mort s'inscrivent actuellement dans un chapitre plus large, qui est celui de la thanatologie des primates, dont l'humain. En effet, les enregistrements vidéo, aujourd'hui plus aisés à obtenir, ont permis de constater que, chez les grands singes – chimpanzés et gorilles notamment –, le décès de certains membres du groupe peut amener des proches à prendre soin du corps de l'animal décédé. Cette attitude s'accompagne parfois d'une prostration des sujets pendant plusieurs jours, et de l'évitement du lieu où l'agonie s'est déroulée. Mais ces observations ne se sont pas limitées aux grands singes : d'autres animaux sociaux (éléphants, corvidés) auraient égale-

(*) La paléogénomique est une discipline scientifique visant à reconstruire des génomes anciens à partir d'ADN extrait de fossiles ou d'ossements.

(*) Un hypogée est une tombe creusée dans le sous-sol.

KEN WILLIAMS

ment des comportements particuliers lors de la mort d'un des leurs. C'est l'objet d'une nouvelle discipline nommée « thanatologie évolutive ». Elle prend en compte la diversité des comportements observée face à la mort, y compris aux différents âges de la vie. Ainsi, chez les jeunes enfants humains qui ne possèdent pas les mots pour parler de leur affect lors du décès de leur mère, l'expression de la perte diffère de celle des adultes et varie d'un enfant à l'autre. Dès lors, en prenant en compte ces éléments liés au développement chez l'humain au cours de l'évolution, le concept selon lequel des sujets inanimés étaient en fait morts et ne participeraient plus à la vie des groupes aurait pu apparaître avant la possibilité de penser au futur.

La reconnaissance de la mort de l'autre a aussi pu aller de pair avec le développement de la conscience et l'apparition des sentiments. Plus la conscience de soi et des autres augmentait, plus les sentiments se développaient et plus la nécessité d'avoir les autres à ses côtés lors de la mort d'un proche augmentait. Il se pourrait donc que la reconnaissance de la mort de l'autre, ou initialement de sa non-réponse aux stimulations, ait participé aux développements des processus de conscience et de socialisation. En d'autres termes : à l'humanité. Il pourrait y avoir des défunts sans tombe mais pas de tombe sans défunt. Les tombes les plus anciennes, plus que des « bornes », seraient l'expression de processus cognitifs et sociaux en plein développement et de transformation des morts en défunts.

Pour ces fossiles de plusieurs dizaines de milliers d'années, la paléogénomique (*) a eu une influence « souterraine » : en montrant que des échanges génétiques entre certaines lignées humaines remontaient à plus de cinq cent mille ans, elle a fait naître l'idée que certaines des espèces décrites dans le genre *Homo* n'avaient pas toujours été si éloignées, ni aussi isolées les unes des autres que ce que l'on pouvait penser il y a encore peu. Celles-ci n'étaient en fait que des populations qui ont pu se croiser à certains moments. Leur coexistence aurait permis de partager des comportements liés à la mort ou à sa reconnaissance. Toutefois, c'est pour la période néolithique en Europe (autour de 6 500 à 2 300 ans avant notre ère) que la paléogénomique a révolutionné les interprétations des ensembles funéraires. En effet, dans les tombes collectives telles que les dolmens, où les os des divers individus inhumés sont souvent mélangés, la paléogénomique permet de retrouver le sexe des défunts, les liens de parenté et de consanguinité, les lignées paternelles et maternelles au sein d'un même site, voire entre sites éloignés. En précisant qui y était inhumé, cette technique aide à mieux définir les ensembles funéraires afin de remonter « au monde des vivants » et à ses structures sociales et de parenté.

UNE RECONCEPTUALISATION DES SITES

Pendant longtemps, les préhistoriens ont considéré que les restes de ceux qui étaient retrouvés dans le même ensemble représentaient les membres d'une même communauté, parfois d'une même famille unie dans la mort. L'image qui se dégage des quelques sites déjà étudiés à l'aide de ces nouveaux outils est bien différente. En Champagne, deux hypogées (*) très proches, creusés dans la craie, ont fonctionné au même moment et pour la même famille, alors que, pendant longtemps, on postulait des fonctionnements successifs (5). En Angleterre, deux chambres sépulcrales situées dans un même monument ont là aussi été utilisées simultanément (6). Plus de trente sujets sur cinq générations y ont été déposés. Un homme, considéré comme le sujet fondateur, a eu des enfants avec quatre femmes. La plupart des sujets se rattachaient à l'une de ces quatre lignées maternelles et une chambre n'a reçu que des sujets de deux lignées, alors que des sujets non apparentés sont retrouvés dans les deux.

De telles observations restent à confronter à des exemples ethnologiques d'organisations sépulcrales semblables, mais elles signent l'importance du fondateur (qui aurait fait ériger le monument ?) et celle des lignées de ses femmes dans sa constitution. La signification de tous ces sites, dénommés jusqu'à présent sur des bases architecturales (dolmens, grottes sépulcrales, hypogées), pourrait désormais être établie sur des entités sociales (sépulture clanique, tombe familiale). Ainsi, en moins d'une décennie, l'étude des sépultures est entrée dans une phase de reconceptualisation liée à des avancées méthodologiques majeures. ■

▲ *Le biface de quartzite rouge Excalibur est le seul outil taillé retrouvé dans la tombe collective du gouffre de la Sima de los Huesos (Espagne). Son interprétation comme offrande rituelle a été longtemps débattue.*

JAVIER TRUEBA / MSF/ SCIENCE PHOTO LIBRARY / SUCRÉ SALÉ

POUR EN SAVOIR PLUS

■ Éric Crubézy, *Aux origines des rites funéraires*, Odile Jacob, 2019.

(1) M. Martinón-Torres *et al.*, *Nature, 593*, 95, 2021.

(2) W. Rendu *et al.*, *PNAS*, doi: 10.1073/pnas.1316780110, 2013.

(3) E. Pomeroy *et al.*, *Antiquity, 94*, 11, 2020.

(4) N. Sala *et al.*, *J. Archaeol. Sci., 55*, 113, 2015 ; J. Hawks et L. Berger, *In Theology and Evolutionary Anthropology*, C. Deane-Drumond et A. Fuentes (dir.), Routledge, p.51, 2020.

(5) A. Seguin-Orlando *et al.*, *Curr. Biol., 31*, 1, 2021.

(6) Ch. Fowler *et al.*, *Nature, 601*, 584, 2021.

Start-up Des technologies au service de l'archéologie

En s'appuyant sur les isotopes, la science date précisément les artefacts. Grâce au séquençage de l'ADN, elle retrace l'épopée du genre humain. Mais son allié le plus récent et le plus versatile est le nombre. Les sciences du numérique modélisent, simulent des réalités lointaines, et l'intelligence artificielle produit des hypothèses. De jeunes pousses versées dans ces techniques s'impliquent dans la recherche et la vulgarisation de la Préhistoire.

CRAFT.AI
UNE INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LA GROTTE DE TAUTAVEL

- Créée en mai 2015
- Effectif : 31
- Levée de fonds : 5 M€ en 2019

Les préhistoriens sont des Sherlock Holmes. Eux aussi cherchent à « faire parler » le moindre indice retrouvé lors de fouilles archéologiques. Des responsables d'un projet de recherche dans la caune de l'Arago, à Tautavel (Pyrénées-Orientales), ont récemment fait appel à la start-up Craft.ai, spécialiste en intelligence artificielle, pour les y aider. La caune de l'Arago est un site préhistorique d'une grande richesse. On sait aujourd'hui que cette vaste cavité, surplombant une vallée et un cours d'eau, a été fréquentée par les humains à au moins cinquante reprises, entre il y a 600 000 et 90 000 ans. Cinquante-quatre ans de fouilles ont alimenté la base de données du Centre européen de recherche préhistorique de Tautavel (CERPT), qui référence près de 500 000 objets dont des ossements d'animaux, des produits d'industrie lithique, des sédiments et des pollens. À quoi ressemblait l'environnement de ces humains ? Comment vivaient-ils ? Se sont-ils installés ou étaient-ils de passage ? Si les préhistoriens savent interpréter ces indices, faire appel à l'intelligence artificielle peut être plus efficace encore. C'est le sens du projet Schopper, financé par l'Agence nationale de la recherche et piloté par l'UMR 7194 (CNRS/MNH – université de Perpignan – Via Domitia), qui a démarré en 2017. Sophie Grégoire, maître de conférences à l'université de Perpignan, était jusqu'en 2021 directrice du CERPT et coordinatrice du projet. Celui-ci *« avait deux grands objectifs,* explique l'archéologue. *D'une part, il s'agissait de produire des hypothèses de reconstitutions paléoenvironnementales pour toutes ces périodes de fréquentation de la grotte par l'humain. D'autre part, de formuler des hypothèses comportementales concernant ces visiteurs, à partir des outils et des traces sur les carcasses animales ».* Pour cela, deux modèles relevant de l'apprentissage automatique ont été conçus par Craft.ai : *« Nous avons testé toutes sortes de modèles de classifieurs,* explique François Pellissier, directeur technique. *Nous avons obtenu les meilleurs résultats avec la méthode du* "gradient boosting", *qui est rapide, robuste et surtout frugale en données. »* Or dans ce projet, les jeux de données sont maigres. *« Nous voulions par ailleurs rendre nos modèles "explicables",* ajoute Matthieu Boussard, responsable R&D de l'entreprise, *c'est-à-dire capables de désigner les paramètres qui ont fait pencher la balance. »*

▲ *Détail d'une simulation immersive de la faune du site de la caune de l'Arago.*

Dans chaque couche stratigraphique correspondant à une période d'occupation de la grotte, les spécialistes ont collecté des pollens et des ossements, qui renseignent sur les espèces végétales et animales qui prospéraient à l'époque. Des indices permettant de

CRAFT.AI

reconstituer le biome, l'environnement biologique de l'époque. Chaque biome est associé à un climat qui a permis son épanouissement. Le modèle paléoenvironnemental devait rendre compte de cette relation biome/climat. *« Pour entraîner ce modèle,* explique Sophie Grégoire, *il fallait disposer d'un jeu de données étiquetées établissant cette relation entre espèces et climat. Aucune base de données adéquate n'existait. Il a donc fallu la construire, ce qui a représenté beaucoup de travail. Une fois entraîné, le modèle a été capable de fournir des hypothèses sur les climats correspondant aux espèces détectées dans chaque couche stratigraphique. »*

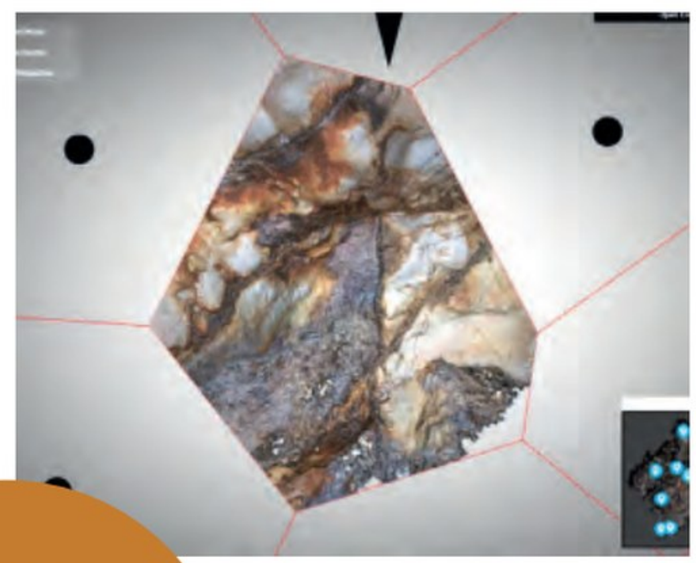
Nos ancêtres ont fréquenté la grotte de Tautavel de diverses manières, selon l'époque. Ont-ils laissé des traces à chaque fois, qui permettraient de savoir quand le lieu a servi de bivouac, de halte de chasse, d'habitat saisonnier ou plus durable ? *« Chaque couche stratigraphique livre son lot d'outils de pierre,* rappelle Sophie Grégoire. *Bifaces, pointes, racloirs, percuteurs, déchets de taille… Les types d'outils, les matières premières employées, leur provenance, de même que les ossements d'animaux, sont autant d'indices qui permettent de définir des comportements techniques et économiques. Un modèle a été construit par apprentissage automatique pour mettre en relation ces indices avec un mode d'occupation de la grotte. Pour entraîner ce modèle, on a fait appel à des données ethnographiques, complétées par des avis d'experts. »* Celui-ci a ensuite produit des hypothèses sur le mode d'occupation de la grotte à chaque époque. *« Nos modèles ont depuis été utilisés sur d'autres sites européens et même en Corée du Sud, en partenariat avec d'autres équipes »,* conclut Sophie Grégoire. L'IA fait son chemin en préhistoire… ■

Pierre Vandeginste

craft.ai

PERSPECTIVE(S)

PERSPECTIVE(S) COSQUER : DE L'ORIGINAL AU FAC-SIMILÉ PAR LE NUMÉRIQUE



▲ *Segmentation et reconstruction en 3D du maillage de la grotte Cosquer.*

■ Créée en février 2013
■ Effectif : 11
■ Levée de fonds : 1,9 M€ en 2020

La grotte Cosquer porte le nom du plongeur Henri Cosquer, qui en a découvert l'accès en 1985 dans une calanque marseillaise, à 37 mètres de profondeur. Plus de 200 peintures et gravures pariétales, notamment d'animaux marins (pingouins, phoques, poissons), y ont été recensées, datant de deux périodes : il y a environ 27 000 et 19 000 ans. L'accès du public n'étant ni souhaitable ni même praticable, la réalisation d'une réplique s'est imposée : Cosquer 2 a ouvert ses portes le 4 juin 2022, à la Villa Méditerranée, près du Vieux-Port à Marseille. La jeune pousse aixoise Perspective(s) y a joué un rôle essentiel : *« Nous avons travaillé sur trois aspects,* précise Stéphane Kyles, son cofondateur et directeur technique. *Nous avons d'abord réalisé un maillage optimisé, à partir du nuage de points issu de la numérisation laser de la grotte, qui a servi aux fraiseuses pour tailler les blocs de polystyrène sur lesquels ont été moulés les éléments en résine du fac-similé. Puis, nous avons mis au point un logiciel qui, à partir du modèle 3D et de la photogrammétrie des œuvres, a calculé les images qui ont été projetées sur les volumes afin que les artistes reproduisent les couleurs et textures originales. Enfin, nous avons modélisé le scénario de Cosquer 2, avec l'aide des scénaristes et scientifiques du projet. »* Ce n'est en effet pas une réplique exacte du dédale original que le visiteur découvrira, mais une succession des cavernes les plus ornées. ■ P.V.

perspective-s.org

En bref

Sur les traces des civilisations anciennes. La détection de sites archéologiques par imagerie grâce à l'intelligence artificielle (IA) : tel est l'objectif de Archai.io, fondée par la Britannique Iris Kramer. Cette archéologue devenue informaticienne s'est lancée en 2020 dans l'aventure : les modèles mis au point cherchent à combiner l'IA entraînée sur des données spatiales et l'intelligence collective.

archai.io

La grotte de Tautavel revue. À Saint-Brieuc (Côtes-d'Armor), Immersion Tools, spécialiste des réalités virtuelles immersives, a participé au projet Schopper (voir p.62). La start-up a élaboré des modèles permettant de s'immerger dans le site de Tautavel, transposé aux différentes époques où il a été fréquenté par l'homme, en reconstituant la flore, la faune et le climat de l'époque, en fonction des indications issues des modèles construits par apprentissage automatique, de Craft.ai.

immersion.tools

JORDAN VEGA

Coups de tonnerre dans l'atmosphère

Si les chasseurs d'images s'évertuent à immortaliser ses plus belles manifestations, c'est que la foudre n'a pas fini de nous fasciner… Et sa complexité de nous interroger.

Chaque jour, une centaine de milliers d'éclairs frappent la Terre, déversant un trop-plein de courant. Car la décharge de foudre est d'abord un phénomène électrique : dans la formation et les mouvements des nuages, des charges positives et négatives se séparent et, lorsque la différence de potentiel est trop grande, l'air « claque » pour rétablir l'équilibre. Le déclenchement d'un éclair se fait en deux temps : des précurseurs se frayent un entrelacs de chemins à courte distance, ionisant l'air et ouvrant un passage conducteur. Puis l'éclair proprement dit – la décharge de retour – illumine le ciel. La variété du phénomène – entre les nuages, vers le sol, du sol vers les nuages – cache sa complexité. Aujourd'hui encore, on étudie les circonstances de la formation des éclairs pour le comprendre, mais surtout pour protéger les infrastructures (habitations, réseau électrique, centrales nucléaires). La foudre est observée en laboratoire ou à l'aide de simulations. Rien ne remplace toutefois les conditions réelles. Ainsi, des spécialistes tirent des fusées auxquelles est accroché un filin de cuivre pour guider l'éclair. Des lasers pourraient également être utilisés à cette fin. Beaucoup a été compris, mais physiciens et ingénieurs sont encore loin d'appréhender tous les processus associés aux éclairs naturels et leur lien avec les propriétés des nuages parents. En parallèle, des campagnes de surveillance sont menées par avion, radar ou radiotélescope. Crucial, car les scénarios du réchauffement climatique prévoient des orages moins nombreux, mais plus violents (1). ■ **Philippe Pajot**

(1) F. Erdman *et al.*, *Atmos. Meas. Tech.*, *13*, 853, 2020.

Série d'éclairs entre nuages et vers la mer (région de Valence, Espagne). Les éclairs se frayent un chemin à travers l'air – assez mauvais conducteur – en l'ionisant. La plupart d'entre eux (environ les deux tiers) sont intranuages et restent généralement invisibles.

ÉCLAIRS VARIÉS

Décharge négative double (baie de Cannes, Alpes-Maritimes). Dans les « nuages d'orages » (cumulonimbus), des séparations de charges électriques se produisent entre des cristaux de glace et des gouttelettes. La grande majorité des éclairs vers le sol (plus de 90 %) sont négatifs : les charges sont entraînées du bas du nuage, chargé négativement, vers le sol, chargé positivement.

Décharge positive (Le Rayol-Canadel, Var). Environ 10 % des décharges vers le sol sont positives : le courant passe du haut du nuage, chargé positivement, vers une zone du sol chargée négativement. Ces décharges donnent souvent lieu à des éclairs d'aspect horizontal.

Éclairs ascendants (Sioux Falls, Dakota du Sud, États-Unis). De tels flashs surviennent après une décharge positive, ouvrant un chemin à ce type d'éclair qui émane d'une structure élevée dans le paysage – montagne, clocher –, sujette à l'« effet de pointe » (accumulation de charges électriques au niveau des zones pointues de la surface d'un conducteur).

SERGE ZAKA/ABACAPRESS.COM - YOHAN LAURITO / CHASSEURS D'ORAGES - BLAKE BROWN - MICHAEL CONIGLIO/NOAA NATIONAL SEVERE STORMS LABORATORY

DE L'ÉNERGIE À DISSIPER

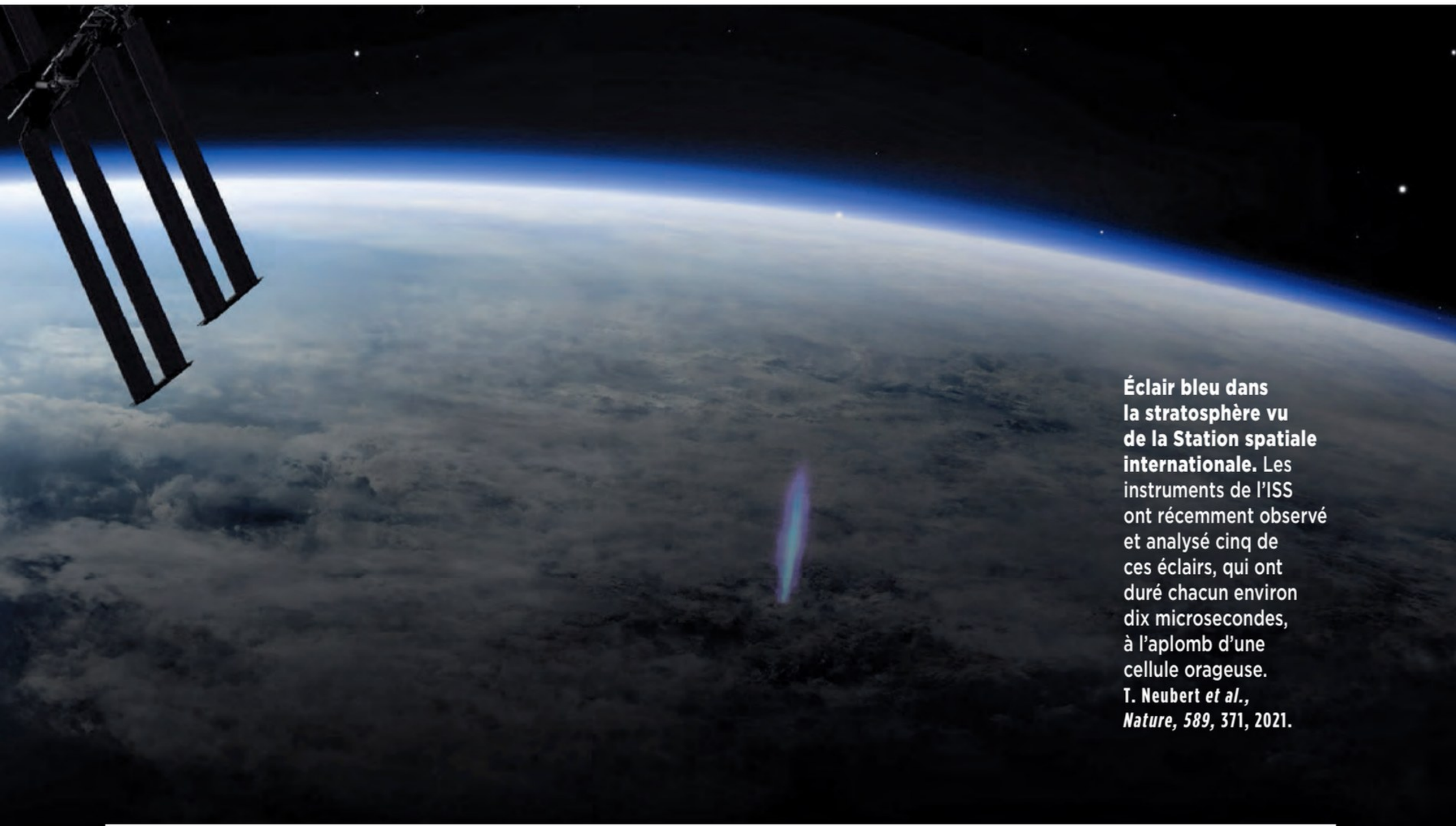
Tir laser au sommet du mont Säntis (Alpes suisses). Une équipe franco-suisse a monté le projet Laser Lightning Rod (LLR) afin d'évaluer si un puissant laser pouvait être utilisé pour ioniser l'air et guider la foudre. Le but ? Protéger les infrastructures critiques des perturbations électromagnétiques. Les données de la campagne de l'été 2021 sont en cours de traitement. **https://llr-fet.eu/**

La foudre entre puis ressort d'un avion de la compagnie KLM. Fréquemment foudroyés (toutes les 1500 heures de vol en moyenne), les avions actuels en composite doivent inclure un maillage métallique protecteur.

Lorsque la foudre frappe un endroit non protégé, l'énergie se dissipe, ce qui élève la température et peut provoquer des incendies (15 000 par an en France). Dans les grandes forêts non tropicales (Canada, Sibérie), la foudre serait responsable d'environ un tiers des feux de forêts.

AZMI/ CATERS/SIPA/1602241223 - TRUMPF / MARTIN STOLLBERG - VIRAL HOG - ABSTRACT AERIAL ART / GETTY IMAGES

FLUORESCENCES



Éclair bleu dans la stratosphère vu de la Station spatiale internationale. Les instruments de l'ISS ont récemment observé et analysé cinq de ces éclairs, qui ont duré chacun environ dix microsecondes, à l'aplomb d'une cellule orageuse. **T. Neubert *et al.*, *Nature*, *589*, 371, 2021.**

DTU SPACE, MOUNT VISUAL / DANIEL SCHMELLING/ESA

QUAND LES ORAGES ENCHANTENT LA HAUTE ATMOSPHÈRE

Très haut dans l'atmosphère, les orages créent des phénomènes lumineux évanescents et encore mal connus.

Plus discrets que les éclairs classiques, les phénomènes lumineux transitoires désignent des manifestations atmosphériques résultant elles aussi de phénomènes électriques, mais qui se produisent en haute altitude. Au début des années 1990, on commence à prendre sur le vif certains d'entre eux, mais les mécanismes à l'œuvre restent mal connus. Plusieurs millions de ces événements se produiraient chaque année. Les mécanismes mettent en jeu de la fluorescence optique, engendrée dans la troposphère (zone de l'atmosphère comprise entre la surface du globe et une dizaine de kilomètres d'altitude) et la mésosphère (entre cinquante et une centaine de kilomètres d'altitude) par des décharges électriques qui se produisent dans des orages situés au-dessous. Conçu pour étudier ces phénomènes, le satellite Taranis du Centre national d'études spatiales (CNES) a été lancé en novembre 2020, mais le lanceur s'est abîmé dans l'océan Arctique avant d'avoir pu atteindre son orbite. Le CNES est en train d'évaluer un remplaçant, le projet Taranis 2, avec un objectif de lancement à l'horizon 2025. ■ **Ph. P.**

STEPHEN C HUMMEL

Sylphes rouges (Texas, États-Unis). Également appelés farfadets, ils apparaissent en groupe, ce qui leur confère une forme de méduse. Leur brièveté – quelques millisecondes à quelques dizaines de millisecondes – et leur altitude – entre 15 et 150 kilomètres – les rendent difficiles à observer. Ce sont des perturbations ionisantes dont les mécanismes précis sont encore discutés.

François Parcy
BIOLOGISTE, GRENOBLE
Directeur de recherche au CNRS, il mène ses travaux au laboratoire de physiologie cellulaire et végétale (CNRS - CEA - INRAE - université Grenoble Alpes)

Christophe Godin
INFORMATICIEN, LYON
Directeur de recherche à Inria, il travaille au laboratoire reproduction et développement des plantes (CNRS - Inrae - Inria - ENS Lyon - université Claude-Bernard Lyon 1)

Les mystères biologiques de la formation des choux-fleurs

Un chou-fleur, un brocoli et un chou romanesco sont constitués de bourgeons destinés à devenir des fleurs, mais ils n'atteignent jamais leur but. En raison de particularités génétiques, ils se transforment en tiges qui, à leur tour, tentent de produire des fleurs et ainsi de suite. Cette réaction en chaîne aboutit à la structure végétale que nous mangeons. Des chercheurs ont élucidé les mécanismes à l'origine de cette croissance, qui donne à ces choux cet aspect que les mathématiciens qualifient de fractal.

Chou vert, chou kale, chou de Bruxelles, chou-fleur, brocoli ou encore chou romanesco… Autant de formes étonnantes qui ravissent l'œil des curieux en balade le long des étals de marché. Tous ces produits comestibles appartiennent pourtant à une même espèce, *Brassica oleracea,* qui fait partie de la grande famille des brassicacées, comme le colza ou la moutarde. Cette famille de plantes commence par former des feuilles au ras du sol, la rosette, puis la tige s'allonge et produit des fleurs. La tige fleurie s'appelle l'inflorescence. Toutefois, chez le brocoli, le chou-fleur ou le chou romanesco, l'inflorescence est remplacée par un chou. En effet, à la place des fleurs prolifèrent de petites structures, assez uniques dans le monde végétal, que nous mangeons. Chez le brocoli, on reconnaît visuellement les petits boutons floraux avortés, alors que le chou-fleur et le romanesco ne semblent posséder qu'un moutonnement de petites structures indifférenciées. Ces structures peuvent être de différentes couleurs : vertes en général pour le romanesco, alors que le chou-fleur est blanc mais aussi vert, orange ou violet. Ces différentes formes et couleurs résultent de variations génétiques qui ont été sélectionnées par l'hu-

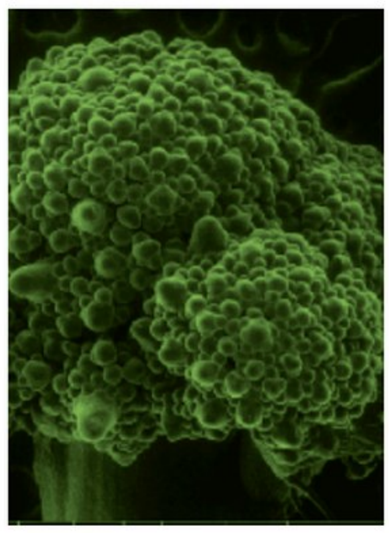
KERT/SHUTTERSTOCK - LAURENCE HONNORAT - H. RAGUET / INRIA

▲ *Le chou romanesco, compact et à la fois symétrique, est hérissé de petites pyramides coniques dont certaines en portent d'autres plus petites. Cet empilement visible à différentes échelles lui confère cette stucture dite « fractale ».*

main dans le contexte artificiel du champ cultivé, parce qu'elles rendent la plante plus adaptée à la consommation (ou à la culture). Ceci dit, tous ces choux sont des plantes de la même espèce que la plante ancestrale : on peut encore les croiser ! La grande question est de savoir comment les programmes génétiques censés donner des fleurs fabriquent les choux que nous mangeons. Comment sont-ils perturbés et par quelles mutations ? Quelles sont ces structures qui se développent à la place des fleurs ? Comment la croissance d'une plante peut-elle être modifiée au point d'engendrer des structures aussi régulières que celle d'un chou romanesco ? Nous nous sommes également demandés s'il est possible de comprendre tout cela au point d'arriver à le modéliser dans des plantes virtuelles, chez lesquelles la croissance serait programmée par des gènes simulés, et où nous pourrions jouer avec le génome et mimer certaines mutations.

ARABIDOPSIS THALIANA, UNE PLANTE MODÈLE POUR LES ÉTUDES GÉNÉTIQUES

Ces questions sont à l'origine de l'aventure dans laquelle nous nous sommes embarqués : deux chercheurs avec des formations différentes – un biologiste et un mathématicien – mais un même appétit pour la compréhension des formes du vivant. Découvrir les secrets de la fabrication des choux nous a pris une dizaine d'années en discontinu. La confrontation au réel est une école d'humilité. Nous avons cent fois imaginé comment une inflorescence pouvait se transformer en chou sous l'action des gènes, ou comment ce chou pouvait évoluer en chou romanesco. Devant un tableau noir, autour d'un café, en réunion, en visioconférence, nous avons discuté de toutes les options. À chaque fois, l'un d'entre nous trouvait une faille, un argument qui faisait que telle ou telle hypothèse devait être abandonnée. Au cours de ces dix années, nous avons été enthousiastes à certaines idées audacieuses, puis profondément déçus qu'elles ne résistent pas à l'analyse ou à l'expérimentation. Sans tabou, les uns et les autres apportions les contre-arguments qui mettaient à chaque fois en pièce nos espoirs de percer un jour ce mystère. C'est ce jeu consistant à essayer de résister par tous les moyens à l'évidence de chaque



▲ *En haut : un chou virtuel produit grâce à une modélisation des activités génétiques identifiées chez un mutant d'*Arabidopsis thalania *dans chaque méristème. En dessous : une vue réelle d'un chou chez cette même plante, en microscopie électronique à balayage.*

hypothèse qui nous a soudés et nous a apporté le sentiment de progresser malgré tout. Nous savions que c'était le prix pour éventuellement parvenir, un jour, à lever le voile sur un petit bout du réel. Puis, finalement, les pièces du puzzle se sont mises en place, jusqu'à aboutir à la publication, tout récemment, d'un article dans la revue *Science* racontant sa résolution (1).

Si *Brassica oleracea* est une plante que les humains cultivent depuis longtemps, elle n'est pourtant pas si facile à étudier en laboratoire. Elle est trop volumineuse et son cycle de vie est un peu trop long : plusieurs mois sont nécessaires entre le semis et la récolte. Heureusement, elle a une cousine de la même famille avec des inflorescences très similaires et qui, dans certains cas, voit les branches de ses inflorescences transformées en petits choux. De plus, sa croissance ne dure que quelques semaines. Cette plante s'appelle *Arabidopsis thaliana.* Depuis les années 1980, elle a été adoptée comme la plante modèle pour les études génétiques. En 2000, elle est devenue la première plante dont le génome a été entièrement séquencé (2). Grâce à ces connaissances, les biologistes peuvent observer la façon dont elle croît, perturber son génome par des mutations et tenter ensuite de relier la perturbation génétique au changement de forme observé.

Ce travail est fait depuis près de trente ans, et a permis d'identifier des gènes contribuant à la formation des fleurs ou des tiges. Ces deux organes ont plus de points communs qu'il n'y paraît au premier abord. Lorsqu'ils sont jeunes, ils se ressemblent beaucoup : ce sont des dômes de cellules souches. Les biologistes nomment cette zone, cruciale pour le développement de la plante, le méristème. Les cellules souches se divisent en grand nombre puis se différencient selon l'activité locale de leurs gènes, soit en tige, soit en fleur. Ainsi, le méristème de l'inflorescence est-il un territoire de type tige. Cependant, au cours de la construction de la tige principale, il produit aussi régulièrement, en son sein, de nouveaux amas de cellules destinés, eux, à produire des fleurs. Du côté du territoire où les cellules vont développer une fleur, celles-ci sont sous le contrôle d'un gène essentiel : l'architecte floral, LEAFY de son vrai nom, découvert en 1992 (3). Ce gène déclenche la formation des

EUGENIO AZPEITIA, FRANÇOIS PARCY, CHRISTOPHE GODIN - M. LE MASSON ET CHRISTINE LANCELON-PIN., CNRS, GRENOBLE

bourgeons floraux en initiant l'activité de deux autres gènes floraux, appelés AP1 et CAL, qui, en retour, stimulent son activité. Les territoires où ce réseau génétique est activé produisent des fleurs avec, en cascade, les organes floraux, comme les pétales ou les étamines, en nombre bien défini et organisés en quatre couronnes : pistil, étamine, pétale et sépale à l'extérieur.

Alors que l'architecte floral pousse à la formation des fleurs, du côté du territoire où se développe la tige, les cellules sont sous le contrôle d'un gène gardien. Ce gène, appelé TFL1, empêche les gènes floraux d'être activés dans les cellules de la tige et de les convertir en fleur terminale, comme celle d'une tulipe. L'activité de ce gardien est renforcée par les gènes SAX. Les gènes floraux, de leur côté, empêchent TFL1 et les SAX d'être activés dans les cellules du territoire floral. Ceci permet aux territoires naissants de type « fleur » de préserver leur identité de fleur au sein d'un territoire de type « tige ». La formation d'une fleur ou d'une tige résulte ainsi d'une sorte de « guerre de territoire » dans le méristème, avec deux camps et des alliances qui renforcent les acteurs individuels, l'architecte floral d'un côté et le gardien de la tige de l'autre.

PROLIFÉRATION ET EMPILEMENT

Dans ce contexte, comment se forment les choux ? Leur structure particulière naît lorsque l'activité des deux gènes floraux AP1 et CAL, les alliés de l'architecte floral, est compromise par des mutations qui les différencient de gènes que l'on trouve dans d'autres plantes : au départ, l'activité de l'architecte floral s'enclenche pour tenter de faire une fleur mais, comme les renforts AP1 et CAL n'arrivent pas, les gènes de tige s'activent dans les territoires supposés devenir initialement des fleurs et cela transforme la fleur en tige. Concrètement, en lieu et place d'une structure en couronne comme il s'en forme dans les fleurs habituellement, apparaît une tige qui se met elle-même à produire des ébauches de fleurs qui, à leur tour, échouent et reforment des tiges. C'est une sorte de feu d'artifice où chaque fusée qui explose produit une ribambelle de structures lumineuses qui explosent à leur tour. Une réaction en chaîne en quelque sorte. Sur une plante normale, ce processus se reproduit sur deux ou trois niveaux, avant de s'arrêter. Chez les choux-fleurs, les brocolis et les romanescos, nous avons découvert que l'exposition précoce d'une tige à l'architecte floral autorise un empilement de multiples niveaux de tiges et empêche la croissance des feuilles. On assiste donc à une prolifération de petites tiges nues qui forment les choux. Peut-on modéliser ce phénomène ?

Nous avons décrit cet ensemble de relations complexes à l'aide d'équations différentielles, qui modélisent l'activité de chacun des gènes et leurs interactions. Ensuite, nous avons inséré cette série d'équations dans des plantes virtuelles dont chacune des structures (tige, fleur, feuille) est produite en fonction du résultat de la simulation. Nous avons alors obtenu des structures semblables à celles que l'on observe chez les choux-fleurs. Ce qui corrobore la théorie de « guerre de territoire » entre les gènes responsables de la formation des fleurs et des tiges, élaborée à partir du modèle *Arabidopsis*.

Une « guerre de territoire » fait rage dans le méristème : l'architecte floral d'un côté et le gardien de la tige de l'autre

Cependant, lorsqu'on compare un chou-fleur comestible avec les petits choux d'*Arabidopsis*, il y a des différences. Ainsi, le chou comestible est une grosse structure à la tige épaisse, posée au creux des feuilles de rosette, alors que les petits choux d'*Arabidopsis* sont de multiples structures réparties sur la plante et très transitoires. Pourquoi toute la tige principale forme-t-elle un chou sans s'allonger ? Pourquoi reste-t-elle un chou aussi longtemps avant de reprendre son développement ? Cela n'est pas encore compris. Sous certains aspects, les structures qui se forment sont également très similaires à celles d'*Arabidopsis*. Par exemple, il s'agit là aussi d'un empilement de petites tiges sans feuilles, ou avec des feuilles extrêmement réduites chez le chou-fleur. Différents travaux ont été menés pour comprendre les variations génétiques à l'origine de la formation des choux-fleurs au cours de la sélec-

Contrairement aux autres choux, le romanesco présente des paramètres variables au cours de sa croissance, lui conférant son caractère unique

POUR EN SAVOIR PLUS

■ François Parcy, *L'Histoire secrète des fleurs*, HumenSciences, 2019.

tion humaine. Ces études ont identifié plusieurs centaines de différences génétiques corrélées avec la formation d'un chou-fleur ou d'un brocoli à la place de l'inflorescence. Ces corrélations ne sont cependant pas toujours des signes de causalité, et la plupart des différences génétiques responsables de la forme de l'inflorescence des choux-fleurs restent à identifier. Elles sont sans doute présentes au cœur des centaines de gènes candidats. Ceci dit, les gènes identifiés chez *Arabidopsis* comme étant importants pour la formation des choux sont à coup sûr impliqués.

UN RETARD À L'ALLUMAGE

Pour certains choux-fleurs, il y a une forte corrélation entre la formation du chou et la présence d'une mutation dans le gène CAL. Le cas du gène AP1 est un peu différent. En effet, il semble que celui-ci soit capable de donner une protéine fonctionnelle et que la différence avec la plante sauvage réside dans la dynamique de son déclenchement. Le gène AP1 est requis pour que des fleurs normales se forment, nous l'avons vu chez *Arabidopsis*. Chez *Brassica oleracea,* son niveau d'activité reste très bas pendant toute la formation du chou. Une fois que celle-ci est terminée, l'activité remonte quelques semaines plus tard et une fleur se forme : les jardiniers disent alors que « le chou monte à fleurs ». Le défaut génétique ne réside donc pas dans une protéine inactive du gène AP1, mais dans les instructions qui commandent sa mise en route. Il y a un retard à l'allumage qui fait patiner le système, pour former un chou avant que la plante ne soit capable de former des fleurs et donc de donner des graines essentielles aux semences. Une hypothèse – donc à corroborer – indique que la température pourrait avoir un effet assez fort sur la formation de choux. Ainsi, une augmentation de la température au-dessus de 22 °C induirait l'activation précoce du gène AP1, sans passer par le processus qui conduit à la formation du chou-fleur, ce qui permettrait le développement de la fleur (4).

Et le romanesco alors ? Quelle est donc la raison qui le rend si différent ? Aussi géométrique et intriguant ? Il est en effet hérissé de petites pyramides coniques, dont certaines en portent d'autres plus petites. Cet empilement visible à différentes échelles est unique et donne presque le vertige. Il rappelle les formes mathématiques appelées fractales, qui font apparaître une même structure à de multiples échelles si bien que, lorsqu'on zoome, l'aspect reste le même (lire p. 77). C'est le côté pyramidal qui individualise visuellement chacune des petites structures. Chez le chou-fleur, elles sont également présentes mais tous les petits choux sont collés à peu près au même niveau pour former une masse quasi sphérique. Une description comparée de ces différents types de choux avait été faite dans le passé, remarquant qu'il existe des paramètres variables chez le romanesco au cours de la croissance, alors qu'ils sont constants chez le chou-fleur. Par exemple, le rythme auquel une tige en produit d'autres s'accélère au fil de la croissance chez le romanesco, alors qu'il est assez constant chez les autres types de choux-fleurs. En examinant différents paramètres, il nous est apparu que tous pourraient découler d'une seule et même différence : celle d'une pointe de tige dont la taille irait grandissante, ce qui provoquerait une accélération de la production des nouvelles tiges et, par là même, leur croissance accélérée (puisqu'une tige est toujours produite avec un entrenœud qui la sépare de la tige précédente). Cette hypothèse a été testée dans un modèle informatique : en changeant un seul paramètre, on obtient une transformation qualitative quasi magique du chou-fleur en un chou romanesco. Et si vous ouvrez l'œil sur le marché, vous verrez que certains romanesco ont une énorme pointe de forme très aplatie, signe que ce chou a du mal à conserver une taille de tige constante et qu'elle atteint même des proportions visibles à l'œil nu dans certains cas. ■

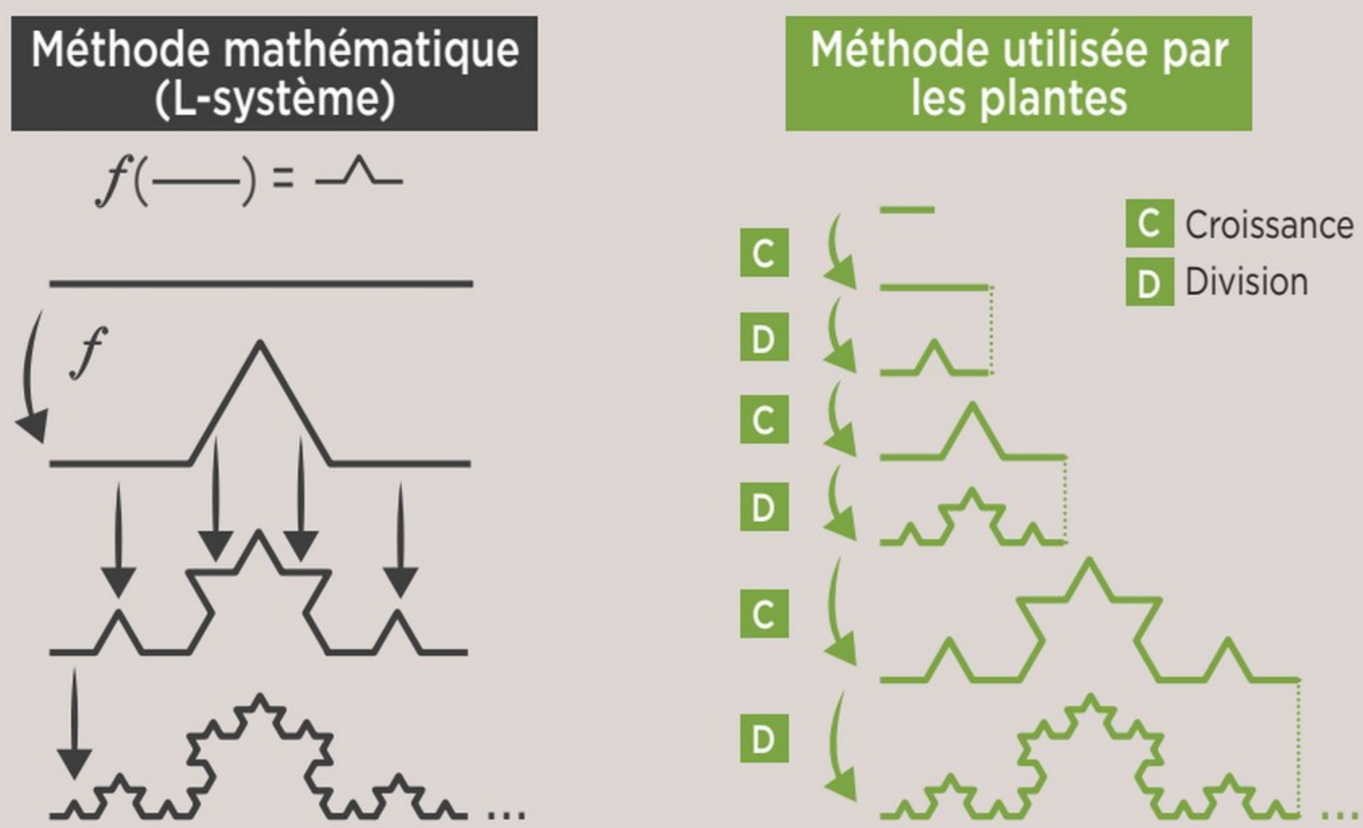
(1) E. Azpeitia *et al.*, *Science, 373,* 192, 2021.
(2) The Arabidopsis Genome Initiative, *Nature, 408,* 796, 2000.
(3) D. Weigel *et al.*, *Cell, 69,* 843, 1992.
(4) Y. Hassan *et al.*, *Theor. Appl. Genet., 129,* 1273, 2016.

16

EST LE NOMBRE de variétés issues de la plante *Brassica oleracea,* ou chou commun, que l'on peut trouver en France (Inventaire national du patrimoine naturel – MNHN).

Comment le chou fait-il des fractales ?

Le chou-fleur résulte d'un processus classique de construction fractale en mathématique, mais l'opération de réduction géométrique est remplacée par un agrandissement.



Pour comprendre comment les choux réalisent des fractales, on peut s'inspirer d'une des deux méthodes classiques en mathématiques (la méthode L-système, figure à gauche) et insérer en plus une opération de croissance (figure à droite).

BRUNO BOURGEOIS D'APRÈS CHRISTOPHE GODIN

Les objets fractals sont fascinants par leur géométrie, qui se présente à la fois comme très irrégulière (fractures) et fortement symétrique. De façon un peu inattendue, il est facile de construire des formes fractales mathématiques avec un ordinateur. Il suffit pour cela de répéter quelques règles de construction simples un nombre suffisamment grand de fois. Comme l'avait fait remarquer le mathématicien Benoît Mandelbrot (1924-2010), qui a forgé le terme « fractal » et étudié les propriétés de ces objets étranges, de telles formes très irrégulières, montrant des détails similaires à toutes les échelles, apparaissent aussi dans la nature : galaxies, rivières, nuages, éclairs. Mais, plus remarquable encore, de telles formes apparaissent aussi dans le vivant ! Poumons, arbres, coraux, fougères... Parmi eux, le plus emblématique de tous est sans doute le chou romanesco. Il présente une structure fractale d'une précision quasi mathématique, à la frontière entre un organe et un cristal. Comment la nature procède-t-elle pour faire ces constructions mathématiques ? En rentrant dans l'analyse de la régulation génétique du développement des choux, nous avons progressivement levé le voile sur ce fascinant mystère. Rappelons tout d'abord l'une des deux recettes mathématiques classiques pour réaliser une fractale : prendre une forme initiale (qui peut être quelconque), la réduire, dupliquer plusieurs fois la forme ainsi réduite, puis répéter ces deux opérations sur chaque partie de la forme obtenue, et ainsi de suite. C'est en substance ce que fait naturellement une plante, mais dans un sens quasiment inverse : la plante fait grandir ses axes (en les allongeant), puis elle les duplique (en ramifiant) et elle itère tout ça (en faisant de plus en plus d'axes). Ainsi, une plante se construit schématiquement comme une fractale, mais où l'opération de réduction géométrique est compensée en permanence par la croissance. Du coup, comment la croissance d'une plante pourrait-elle converger vers une structure fractale finie ? En changeant de point de vue. En effet, le paradoxe disparaît si l'on considère que le grossissement de l'objet en croissance est lui-même compensé par celui imaginaire et simultané de l'observateur qui voit alors, de manière relative, un objet qui produit des axes de plus en plus petits (« réduits »). À cette renormalisation près, le chou-fleur résulte bien d'un processus classique de construction fractale. Bien que ces mécanismes de duplication et de croissance caractéristiques de la production de fractales soit présents chez toutes les plantes, de nombreuses plantes ne produisent pas de forme fractale. En effet, la duplication d'une même structure encore et encore est en général altérée à chaque ramification par les mécanismes de différenciation génétiques ou physiologiques et finalement plus ou moins rapidement stoppée. Ceci limite le nombre d'itérations dans la construction fractale d'une plante et réduit donc la plupart du temps son aspect fractal final. Notre travail montre que, chez le chou-fleur et le romanesco, ces mécanismes de différenciation ont été abolis, et laissent l'opération de duplication quasiment inaltérée. Les axes se dupliquent alors très vite à l'identique, sans se différencier et produisent de façon éphémère une organisation compacte et fractale avant que les entrenœuds ne finissent par s'allonger (montaison).

F. P. et C. G.

Manuela Filippa
DOCTEURE EN PSYCHOLOGIE, UNIVERSITÉ DE GENÈVE (SUISSE) *Postdoctorante à l'hôpital universitaire de Genève et collaboratrice scientifique à l'université de Genève, au sein du Centre suisse pour les sciences affectives.*

La voix, une stratégie de soin pour les bébés prématurés

Les premières semaines de vie d'un enfant prématuré sont synonymes de danger. Pour minimiser les risques d'ordre médical (problèmes de respiration, de thermorégulation, de nutrition, risques majeurs d'infection), un certain nombre de procédures, vitales mais douloureuses, sont mises en place. Des soins qui supposent un isolement des parents et une exposition fréquente à la douleur. Un autre moyen de lutter contre ces différents facteurs de risque, c'est la voix des parents. Le contact vocal précoce (parole ou chant) peut activer des réponses – mesurables – de bien-être chez le bébé prématuré, dont on commence à comprendre les mécanismes neurobiologiques sous-jacents. Une stratégie de soins qui bénéficie aussi au père et à la mère, comme le montrent les études.

CRAIG CUTLER - CRAIG CUTLER / UNIGE

◀ *Le contact vocal précoce avec le nouveau-né, sous forme parlée ou chantée, vise à atténuer les effets négatifs d'une naissance prématurée. Il prolonge les premières formes de communication affective entre la mère et son enfant, apparues très tôt lors de la vie intra-utérine.*

Si vous entrez dans une unité de soins intensifs néonatals, où sont hospitalisés les bébés prématurés, c'est parce que tout ne s'est pas passé comme vous l'aviez rêvé. C'est précisément ce qui m'est arrivé il y a quinze ans : j'ai subi une césarienne d'urgence, ma fille Sofia est née prématurément, plus de deux mois avant terme. On me l'a immédiatement enlevée. Les raisons étaient d'abord d'ordre médical : un enfant qui naît de manière aussi précoce est exposé à plusieurs facteurs de risque, liés au fait que ses organes n'ont pas encore atteint le bon degré de maturation pour vivre hors de l'utérus. Des problèmes de respiration, de thermorégulation, de nutrition, et des risques majeurs d'infection, pour ne citer que quelques exemples, menacent alors les premiers instants de vie.

DES BÉBÉS ORIENTÉS VERS LA VOIX MATERNELLE

Face à cette situation, un certain nombre de procédures – vitales mais douloureuses – sont généralement mises en œuvre, impliquant la pose de tubes, de canules et de capteurs, des prélèvements de sang, des pincements… Le nourrisson se voit ainsi confronté à d'autres risques, davantage liés à l'environnement où il se développe : le risque d'isolement, de séparation des parents – un facteur de stress important – et le risque de l'exposition fréquente à la douleur. À la clé, une possible altération, à court et/ou à long terme, de son développement neurocognitif, social et moteur, et des troubles, comme une sensibilité majorée à la douleur et au stress.

Un des moyens de lutter contre ces différents facteurs de risque, c'est la voix humaine. Comment celle-ci peut-elle activer des réponses de bien-être chez le bébé prématuré ? Y a-t-il vraiment des effets bénéfiques mesurables ? Et, si oui, quels sont les mécanismes neurobiologiques sous-jacents ? Au cours de la dernière décennie, un certain nombre d'équipes, dont la nôtre au sein du Centre interfacultaire en sciences affectives de l'université de Genève (Suisse), ont essayé d'apporter quelques réponses à ces questions.

Mais reprenons l'histoire à ses débuts… Depuis les années 1980, la recherche accumule les preuves de l'existence de premières formes de communication affective, entre une mère et son enfant, très tôt au cours de la vie intra-utérine. On a notamment montré, par la mesure de l'activité cardiaque et celle du cerveau, que le fœtus est capable de distinguer entre la voix maternelle et d'autres voix féminines (1). Ces premières formes de communication affective se poursuivent après la naissance. Ainsi, une étude de neuroscientifiques au Canada, à Cuba, en Écosse et en France, menée sur seize nouveau-nés (âgés entre 8 et 27 heures, avec un âge moyen de 21 heures) a constaté que ceux-ci, même en état de sommeil, pouvaient faire la différence entre un simple « *a* » prononcé par leur mère, sans intonation particulière, et la même voyelle prononcée par une voix féminine étrangère (2). Ces travaux ont également montré que les nourrissons traitaient la voix de leur mère différemment de celle d'une autre voix féminine. Concrètement, leurs analyses ont mis en évidence le fait que la voix maternelle active de manière préférentielle, chez le jeune bébé, les mêmes zones corticales que celles qui sont liées au langage dans le cerveau humain adulte (lobe temporal postérieur gauche), alors qu'une voix féminine étrangère active de manière prédominante les zones spécifiques à la voix (lobe temporal droit). En outre, cette activation cérébrale singulière en réponse à la voix de la mère est suivie, chez l'enfant, d'une activation accrue des zones motrices centrales – comme s'il pouvait mimer, avec la bouche, les sons qu'il entend : un premier indice neurophysiologique du rôle préférentiel de la mère dans l'acquisition du langage.

Ces résultats contribuent à composer l'image d'un bébé orienté vers la voix maternelle, qui construit ses apprentissages à partir de cette voix. On comprend alors aisément qu'une privation prolongée de la voix de la mère, un isolement excessif dans la couveuse et/ou une exposition précoce et continue à la douleur puissent altérer, à long terme, le développement neurocognitif des nouveau-nés et conduire à des troubles, par exemple une sensibilité majorée à la douleur et au stress. C'est dans ce contexte que nous avons développé, dans l'équipe du professeur Didier Grandjean, nos recherches sur le contact vocal précoce.

LE CHANT ET LA PAROLE CALMENT ET STRUCTURENT LE COMPORTEMENT

Le contact vocal précoce est une stratégie de soins qui vise à réduire l'impact à long terme de l'hospitalisation néonatale, à minimiser les effets négatifs de la naissance prématurée et à favoriser le développement positif du cerveau. Celle-ci consiste à encourager les parents à parler et chanter pour leur enfant prématuré, dans l'intimité. En 2020, nous avons mené une étude sur le sujet, centrée sur des nourrissons et leur mère se trouvant en unité de soins intensifs néonatals (3). Son objectif principal était d'analyser les comportements des prématurés en réponse à la voix maternelle, qui s'adressait à eux en parlant ou en chantant, par rapport à une condition de contrôle où la mère n'était pas présente. Les protocoles étaient stricts : par exemple, il a été demandé aux mères de parler ou de chanter sans toucher leur bébé, pendant une période bien définie, à une distance maximale de la couveuse, et en mesurant l'intensité de leur voix, pour s'assurer qu'elle soit audible (plus de 10 décibels au-dessus du bruit de fond). Le comportement, ainsi que les expressions faciales des nouveau-nés, étaient enregistrés sur vidéo, puis codés, toutes les 0,5 seconde, à l'aide d'un système mis au point pour cette étude par l'équipe de Psychologie du développement de l'université de Ferrara (Italie), menée par Marco Dondi et Damiano Menin, experte en codage facial des bébés.
Deux résultats principaux sont ressortis de ce travail. Le premier : quand la mère parle ou chante, le petit devient plus stable, il subit moins d'épisodes critiques, que ce soit au niveau cardiaque ou respiratoire, il présente moins d'apnées, et il passe plus de temps dans un état d'éveil calme, indispensable pour son apprentissage sensoriel. Le second résultat indique que la voix maternelle – chant ou parole – structure le comportement du nourrisson, qui ouvre plus souvent les yeux, et effectue plus de mouvements réconfortants envers lui-même, appelés mouvements d'autorégulation. Cette recherche nous a aussi permis de comprendre que le chant et la parole n'ont pas exactement le même effet sur les prématurés : quand la maman chante, il y a une prédominance de mouvements rythmiques chez son enfant – par exemple la succion –, alors que, pendant qu'elle parle, les mouvements non-rythmiques de la bouche augmentent. Une observation qui va dans le sens des résultats que nous mentionnions plus tôt, sur le fait que la voix maternelle active les aires motrices dans le cerveau du bébé.

10 DÉCIBELS

C'EST L'ÉCART MINIMUM d'intensité sonore qui doit exister entre la voix maternelle et le bruit de fond pour que celle-ci soit entendue de son bébé.

Le chant a un effet modulateur sur le battement cardiaque et sa variabilité

Parole et chants dirigés semblent donc avoir des effets, et peut-être des fonctions, différents dès le début de la vie dans la communication entre les parents et leurs enfants prématurés. Cette hypothèse a été confirmée par une autre étude multicentrique menée très récemment avec l'équipe de Fabrizio Ferrari, de l'hôpital universitaire de Modène (Italie). Celle-ci a montré l'effet directement modulateur du chant sur le battement cardiaque du nouveau-né, en particulier sur sa variabilité – la variabilité cardiaque est un indice direct du bon fonctionnement et

On s'est inspiré des soins de développement, qui complètent les interventions pharmacologiques

de la maturation du système vagal des petits (4). Les mêmes observations sont valables lorsque le bébé prématuré est exposé à une douleur précoce et continue ou prolongée. Dans cette situation, le traitement par analgésiques ne peut pas être la seule réponse. La plupart des hôpitaux l'ont bien compris et ont de plus en plus recours à des interventions non pharmacologiques centrées sur des techniques connues sous le nom de soins de développement. Celles-ci permettent de garder les nourrissons et leur famille ensemble, plutôt que d'isoler les petits dans des incubateurs. Parmi ces techniques, on retrouve l'allaitement maternel et le contact peau à peau. Leur efficacité est reconnue lorsqu'il s'agit d'atténuer les réactions douloureuses. Les réponses corticales à la douleur, après une ponction veineuse chez les prématurés, ont également été étudiées récemment, et il s'avère que le type de contact entre le nourrisson et sa mère peut moduler le traitement cérébral néonatal des stimuli nociceptifs (*) (5). Inspirés par ce genre d'interventions, nous avons voulu aller un peu plus loin dans notre recherche sur les effets des vocalisations précoces sur le prématuré, et nous avons cherché à tester si le contact vocal précoce avait des effets bénéfiques sur la douleur du nouveau-né. Nous avons demandé aux mères de parler et de chanter pour leur bébé pendant une prise de sang clinique routinière, une fois par jour pendant deux jours. La maman chantait ou parlait avant le prélèvement afin de soutenir l'enfant durant cette procédure et, après, pour le consoler. Nous avons demandé aux mères de ne pas chanter ni parler au cours d'une troisième prise de sang : c'était notre condition de comparaison – le contrôle. L'expérience débutait dès les premiers jours de vie des prématurés et était randomisée : l'ordre des conditions (prise de sang avec ou sans le contact vocal avec la mère) était aléatoire.

(*) **La nociception** est une fonction défensive, d'alarme. C'est l'ensemble des phénomènes permettant l'intégration au niveau du système nerveux central d'un stimulus douloureux par le biais de l'activation des nocicepteurs cutanés, musculaires et articulaires.

LE RÔLE CRUCIAL DE L'OCYTOCINE COMME NEUROPROTECTEUR

Une prise de salive chez le nourrisson et la mère, effectuée avant et après la prise de sang, nous a permis d'évaluer les niveaux d'ocytocine endogène, c'est-à-dire produite par l'organisme, dans les différentes conditions, avant et après le soin douloureux. Il faut savoir que l'ocytocine est une hormone qui a un rôle crucial dans les conditions de séparation des jeunes enfants de leurs parents et est reconnue comme ayant un effet neuroprotecteur contre les réactions inflammatoires liées à la douleur et au stress. L'ocytocine est libérée non seulement pendant les interactions affiliatives, mais aussi durant les vocalisations sociales, dans le modèle animal, comme chez l'humain. L'augmentation du taux d'ocytocine sanguin a également des effets positifs sur les comportements sociaux, sur la douleur, et sur le stress dû à la séparation et l'anxiété. Dans les modèles animaux, les périodes de séparation entre la mère et les petits induisent une diminution des soins maternels et une altération concomitante de la régulation de l'ocytocine et d'une hormone cousine, la vasopressine. Finalement, la séparation maternelle précoce interfère avec le développement sain des récepteurs d'ocytocine dans des régions spécifiques du cerveau.
L'hypothèse que nous voulions tester dans notre étude était que le chant et la parole pouvaient non seulement réduire la douleur du bébé, mais que cette réduction était liée à l'augmentation de leurs niveaux d'ocytocine.

Nous supposions également une augmentation similaire chez les mères durant cette procédure. Les résultats nous ont donné raison : ils ont confirmé que la voix maternelle réduit la douleur des bébés et que, en particulier quand la maman parle – c'est aussi le cas, marginalement, pour le chant –, les niveaux d'ocytocine augmentent chez les nourrissons (6). Le fait que le contact vocal précoce contribue à diminuer la douleur des bébés et induise une augmentation de leur taux d'ocytocine nous fait espérer son insertion prochaine dans les soins analgésiques non-pharmacologiques pour les bébés prématurés hospitalisés.

Une question restait encore à poser : est-il trop stressant pour les mères d'être présentes lors d'une prise de sang de leur enfant ? Ou alors cette expérience pourrait-elle, au contraire, leur être tout aussi bénéfique ? Pour y répondre, nous avons mesuré le taux d'ocytocine salivaire de mères de nouveau-nés et nous leur avons demandé de répondre à un questionnaire sur le stress. Les résultats de l'étude, qui a été soumise à un journal scientifique et est en cours de révision, sont clairs : le stress des mères a diminué et leur taux d'ocytocine a augmenté au cours de l'intervention. La prochaine étape sera de comprendre quels sont les mécanismes cérébraux qui règlent le traitement cortical de la douleur en présence de la voix maternelle, un axe de recherche que nous venons de lancer avec l'équipe de Pierre Kuhn, de l'hôpital de Strasbourg (Bas-Rhin).

LES EFFETS POSITIFS DES NOUVEAU-NÉS SUR LEURS PARENTS

Au-delà, nous avons découvert que, si les vocalisations des parents ont des effets bénéfiques sur le bébé, les comportements de ces derniers ont, réciproquement, des effets positifs sur la voix des parents. Nous avons d'abord mesuré cet effet sur les mères. Les participants à notre expérience étaient vingt mamans à qui l'on a demandé de parler et de chanter à leurs nourrissons – stables sur le plan médical et placés en couveuse. Nous avons comparé la qualité de leur voix (chant ou parole) dans deux conditions différentes : en présence d'un comportement positif de leur bébé – comme l'ouverture des yeux ou le sourire – et en l'absence de comportements évidents. Les échantillons vocaux que nous avons extraits montrent que la voix maternelle dirigée vers le nourrisson présente des qualités émotionnelles plus marquées lorsque celui-ci manifeste un changement de comportement que lorsqu'il est passif et sans expression. Plus précisément, nous avons constaté qu'elle s'approche, en termes de caractéristiques acoustiques (hauteur et sa variabilité, intensité et sa variabilité, pour ne citer que les plus communes), de ce qu'on appelle le « parler-bébé » (7).

Les mêmes observations – ou presque – ont été réalisées à propos des pères, qui jouent, au même titre que les mères, un rôle fondamental dès les premières heures de la naissance d'un enfant avant terme. Avec une collègue libanaise, la docteure Sahar Saliba, et le reste de l'équipe de Paris Nanterre guidée par Maya Gratier (8), nous avons testé les effets de la parole, directe et contingente, des pères sur les nouveau-nés prématurés. Les résultats sont comparables à ceux de la mère, avec une augmentation des états d'éveil calme des bébés lorsqu'ils entendent la voix de leur père. En outre, la voix du père – tout comme celle de la mère – se module sur les comportements de l'enfant en devenant plus aiguë quand celui-ci ouvre les yeux même si, étonnamment, la voix paternelle a une intensité générale plus faible que celle de la mère.

Lorsqu'on active des comportements parentaux de soins, quand on favorise le contact entre parent et bébé dans des moments clés de l'attachement – particulièrement au début de la vie –, les apprentissages qui se sont inscrits dans nos gènes parentaux, que nos ancêtres ont mis en place pour nous, émergent. Ce sont des corégulations à la fois neurobiologiques et comportementales, sur lesquelles il reste encore de nombreuses choses à découvrir. ■

(1) R. Jardri *et al., Int. J. Dev. Neurosci., 30,* 159, 2012.
(2) M. Beauchemin *et al., Cereb. Cortex, 21,* 1705, 2011.
(3) M. Filippa *et al., J. Nonverbal Behav., 44,* 453, 2020.
(4) M. Filippa *et al., Children, 9,* 140, 2022.
(5) C. Johnston *et al., Cochrane Db. Syst. Rev., 2,* CD008435, 2017.
(6) M. Filippa *et al., Sci. Rep., 11,* 1, 2021.
(7) M. Filippa *et al., Interact. Stud., 19,* 427, 2018.
(8) S. Saliba *et al., J. Nonverbal Behav., 44,* 437, 2020.

Manuela Filippa participera à la 9e édition des Rencontres recherche et création, **organisées par l'Agence nationale de recherche et le Festival d'Avignon, les 11 et 12 juillet, au cloître Saint-Louis, en Avignon.**
www.recherche-creation-avignon.fr

Béatrice Ledésert
GÉOLOGUE, CY CERGY PARIS UNIVERSITÉ
Professeur à CY Cergy Paris Université, elle s'intéresse à la circulation des fluides dans les roches de la croûte continentale.

De la chaleur sous nos pieds

À quelques dizaines de centimètres sous la surface de notre planète, la température moyenne est de 14 °C. Deux cents mètres plus profond, elle atteint les 20 °C… et continue de croître, jusqu'à environ 750 °C à 25 km. La géothermie exploite la chaleur du sous-sol via des échangeurs de chaleur, où l'on puise les calories le plus souvent grâce à un liquide. Très développée dans les régions volcaniques, elle est en pleine expansion. La géothermie de surface peut s'appliquer à des habitations individuelles ou collectives. À grande profondeur, elle peut se révéler intéressante, bien que plus délicate sur le plan géologique et technique. Certains projets futuristes envisagent même d'aller chatouiller les poches de magma…

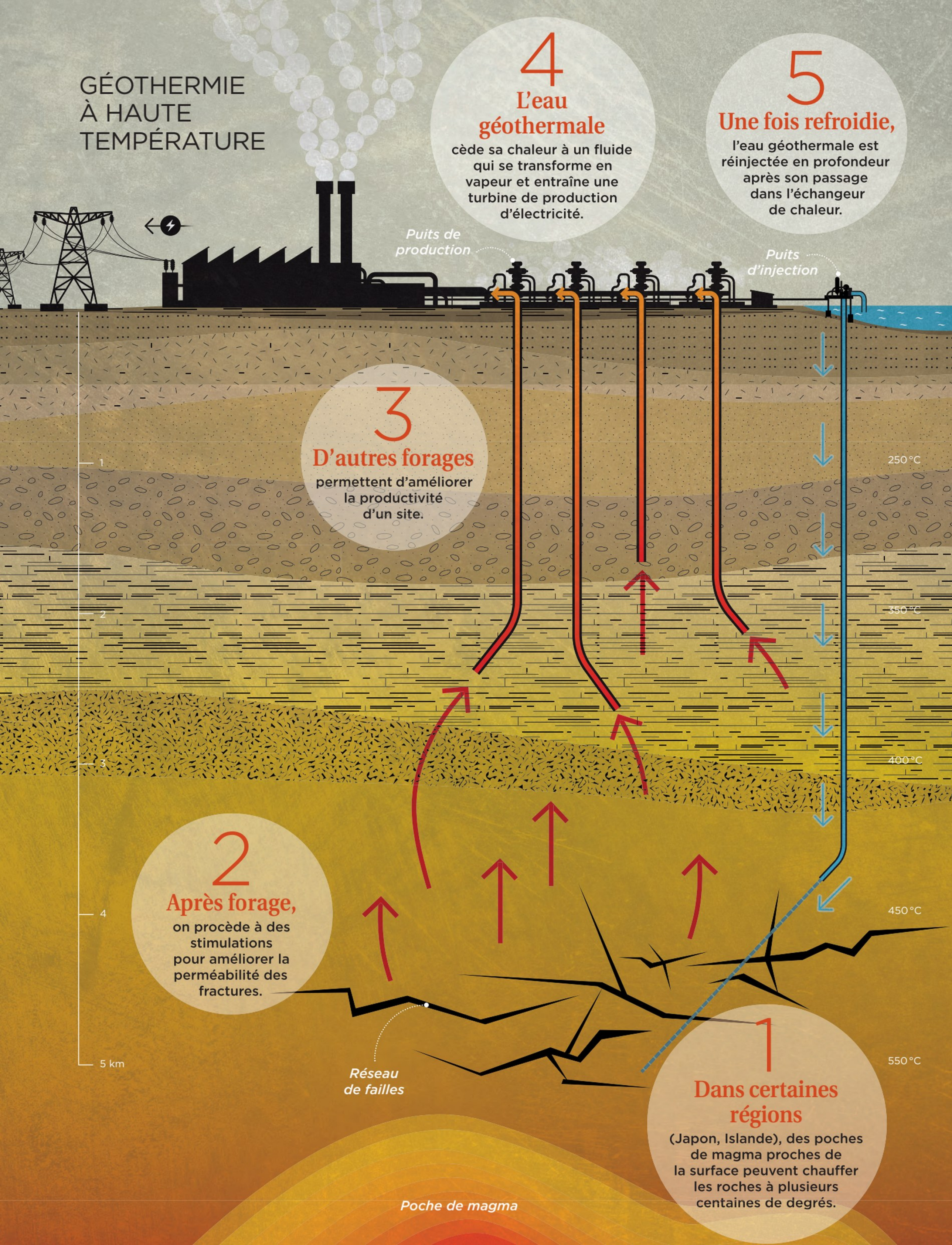
Infographies : Mehdi Benyezzar

La Terre est une planète chaude : lors de sa formation, il y 4,6 milliards d'années, ses roches ont piégé des radioéléments – uranium, thorium et potassium essentiellement – dont la décroissance radioactive réchauffe encore notre globe. Dans le contexte actuel de transition écologique visant à s'affranchir des sources d'énergies fossiles non durables et à assurer l'indépendance énergétique des pays et la neutralité carbone, la géothermie prend toute sa place. En effet, c'est une énergie renouvelable et quasi inépuisable à l'échelle humaine. Contrairement à l'énergie solaire ou éolienne, elle ne dépend pas du climat (vent, ensoleillement) ni du cycle jour-nuit : elle est disponible vingt-quatre heures sur vingt-quatre, tout au long de l'année.

Toute l'énergie du sous-sol ne peut pas être exploitée de manière équivalente : tout dépend des terrains et du gradient géothermique (qui désigne le taux d'augmentation de la température dans le sous-sol à mesure que l'on s'éloigne de la surface). La situation est contrastée selon les pays. En Islande, zone très volcanique, 90 % du chauffage et 27 % de l'électricité résultent de l'utilisation de la chaleur du sous-sol. Parfois, il

DR

GÉOTHERMIE À HAUTE TEMPÉRATURE



1 **Dans certaines régions** (Japon, Islande), des poches de magma proches de la surface peuvent chauffer les roches à plusieurs centaines de degrés.

2 **Après forage,** on procède à des stimulations pour améliorer la perméabilité des fractures.

3 **D'autres forages** permettent d'améliorer la productivité d'un site.

4 **L'eau géothermale** cède sa chaleur à un fluide qui se transforme en vapeur et entraîne une turbine de production d'électricité.

5 **Une fois refroidie,** l'eau géothermale est réinjectée en profondeur après son passage dans l'échangeur de chaleur.

ne faut pas aller très loin, puisque des eaux ont été chauffées par leur passage en profondeur et donnent lieu à des sources chaudes exploitées dans les villes thermales. Au Japon par exemple, les sources chaudes – les *onsen* – sont connues depuis au moins le VIIIe siècle.
Les premières idées sur l'exploitation de ces eaux chaudes de surface émergent à la fin du XIXe siècle, notamment en Italie, mais c'est à partir du début du XXe siècle que les installations s'industrialisent. Aujourd'hui, la plus grosse capacité géothermique est installée aux États-Unis, essentiellement en Californie, mais aussi en Islande, aux Philippines, en Indonésie ou au Japon. En Europe, outre l'Italie qui possède à Larderello, en Toscane (centre-ouest du pays), l'une des plus anciennes et plus vastes centrales au monde, on retrouve la France, qui exploite plusieurs centrales, dont celles de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin), en Alsace, et de Bouillante en Guadeloupe.

FAIBLE EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE

Les avantages sont multiples : l'exploitation de la géothermie engendre très peu d'émissions de gaz à effet de serre et les seules consommations d'électricité qu'elle nécessite sont liées au fonctionnement des pompes à chaleur (géothermie de surface) ou des pompes hydrauliques (géothermie profonde). Une fois l'exploitation terminée, la centrale nécessaire pour exploiter la géothermie profonde est facilement démontée, car elle est principalement constituée de canalisations métalliques ; les forages géothermiques ne sont plus visibles et n'ont donc pas d'impact sur le paysage. La géothermie, étant généralement consommée sur son lieu de production, n'engendre pas de perte d'énergie ni de pollution liée à son transport. En tant que source d'énergie renouvelable pour l'électricité et le chauffage, la récupération de la chaleur terrestre pourrait couvrir de 3 à 5 % de la demande mondiale d'ici à 2050. Grâce à des incitations économiques, on estime que d'ici 2100, il serait possible de répondre à 10 % de la demande mondiale (1). Petit tour d'horizon des ressources, analyses géologiques, techniques utilisées selon le type de géothermie, leurs avantages et inconvénients. ■

C'EST LA PUISSANCE THERMIQUE GLOBALE DE LA TERRE

S'y ajoutent en moyenne 2 TW dégagés par les éruptions volcaniques. La Terre perd globalement 46 TW, dont 4 % de manière spectaculaire (séismes, éruptions) et 96 % de manière discrète (flux géothermique).

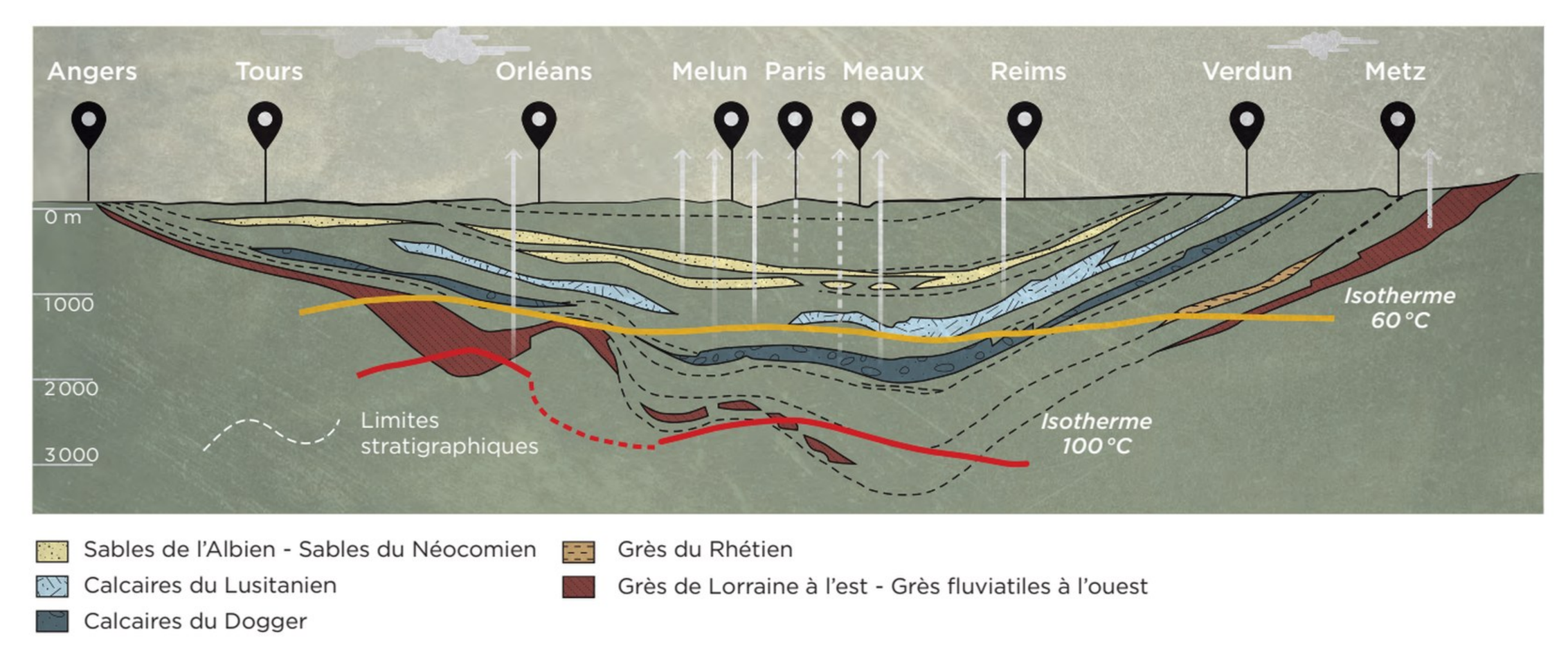
DES RESSOURCES EN FONCTION DU TERRAIN

La géothermie exploite la chaleur du sous-sol ou utilise l'eau chauffée naturellement par ses passages dans les zones chaudes de la croûte terrestre. Des études géologiques permettent d'évaluer les ressources disponibles, en quantité et en température.

Afin de connaître les ressources géothermiques d'un terrain, son étude géologique est indispensable. En janvier 2022, les géologues ont ainsi déterminé les zones favorables au développement de la géothermie de surface – moins de 200 mètres de profondeur – pour la métropole du Grand Paris (1). Il aura fallu un an et demi d'étude pour évaluer ce potentiel calorifique du sous-sol, jugé considérable à l'échelle des 131 communes de la métropole parisienne. Ainsi, la géothermie de surface pourrait produire environ 25 TWh par an, couvrant plus de la moitié des besoins en chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation de la métropole. Fin 2021, c'était la communauté de communes Loire Layon Aubance (Maine-et-Loire) qui publiait sa cartographie parcellaire (2). En croisant de manière innovante les besoins thermiques des bâtiments avec les ressources disponibles en sous-sol, l'étude a montré que plus de 70 % des parcelles (voire plus de 85 % dans certaines communes) pourraient voir leurs besoins de chauffage et de rafraîchissement couverts à 100 % par la géothermie. Ainsi, le potentiel de la géothermie de surface est important en France.

UN EMPILEMENT DE SÉDIMENTS

Jadis occupé par des mers peu profondes et des lacs, le Bassin parisien est constitué de sédiments empilés. Sur cette coupe géologique sont indiqués les isothermes à 60 °C et 100 °C et les nappes d'eau souterraines, ainsi que l'emplacement de quelques exploitations géothermiques (flèches).



SOURCE ADEME - BRGM

Dans les bassins sédimentaires, comme le Bassin parisien ou le Bassin aquitain, le gradient géothermique (qui désigne le taux d'augmentation de la température dans le sous-sol à mesure que l'on s'éloigne de la surface) est d'environ 30 à 40 °C par kilomètre, si bien qu'à 2 km de profondeur, la température qui règne est de 70 à 80 °C. Si les roches qui se trouvent à cette profondeur sont perméables, c'est-à-dire qu'elles contiennent de l'eau et permettent sa circulation, celles-ci sont alors appelées aquifères et la nappe d'eau chaude qu'elles contiennent peut être captée par des forages.

La situation est bien différente dans le graben rhénan, ce fossé d'effondrement de 30 km sur 300 km qui sert de frontière naturelle entre la France et l'Allemagne : le gradient géothermique atteint localement 110 °C/km dans les 1 400 premiers mètres de la croûte terrestre. Ainsi, à une profondeur de 1,5 km, la température atteint déjà 120 °C. Mais ce gradient n'est pas constant. Il décroît en dessous de l'interface entre les couches sédimentaires et leur socle sous-jacent. C'est ainsi qu'une température de 170 °C est atteinte à 5 km de profondeur, dans le socle granitique. C'est là qu'a été installée la centrale géothermique de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin), qui exploite l'eau chaude pour produire de l'électricité depuis 2016.

Dans les zones volcaniques, comme en Guadeloupe, près du volcan de la Soufrière, le gradient géothermique est encore bien plus élevé, le magma arrivant localement jusqu'à la surface. La centrale de Bouillante y exploite de l'eau à 250-260 °C, prélevée dans un réservoir situé à une profondeur comprise entre 500 et 1 000 m.

Le projet Geotref, auquel participent CY Cergy Paris Université et de multiples institutions, dont le CNRS, vise à localiser d'autres ressources géothermiques permettant d'augmenter la production d'électricité en Guadeloupe (3). Il est financé par l'Ademe depuis 2014. La prospection géophysique (électrique et magnéto-tellurique) met en évidence la couverture imperméable des réservoirs géothermiques. Elle complète l'étude géologique (cartographie des types de roches et des failles, prélèvement d'échantillons montrant des évidences de circulation de fluides fossiles analysés ensuite en laboratoire pour en déterminer différentes propriétés, dont la perméabilité). Les échelles d'exploration vont donc du kilomètre (géophysique, cartographie géologique) au micromètre (observations au microscope, mesures de perméabilité). ■

(1) tinyurl.com/yc3krwzz
(2) tinyurl.com/yym4m57v
(3) Geotref.com

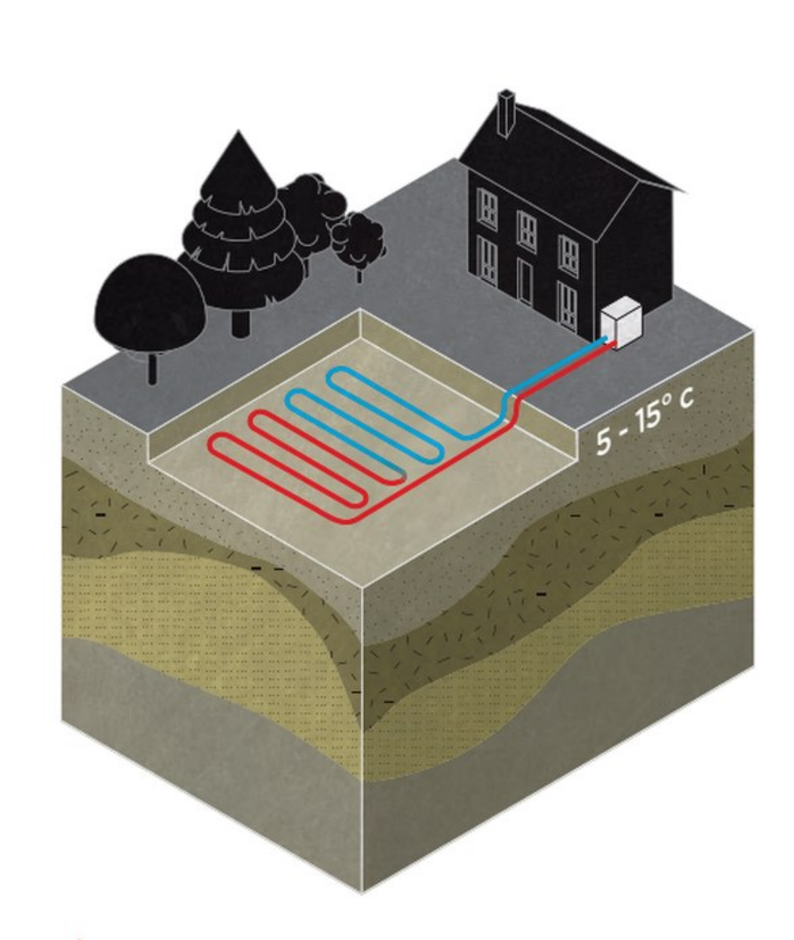
2

LA GÉOTHERMIE DE SURFACE

À moins de 200 mètres de la surface, les températures du sol ne sont pas très élevées – quelques dizaines de degrés –, de sorte que l'efficacité de la récupération de chaleur n'est pas énorme. Mais comme ces systèmes ne nécessitent pas d'onéreux forages, les ressources sont exploitables presque partout dans le monde pour des utilisations locales, logements ou bureaux par exemple. Le plus souvent, la chaleur est récupérée par le passage de fluides dans des sondes géothermiques et échangée à l'aide d'une pompe à chaleur.

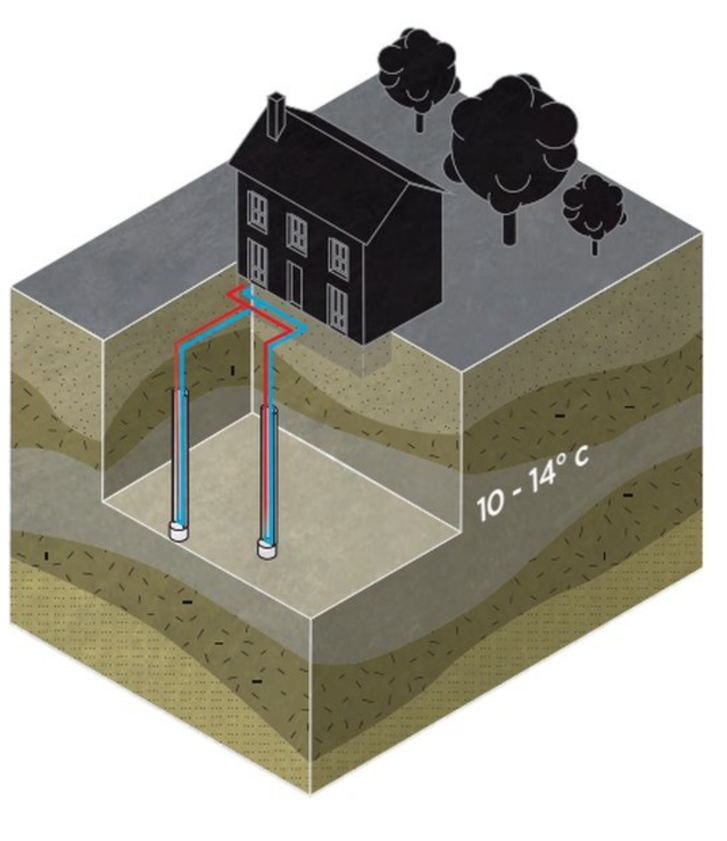
Lorsque l'on capte l'énergie du sous-sol entre 0 et 200 mètres de profondeur, on parle de géothermie de surface. Cette technologie, envisageable sur l'ensemble du territoire français, répond principalement aux besoins des maisons individuelles et des bâtiments tertiaires, mais peut aussi concerner les usages collectifs. Elle permet le chauffage ou le rafraîchissement des bâtiments (on parle de « geocooling »), en fonction des besoins saisonniers. Pour qu'elle soit efficace, il faut évidemment que les bâtiments disposent d'une bonne isolation thermique. Trois techniques principales peuvent être mises en œuvre : les puits provençaux, les échangeurs en circuit fermé et les doublets (*) sur nappe.

Le puits provençal (aussi appelé puits canadien ou puits climatique) est le système géothermique le plus simple. Il s'agit d'un conduit enterré, en terre cuite, métal ou matière plastique, dans lequel de l'air provenant de l'extérieur circule pour être ensuite insufflé dans l'habitat. Au cours de cette circulation, l'air échange ses calories avec celles du sol. Ainsi, en hiver, l'air froid extérieur est réchauffé ; en été, l'air chaud est rafraîchi. Le diamètre du conduit



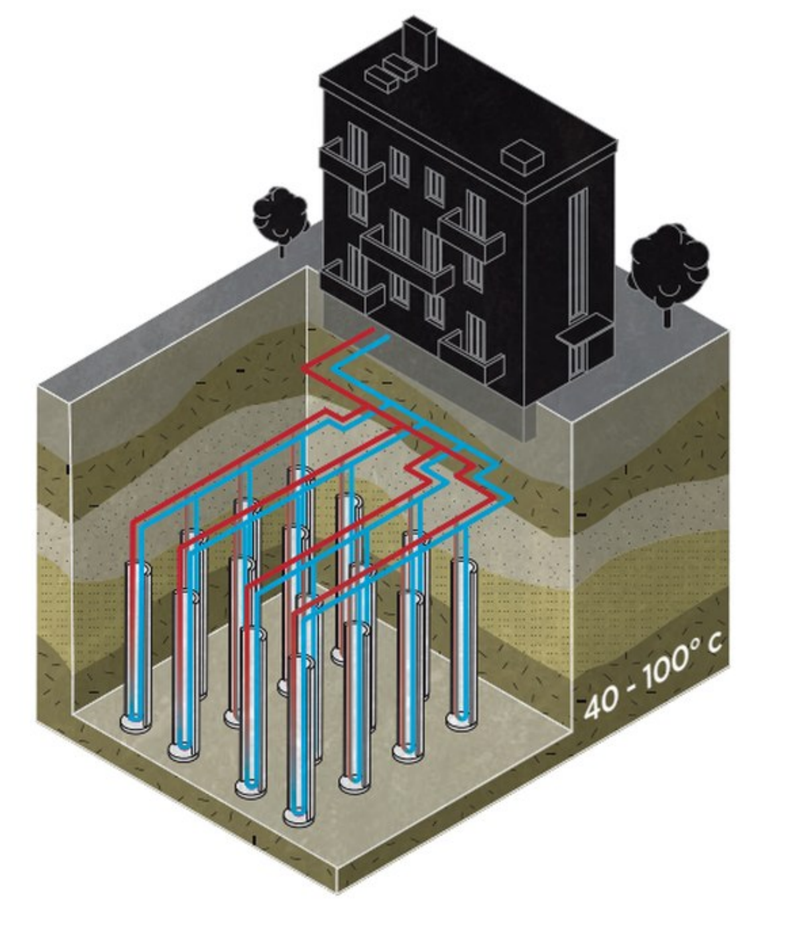
ÉCHANGEUR HORIZONTAL

Il est constitué de boucles où circule un fluide caloporteur couplé à une pompe à chaleur. Celle-ci transfère la chaleur prélevée dans le fluide vers le bâtiment (mode chauffage) ou vice versa (mode rafraîchissement).



SONDES VERTICALES

Installées jusqu'à 200 mètres de profondeur, elles contiennent un fluide caloporteur. La profondeur du forage dépend notamment de la puissance que l'on souhaite obtenir (45 W en moyenne par mètre linéaire vertical).

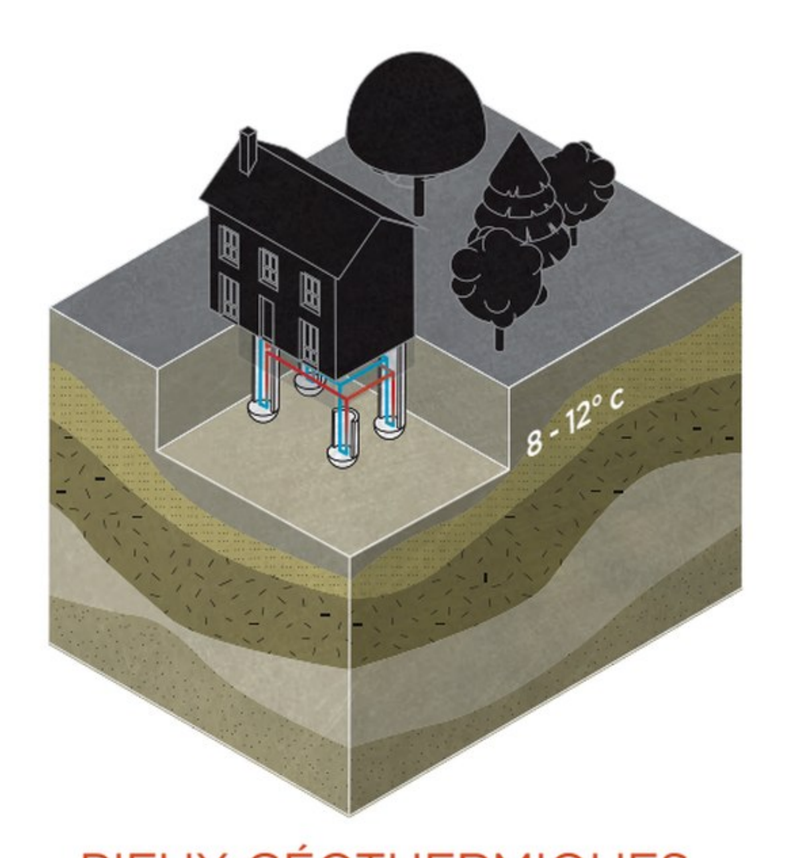


CHAMPS DE SONDES

Aptes à couvrir les besoins de bâtiments tertiaires importants ou d'un petit quartier, ils offrent une stabilité de rendement, et la possibilité d'obtenir un rafraîchissement direct par le sol (sans passer par la pompe à chaleur).

(de plusieurs centimètres à plusieurs mètres) dépend du volume du bâtiment.
Les échangeurs en circuit fermé – ou sondes géothermiques – consistent à implanter des sondes dans lesquelles circule un fluide caloporteur qui prélève la chaleur emmagasinée dans le sous-sol par conduction thermique. Par exemple, les sondes géothermiques verticales sont des échangeurs thermiques placés dans un ou plusieurs forages. Elles vont jusqu'à une profondeur de 200 m. Ces sondes peuvent avoir des formes variées : en étoile – ce qui permet un gain d'efficacité, car cela augmente la surface d'échange – ou bien être superficielles (capteurs en forme de corbeilles). Depuis une dizaine d'années, un nouveau type d'échangeur en circuit fermé est de plus en plus utilisé : les pieux géothermiques. Il s'agit de fondations thermoactives qui offrent le double avantage de capter la chaleur du sous-sol et de servir de fondation aux constructions lorsque le sol le nécessite pour des raisons mécaniques.
Avec les échangeurs géothermiques ouverts, on exploite aussi les nappes d'eau souterraines contenues dans les roches peu profondes. Cette technique consiste à prélever l'eau d'une nappe souterraine par un puits, à la faire circuler en surface dans une pompe à chaleur et à la réinjecter, une fois refroidie, dans la formation géologique, par un autre puits. L'eau souterraine pompée est légèrement plus chaude que la surface en hiver (environ 10 degrés à quelques mètres de profondeur), permettant d'assurer le chauffage des bâtiments en cette saison ; à l'inverse, elle est plus froide en été, ce qui permet leur rafraîchissement.

Le fluide caloporteur prélève la chaleur emmagasinée dans le sous-sol par conduction thermique



PIEUX GÉOTHERMIQUES

Ils permettent d'intégrer un projet géothermique dans les fondations des constructions neuves. Mais ils sont soumis à des contraintes thermomécaniques qui nécessitent une mise en œuvre adaptée.

PRÉSERVER LES EAUX DE SURFACE

La réinjection a plusieurs vertus. Elle évite, tout d'abord, de rejeter dans le milieu naturel une eau plus chaude et à la composition chimique différente de celle des eaux de surface (rivières, lacs), et donc d'entraîner une pollution. Elle permet également de maintenir constants le niveau de la nappe et la pression dans le réservoir souterrain. Les débits de production et d'injection imposés aux forages dépendent des caractéristiques de l'aquifère. L'exploitation entraîne une modification locale de la température de la nappe aux alentours du point d'injection, si bien qu'elle n'est possible que si l'écoulement de la nappe est suffisant pour que le puits producteur ne soit pas sensiblement refroidi par la réinjection en période de chauffe (ou réchauffé, si la géothermie sert pour le rafraîchissement).
La pompe à chaleur qui est couplée à ces deux derniers types d'installation (circuit fermé et système ouvert par doublet) permet d'élever ou d'abaisser la température extraite du sous-sol afin d'optimiser la production de chaleur en hiver et de fraîcheur en été, tout en étant peu énergivore. En France, plus de 200 000 pompes à chaleur étaient installées fin 2020, permettant une production thermique de 4 770 GWh pour une puissance installée de 3 076 MW. Cela représente 0,7 % de la consommation finale de chaleur en 2020, dont la plus grande partie sert aux usages individuels. ■

(*) **Un doublet** est un groupe de deux forages associés.

3

LA CHALEUR DES PROFONDEURS

Les températures régnant dans les profondeurs de la Terre sont bien plus élevées qu'en surface. Les coûts de forage et d'exploitation sont certes élevés, et la sismicité locale est à prendre en compte, mais les rendements peuvent être intéressants. D'autant que l'on imagine aussi profiter de ces dispositifs pour stocker du CO_2 industriel et par ailleurs récupérer du lithium, élément stratégique des batteries électriques.

Le forage le plus profond jamais réalisé, de 14 kilomètres, effleure à peine la surface de la Terre (dont le rayon moyen est de 6370 km). Et pour cause : creuser en profondeur coûte cher. Mais l'avantage peut être important, car les températures y sont élevées. La géothermie profonde concerne les forages supérieurs à 200 mètres. À de telles profondeurs, la température du sous-sol est généralement comprise entre 30 et 150 °C, ce qui autorise de multiples usages. Par exemple, on peut chauffer directement des bâtiments à l'aide de réseaux de chaleur urbains (comme ceux de Créteil, Melun, Meaux dans le Bassin parisien, et bien d'autres encore). La vapeur récupérée peut être utilisée pour faire tourner des turbines et produire de l'électricité, comme dans la centrale de Soultz-sous-Forêts, en Alsace, ou celle de Bouillante, en Guadeloupe. La géothermie profonde fonctionne généralement par un doublet (deux puits), à l'exception du site alsacien, qui exploite un triplet.

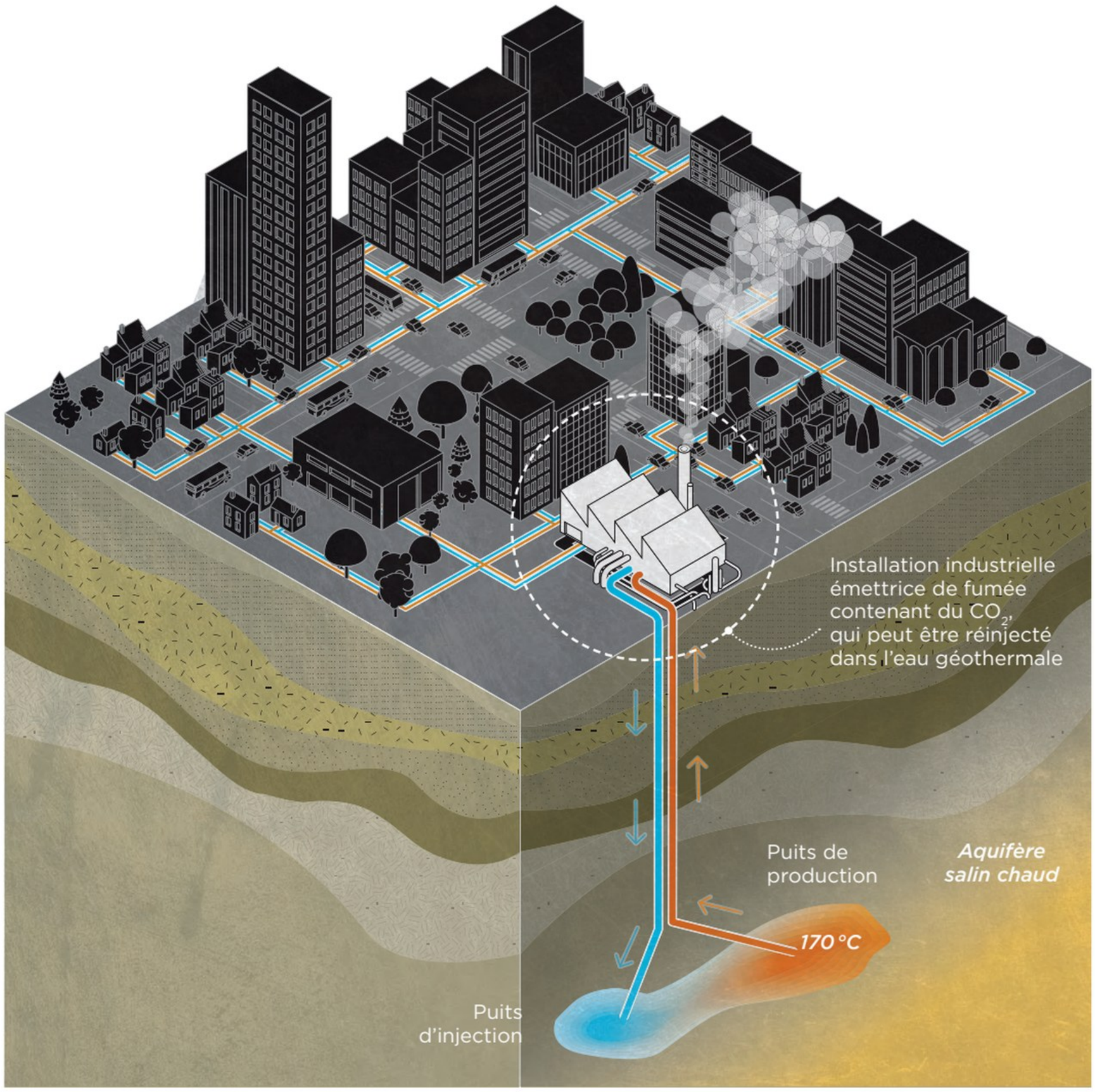
1,3 GW

C'EST LA PUISSANCE INSTALLÉE DU COMPLEXE géothermique des Geysers, en Californie, le plus gros au monde. Il compte 18 centrales de production d'électricité à partir de la vapeur récupérée dans 350 puits allant jusqu'à 3 km de profondeur.

L'eau géothermale, riche en éléments dissous et parfois en gaz, est généralement très corrosive, de sorte qu'elle ne peut pas circuler dans les installations de surface. En géothermie profonde, deux boucles sont alors isolées : la boucle profonde et la boucle de surface, qui apporte l'eau réchauffée dans l'échangeur thermique de surface aux immeubles, dans le cas de réseaux de chaleur urbains. Afin de produire de l'électricité, le système doit, de plus, être muni d'une turbine actionnée par de la vapeur. Lorsque le réservoir exploité est localisé dans un socle, comme c'est le cas pour le granite à Soultz-sous-Forêts, la ressource est difficile à capter, car l'eau géothermale circule dans des fractures qui doivent alors être recoupées ou suivies par les forages. Il est fréquent que la perméabilité initiale du milieu soit insuffisante et qu'il faille la stimuler.

BIEN ÉVALUER LA SISMICITÉ INDUITE

Comme toutes les activités industrielles, la géothermie peut avoir un impact sur l'environnement. Une sismicité induite peut ainsi être provoquée par l'injection de fluides, qui augmente la pression interstitielle en profondeur. C'est cette hypothèse qui est invoquée dans le cas des tests de stimulation des forages géothermiques.
En 2020 et 2021, l'actualité de la géothermie profonde a été marquée par plusieurs événements sismiques, à proximité de Strasbourg (1). Ces séismes, attribués à un projet géothermique voisin, ont engendré l'arrêt de son développement. Pourtant, il est malaisé de distinguer ce type de sismicité de la sismicité naturelle, les mêmes processus physiques étant en jeu dans les deux cas. Les phases de foration et d'essais sont les plus délicates en termes d'impacts et de nuisances potentiels, mais elles sont de courte durée (quelques mois à un an). Impacts et nuisances sont théoriquement bien maîtrisés, car ils sont évalués au préalable, de façon obligatoire, avant la mise en œuvre du projet (études d'impact réglementaires). Et en effet, les sites géothermiques profonds de Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen fonctionnent depuis plusieurs années sans poser de problème de sismicité induite. Il en est de même en Allemagne, dans le graben rhénan, et en Islande ou en Nouvelle-Zélande, pourtant situées dans des zones géologiquement



CHAUFFAGE URBAIN

La boucle profonde, ou boucle géothermale, capte l'eau souterraine, corrosive. Elle est séparée de la boucle de surface, encore appelée boucle géothermique, qui apporte aux immeubles l'eau réchauffée dans l'échangeur thermique. En 2023, près d'un million d'habitants du Bassin parisien devraient être chauffés par géothermie profonde.

très actives, où l'exploitation géothermique très intense depuis des décennies ne pose pas de problème de sismicité induite.

Quel avenir pour la géothermie ? Avec l'arrêt de la production d'hydrocarbures prévu en France en 2040 (2), la conversion de ces installations pour d'autres usages, dont la géothermie, est envisagée. En plus de la production d'énergie, l'extraction de ressources minérales à partir des saumures géothermales pourrait améliorer la rentabilité des puits de géothermie profonde. Dans le cadre de la transition énergétique, le lithium est appelé à occuper une place centrale dans le stockage de l'électricité au moyen de batteries (lithium-ion). Or, les saumures géothermales d'Alsace, telles que celles exploitées à Soultz-sous-Forêts, contiennent des quantités importantes de lithium sous forme de chlorure (150 à 200 milligrammes par litre). Plusieurs projets de recherche ont vu le jour. La production de dix centrales géothermiques en Alsace suffirait à couvrir l'ensemble des besoins des véhicules électriques français (3). En plus de l'exploitation de la chaleur et des ressources minérales des eaux géothermales, du CO_2 produit en surface par des industries pourrait y être injecté. Cela présenterait le double avantage d'éviter son rejet atmosphérique et d'utiliser un fluide au pouvoir calorifique nettement supérieur à celui de l'eau pour la géothermie (4).

En résumé, la géothermie profonde devrait rester une faible part des sources d'énergie en France, en raison des coûts élevés de forage. Toutefois, elle pourrait profiter de co-avantages que sont l'extraction du lithium et le stockage du CO_2. Ailleurs dans le monde, dans certaines régions à fort potentiel – Islande, Japon, Nouvelle-Zélande –, elle devrait continuer de croître. ■

(1) tinyurl.com/3eu3frps
(2) Légifrance, loi du 30 décembre 2017.
(3) tinyurl.com/59kbz7fs
(4) tinyurl.com/2p9x23cp

Les liquides actifs : du chaos à l'ordre

Des viaducs antiques à la circulation sanguine, nous devons appliquer de la pression sur les liquides pour les transporter. Est-il possible d'en créer qui seraient capables de s'écouler spontanément sans avoir à les mettre sous pression, de créer des liquides animés de l'intérieur ? Répondre à cette question est un objectif central des physiciens qui travaillent sur la matière active, un domaine de recherche en pleine expansion, né il y a une quinzaine d'années. L'émergence de mouvement collectif à partir d'entités motiles indépendantes est la clé de cette nouvelle physique. En ligne de mire, des matériaux nouveaux aux propriétés inédites.

▲ *Ces dizaines de milliers d'étourneaux se meuvent ensemble, malgré l'absence de moyen de communication global. Ils constituent ainsi un système actif, principe d'organisation omniprésent dans la nature à toutes les échelles.*

Nous sommes de la matière active. Le corps humain est une structure autoassemblée fascinante, capable de se mouvoir grâce à la dynamique cordonnée et autonome de millions d'unités en interaction, de l'échelle moléculaire à celle des muscles et des organes. Le corps humain n'est cependant pas le seul système que les physiciens qualifient de matière active. Ces systèmes sont omniprésents dans la nature, à toutes les échelles là aussi : les foules humaines, les bancs de poissons ou les nuées d'oiseaux (très grande échelle) ; les tissus cellulaires et les colonies de bactéries (échelle intermédiaire) ; les molécules à l'intérieur de nos cellules (très petite échelle). Tous ces systèmes sont assemblés à partir d'entités motiles individuelles qui présentent une organisation émergente. De façon remarquable, ces comportements collectifs ne sont pas programmés dans le mouvement des unités individuelles et ne nécessitent pas non plus la présence de chefs d'orchestre pour coordonner la dynamique du groupe. Si celle-ci ne repose pas sur une programmation fine ou une capa-

Denis Bartolo
PHYSICIEN, ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE LYON (ENS DE LYON)
Professeur de physique, il anime un groupe de recherche qui étudie les phénomènes collectifs dans la matière molle et la matière active.

Amélie Chardac
PHYSICIENNE, UNIVERSITÉ BRANDEIS (ÉTATS-UNIS) *Postdoctorante à l'université Brandeis dans le groupe de Guillaume Duclos, qui s'intéresse aux propriétés des comportements collectifs dans les matériaux actifs biomimétiques.*

MINT IMAGES / GETTY IMAGES - DR

cité cognitive des individus actifs, une série de questions se pose alors : pouvons-nous créer des matériaux actifs artificiels ? Pouvons-nous espérer concevoir des liquides ou des solides synthétiques capables de se mouvoir ou de se déformer spontanément ? Quelles briques élémentaires seraient nécessaires à la fabrication de matériaux dont les mouvements émergents pourraient mimer ceux des nuées d'oiseaux, des bancs de poissons, des tissus cellulaires ou même présenter des comportements autonomes hors d'atteinte des systèmes naturels ?

Dans un biofilm, les cellules s'organisent à une très grande échelle par rapport à celle d'une bactérie unique

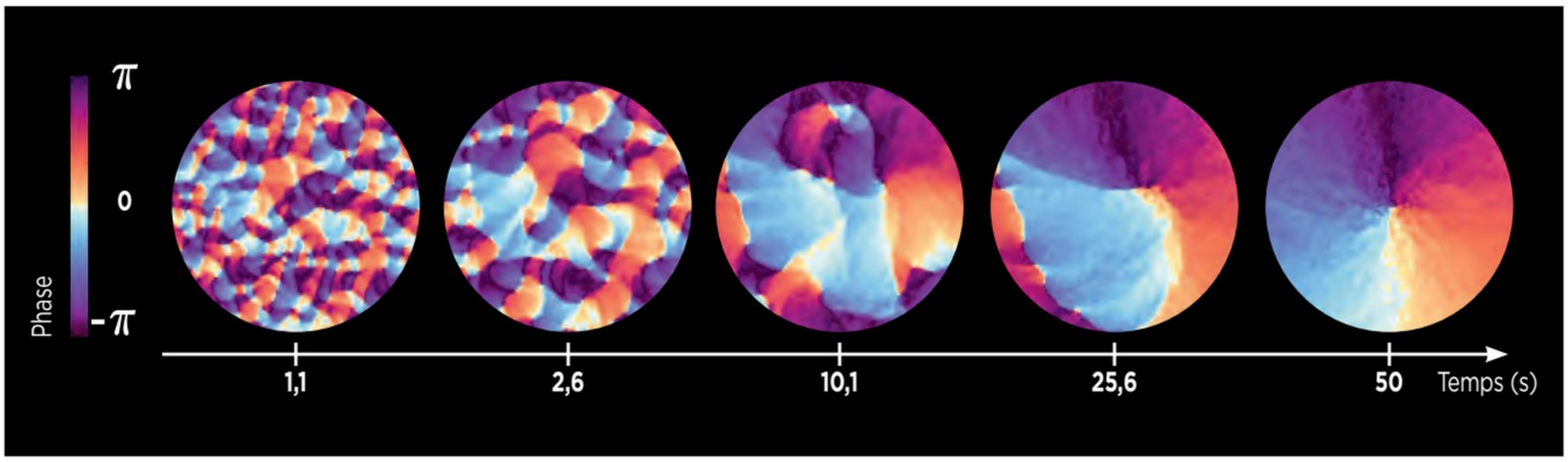
Les réponses à ces questions sont aujourd'hui à notre portée, et elles puisent en partie leur origine dans l'explosion de la biophysique dans les années 1990. Deux voies avaient émergé. La première correspondait à ce que l'on appelait la « physique inspirée par la biologie ». Les chercheurs s'interrogeaient sur des questions de physique et utilisaient des constituants biologiques afin de réaliser des expériences inédites, ou de rendre concrètes des questions de physique fondamentale qui n'avaient a priori pas d'application – par exemple, tirer sur des molécules d'ADN pour comprendre l'élasticité d'un brin de polymère isolé. La seconde voie consistait à étudier, avec des outils et des méthodes physiques, des systèmes directement pertinents pour la biologie. À cette époque, on s'interrogeait particulièrement sur l'organisation du milieu intracellulaire.

Une étape expérimentale clé a été franchie avec la publication, au début des années 2000, d'un article coécrit par des physiciens et des biologistes, dont le Franco-Américain Stanislas Leibler, à Princeton (États-Unis), et le Français Éric Karsenti (*récipiendaire de la médaille d'or du CNRS en 2015, et qui fut directeur scientifique de la mission Tara Océans, NDLR*), alors à Heidelberg (Allemagne) (1). Ces chercheurs ont eu l'idée d'étudier un système minimal, c'est-à-dire un mélange des constituants élémentaires du squelette cellulaire – des biofilaments – et des moteurs moléculaires capables de les rendre motiles. Ils ont alors observé une dynamique d'auto-organisation de ce mélange à une échelle très grande par rapport à la taille des unités le composant. Autrement dit, ils ont vu émerger des motifs semblables à ceux que l'on observe *in vivo :* une première réussite de synthèse de matériaux actifs *in vitro.* De cette expérience fondatrice est née la notion que la structure intracellulaire peut s'expliquer par l'auto-organisation d'unités motiles, et non pas nécessairement comme le résultat d'une machinerie génétique complexe qui commanderait précisément la localisation des motifs dans la cellule. Le concept de matériaux organisés spontanément dans l'espace et le temps à partir d'interactions physiques simples entre des composants actifs était démontré.

UN MOUVEMENT D'ENSEMBLE POSSIBLE À PARTIR D'INTERACTIONS LOCALES

L'auto-organisation d'entités élémentaires en matériaux organisés n'est pas bien sûr une idée nouvelle en physique. Les cristaux, par exemple, forment des structures parfaitement ordonnées dans l'espace sans que la position des atomes qui les constituent n'ait à être programmée. Mais les cristaux, les cristaux liquides, les matériaux magnétiques et tous les états organisés de la matière sont bien décrits et compris quand ils sont à l'équilibre. Ce n'est pas le cas des matériaux actifs, dont les unités de base échangent continûment de l'énergie avec leur environnement pour la convertir en mouvement.

En parallèle de l'essor de la biophysique, une avancée majeure pour comprendre la matière active a été réalisée en 1995, lorsqu'un groupe de physiciens hongrois et israéliens, animé par Tamás Vicsek (université Loránd-Eötvös à Budapest, Hongrie), s'est intéressé théoriquement au comportement de particules autopropulsées. L'objectif était de tenter de comprendre les dynamiques de populations animales ou bactériennes en les décrivant



AMÉLIE CHARDAC ET AL., PHYS. REV. X, 11, 031069, 2021

comme des systèmes magnétiques hors équilibre. Dans un tapis de colonie bactérienne – un biofilm –, les cellules s'organisent à une très grande échelle par rapport à une bactérie unique. De la même façon, dans une nuée d'oiseaux, des dizaines de milliers d'individus se meuvent ensemble le long d'une même direction moyenne, en dépit de l'absence de moyen de communication qui permettrait à un leader de coordonner le mouvement global : le mouvement d'ensemble et cette structure ne peuvent émerger qu'à partir d'interactions locales entre voisins. Tamás Vicsek est parvenu à simplifier le problème initial : en s'inspirant de la physique du magnétisme, il décrit chaque oiseau, ou individu motile, comme une particule dotée d'un spin – ici une direction privilégiée – avec lequel s'aligne la vitesse. En d'autres termes, dans son modèle, une nuée d'oiseaux peut être vue comme un ensemble de petits aimants volant avec une règle très simple : chaque aimant sonde ses voisins et aligne son spin (donc la direction de son déplacement) avec eux. Ce modèle minimal est devenu un classique du domaine. Malgré sa simplicité, il décrit bien le comportement des nuées d'oiseaux, des bancs de poissons, et de toute la matière active où des particules autopropulsées s'alignent localement avec leurs voisines (2).

Les interactions d'alignement de vitesse conduisent à ce qu'on appelle en physique une brisure spontanée de symétrie, c'est-à-dire une transition de phase, comme en magnétisme. Lorsque les interactions sont faibles, le système de particules autopropulsées se comporte de manière désordonnée, comme dans un gaz – chacune se propulse de manière homogène et de manière identique dans toutes les directions de l'espace ; quand les interactions s'accentuent, les particules alignent leur déplacement dans une direction commune, mais qui n'est pas prescrite a priori. La direction du mouvement est une propriété émergente.

UN FLUIDE ACTIF SYNTHÉTIQUE À DEUX DIMENSIONS

Dans une expérience mettant en jeu quatre millions de particules colloïdales motorisées individuellement par un champ électrique, on voit apparaître au cours du temps un phénomène d'auto-organisation : à partir d'un mélange initial, les particules confinées en deux dimensions roulent et s'organisent petit à petit. Les défauts topologiques – visibles par les changements de couleur locaux dans l'orientation (mesurés par la phase) – sont au cœur de ce processus d'auto-organisation du fluide actif (le diamètre du cercle est de 6 millimètres).

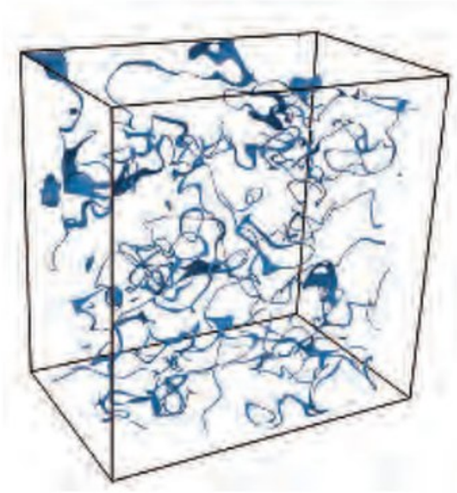
PRENDRE LE PARTI DE REGARDER LES CHOSES « DE LOIN »

Toujours en 1995, étonnés par les résultats du modèle de Vicsek, deux physiciens américains, John Toner (université de l'Oregon) et Yuhai Tu (centre de recherche Thomas J. Watson d'IBM), sont allés encore plus loin dans l'idée de décrire les troupeaux et nuées comme de la matière condensée, en prenant le parti de regarder les choses « de loin ». En effet, quand on scrute en détail différentes nuées, il est clair que les interactions « étourneau-étourneau », « criquet-criquet » ou « sardine-sardine » n'ont rien à voir les unes avec les autres. Mais à grande distance, lorsque la résolution est faible, ce que l'on voit systématiquement est un ensemble d'objets orientés qui se déplacent en moyenne le long de la même direction, et ce de manière très stable. Ainsi, pourquoi ne pas décrire cet objet comme un milieu continu, autrement dit comme une goutte de liquide qui coule spontanément ? Cette description hydrodynamique des troupeaux, nuées ou bancs qu'ils sont parvenus à modéliser, a ouvert la voie vers une méthode standard et générique pour décrire les systèmes

actifs en général, au-delà du cas spécifique des nuées. Cette méthode s'est révélée particulièrement efficace pour représenter la dynamique de mélange entre biofilaments du cytosquelette et moteurs moléculaires, ou encore pour les foules humaines. Cette méthode a surtout confirmé l'idée que l'émergence et la stabilité des mouvements collectifs n'étaient en rien une spécificité biologique (3). Il a pourtant fallu encore quinze ans de travaux pour qu'au début des années 2010, les physiciens parviennent à fabriquer les premiers matériaux actifs synthétiques : des liquides capables de se structurer et de s'écouler spontanément, sans action mécanique extérieure. La première difficulté a été la motorisation de briques élémentaires microscopiques, la seconde de contrôler et de comprendre leur auto-organisation.

UN MOUVEMENT DE NAGE INSPIRÉ PAR LA BIOMIMÉTIQUE

La communauté de la matière active est issue en majorité de celle de la physique de la matière molle. Cette dernière étudiait depuis plus de cinquante ans les propriétés de dispersion de particules dans les liquides et les liquides structurés : de la mayonnaise aux cristaux liquides. L'idée de parvenir à obtenir des solutions de particules qui nagent a émergé dans les années 2000. La première approche a été de fabriquer des « micronageurs » biomimétiques. Par exemple, en 2005, Rémi Dreyfus a fabriqué, durant son travail de thèse à l'École supérieure de chimie industrielle de la ville de Paris (ESPCI), des micronageurs constitués de filaments de colloïdes (*) magnétiques attachés à un globule rouge. Cette structure où un sphéroïde est connecté à un flagelle flexible mime celle d'un spermatozoïde. En ajustant le champ magnétique, il est parvenu à induire un mouvement de nage à une vitesse ajustable (4). Cette stratégie biomimétique a inspiré une ligne de recherche, mais a aussi rapidement montré ses limites. Il avait fallu plus de trois années pour fabriquer une poignée de nageurs identiques et leur nage restait fortement contrainte par la direction du champ magnétique, empêchant cette première génération de particules actives d'explorer librement l'espace.



▲ *Un assemblage expérimental de virus en forme de bâtonnets associés à des microtubules et à des moteurs moléculaires donne lieu à un liquide actif tridimensionnel où apparaissent des zones de défauts : les bâtonnets ne sont pas parallèles. Ces défauts topologiques sont visualisés ici dans ce parallélépipède de 0,25 millimètre de côté.*

(*) **Un colloïde** est une particule solide ou liquide de taille comprise entre quelques dizaines de nanomètres et quelques micromètres.

À partir des années 2010, les choses se sont accélérées et on a vu apparaître les premiers matériaux actifs totalement synthétiques. En se dégageant d'abord de toute contrainte biomimétique. Si la nature offre des solutions d'une extrême élégance, ce ne sont pas toujours celles que l'homme retient pour le développement technologique – la roue a été une révolution pour l'humanité, mais elle n'est à la base du déplacement d'aucune créature vivante. Afin de motoriser des microrobots colloïdaux, nous avons réinventé la roue. L'idée est d'utiliser un effet électrohydrodynamique mis en évidence au XIXe siècle lors de la quête de moteurs capables d'actionner les premières machines. Cet effet connu sous le nom de rotation de Quincke consiste à immerger des particules isolantes dans un milieu conducteur en rotation en les soumettant à un champ électrique. Les particules tournent spontanément sur elles-mêmes le long d'un axe aléatoire. Il ne restait plus qu'à mettre ces particules en contact avec une surface solide pour créer des microrouleurs autonomes libres d'explorer des dispositifs microfluidiques. De façon remarquable, ces particules sont capables de réagir aux écoulements induits par le déplacement de leurs voisines. Cette règle de communication locale donne alors lieu à l'émergence d'un mouvement collectif dirigé (5). Nos robots colloïdaux s'auto-organisent spontanément en troupeaux de plusieurs millions d'individus qui alimentent des écoulements d'une extrême stabilité dans des liquides, sans qu'aucune contrainte mécanique ne doive être appliquée.

Une autre approche pour motoriser des particules colloïdales consiste à utiliser des particules dites Janus (du nom du dieu romain aux deux visages différents), dont les propriétés physico-chimiques diffèrent sur deux faces. Mises en solutions réactives, ces particules colloïdales convertissent de l'énergie chimique en mouvement de nage. Toutefois, contrairement aux rouleurs de Quincke, leur dynamique collective ne s'apparente pas à celle de troupeaux : elles ne permettent pas de générer d'écoulements spontanés. Cette seconde forme de matière active synthétique présente tout de même une propriété remarquable : même en l'absence de toute interac-

GUILLAUME DUCLOS ET AL., SCIENCE, 367, 1120, 2020

tion attractive entre les unités motiles, les colloïdes Janus sont capables de se condenser en amas et de former spontanément des phases denses comme des cristaux ou des verres (6). Cette ségrégation est induite par la seule motilité des unités élémentaires.

La seconde stratégie qui a permis la réalisation de véritables matériaux synthétiques a consisté à « voler » au vivant les outils nécessaires à la motorisation de la matière molle. Par exemple, en purifiant les moteurs moléculaires et microtubules des expériences pionnières des années 1990 et en les intégrant à des suspensions denses de virus, l'équipe de Zvonimir Dogic, de l'université de Californie à Santa Barbara (États-Unis), a réussi à fabriquer des cristaux liquides actifs (7). Plus précisément, le système est constitué de suspensions de virus en forme de bâtonnets de taille identique. À haute concentration et à l'équilibre, ces virus s'auto-organisent en cristaux liquides et s'alignent le long d'une même direction. Mais en consommant de l'énergie chimique de molécules d'ATP (l'adénosine triphosphate, le carburant des cellules), les moteurs moléculaires accrochés aux microtubules créent des contraintes internes au sein du cristal liquide de virus qui courbent l'orientation des molécules, ce qui induit un écoulement amplifiant les contraintes et rend ainsi la structure alignée instable et chaotique. Ce matériau est dans un état dit nématique, intermédiaire entre les phases solides cristallines et liquides (les cristaux liquides sont des nématiques). Dans ce domaine très en vogue des nématiques actifs, le système n'est jamais au repos : il est toujours en train de se faire « pétrir » de l'intérieur par l'activité de ses constituants élémentaires.

DES AVANCÉES POUR COMPRENDRE L'AUTO-ORGANISATION DU VIVANT

D'autres moteurs biologiques sont utilisés, comme des bactéries ou des spermatozoïdes qui actionnent de l'intérieur les écoulements de suspensions. Par exemple, l'équipe d'Éric Clément et d'Harold Auradou, à l'ESPCI-Sorbonne Université et à l'université Paris-Saclay, étudie les propriétés de bactéries motiles dans différents environnements. Ce groupe de physico-chimistes a également réalisé des fluides qui s'écoulent sans application de forces externes et tente de comprendre comment la motorisation interne des fluides modifie leurs propriétés mécaniques (8).

Des moteurs biologiques sont utilisés, comme des spermatozoïdes, qui actionnent de l'intérieur les écoulements de suspensions

Dans la nature, les systèmes à l'équilibre sont l'exception, pas la règle. Sur le plan fondamental, les nouveaux concepts et outils portés par la physique de la matière active ont permis des avancées majeures dans notre compréhension des processus d'auto-organisation du vivant. Les matériaux actifs de synthèse qui ont été réalisés ont permis d'élever notre compréhension de l'auto-organisation loin de l'équilibre. Toutefois, au-delà de ces avancées conceptuelles, la matière active n'a pas encore rempli une de ses promesses initiales : donner naissance à une nouvelle génération de matériaux fonctionnels. Aujourd'hui, les systèmes actifs synthétiques restent au stade d'expériences de laboratoire. Les systèmes biosourcés restent fragiles, extrêmement coûteux et peu stables dans le temps. Quant aux systèmes synthétiques, même s'ils sont plus robustes et accessibles, ils sont aujourd'hui limités à des expériences modèles en deux dimensions. La création de véritables matériaux actifs de synthèse produits en volumes suffisants pour conduire à des applications pratiques reste un défi que les physiciens ne résoudront certainement qu'en étroite collaboration avec des chimistes et des biologistes. Les travaux sont lancés. Le fruit de ces collaborations ouvrira sans aucun doute de nouvelles questions fondamentales, mais aussi la possibilité de créer des matériaux aux propriétés hors d'atteinte par ceux qui nous sont aujourd'hui accessibles dans la nature ou dans nos laboratoires. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

■ Vidéo d'une conférence donnée par le physicien Jean-François Joanny, professeur au Collège de France, sur la matière active et la physique du vivant (avril 2020) : https://tinyurl.com/yu4kpds7

(1) Th. Surrey *et al.*, *Science, 292,* 1167, 2001.

(2) T. Vicsek *et al.*, *Phys. Rev. Lett., 75,* 1226, 1995.

(3) J. Toner et Y. Tu, *Phys. Rev. Lett, 75,* 4326, 1995.

(4) R. Dreyfus *et al.*, *Nature, 437,* 862, 2005.

(5) A. Chardac *et al.*, *Phys. Rev. X, 11,* 031069, 2021.

(6) J. Palacci *et al.*, *Science, 339,* 936, 2013.

(7) T. Sanchez *et al.*, *Nature, 491,* 431, 2012 ; G. Duclos *et al.*, *Science 367,* 1120, 2020.

(8) H. Auradou *et al.*, *Reflets phys., 57*, 20, 2018.

โชติ
ดมชัยการช่าง
ติ.กันสาด.ทั้งลวด.อัลลอย
งานเหล็กทุกชนิด
โทร.08
794273,0878408168

Bruno Wilhelm
PALÉOHYDROLOGUE, INSTITUT DES GÉOSCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT, GRENOBLE
Bruno Wilhelm est décédé subitement au mois d'avril 2022, après la réalisation de cet article. La rédaction adresse ses sincères condoléances à sa famille et à ses proches. Il était maître de conférences à l'université Grenoble-Alpes et étudiait les liens entre les changements climatiques et l'évolution des crues et inondations.

Décrypter les crues et leur évolution à partir d'archives naturelles

Au printemps 2022, des crues d'une ampleur inédite ont tué près de 400 personnes en Afrique du Sud et déclenché le déplacement de 200 000 personnes en Australie. En France, près d'un tiers de la population est exposé aux crues et aux inondations. Les prévoir est donc un enjeu majeur, qui repose sur une bonne connaissance des catastrophes antérieures remontant à des milliers d'années.

GIDEON MENDEL - DR

◀ *Quatre tempêtes consécutives ont causé des inondations meurtrières en Thaïlande, en 2011. Le photographe sud-africain Gideon Mendel a suivi des familles victimes de cette catastrophe naturelle, comme ici dans le quartier Thawi Watthana à Bangkok.*

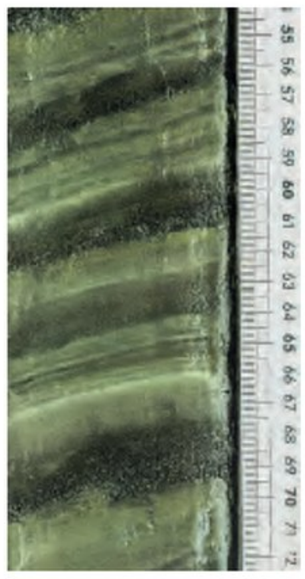
Les crues et les inondations associées provoquent régulièrement des catastrophes de grande ampleur. Ce risque naturel est aujourd'hui considéré comme le plus commun, celui affectant le plus de personnes dans le monde et occasionnant les dégâts matériels les plus coûteux. En France métropolitaine, près de dix-sept millions d'habitants sont exposés aux débordements des cours d'eau. Ces catastrophes naturelles, telles que celles survenues à Marseille en octobre 2021, dans les Pyrénées-Atlantiques et les Landes en décembre 2021, ou encore dans l'arrière-pays niçois associées à la tempête Alex en octobre 2020, coûtent près de 520 millions d'euros par an et sont à l'origine de nombreux décès. À la suite de ces événements, les mêmes questions surgissent : les ouvrages de protection étaient-ils suffisants ? Ces événements se sont-ils déjà produits ? Sont-ils plus fréquents ou plus intenses avec le changement climatique ?

Avant de construire des ouvrages de protection adaptés, comme les digues ou les bassins de rétention, les hydrologues évaluent la menace. Celle-ci est déterminée par le débit auquel on peut s'attendre dans la pire combinaison de conditions météorologiques et hydrologiques considérées comme raisonnablement caractéristiques de la région concernée, en écartant toutefois les combinaisons très improbables. Les ingénieurs parlent de débit de « crue de projet ». La « crue de projet » que l'on considère est fonction des enjeux à protéger. Pour une agglomération, il est fréquent d'estimer les crues décennales et centennales. Par exemple, pour l'agglomération parisienne, la grande crue de 1910, où la Seine avait dépassé de 8,62 mètres son niveau normal, fait figure de référence. Pour l'agglomération nîmoise, il s'agit de la crue du 3 octobre 1988 où, en quelques heures, quinze millions de mètres cubes d'eau se sont abattus sur la ville, transformant en torrents de boue les cadereaux, ces cours d'eau généralement à sec qui traversent la cité gardoise. L'estimation juste et précise de ces débits de crue de projet est toutefois rendue difficile par le manque de mesures. De nombreuses rivières ne sont pas équipées en instruments et, lorsqu'elles le sont, les mesures couvrent rarement des périodes suffisamment longues pour observer une crue centennale. De surcroît, cette notion de temps de retour ou de période de retour (*) – décennale, centennale, millénale – n'a de sens que dans un système stationnaire. Or, la couverture des sols change ainsi que le climat. S'il est possible de documenter les changements d'usage des sols (urbanisation, déforestation) et leurs effets (augmentation ou diminution de la magnitude d'une crue pour une même pluie), il est bien plus difficile d'évaluer les effets du changement climatique au vu de la faible profondeur temporelle des mesures disponibles.

LES TROIS DERNIÈRES DÉCENNIES, PÉRIODE DE HAUSSE DES INONDATIONS

La question des effets du changement climatique est d'autant plus prégnante pour la gestion du risque que, en théorie, tous les ingrédients sont réunis pour que davantage de crues extrêmes se produisent à l'échelle globale : d'une part, le réchauffement climatique devrait induire davantage d'évaporation ; d'autre part, l'atmosphère contiendrait plus d'humidité et disposerait donc de plus d'énergie pour la production de précipitations intenses. Une étude récente a ainsi montré que les trois dernières décennies ont été parmi les périodes les plus riches en inondations en Europe au cours des cinq cents dernières années (1). Toutefois, cette même étude a aussi révélé que, derrière cette augmentation globale des crues en Europe, il y avait à l'échelle régionale une grande variété de situations : il peut y avoir de fortes différences d'augmentation, voire de diminution des crues, en raison de la diversité des processus hydrométéorologiques à l'origine des débordements.

Avoir des informations globales et des moyennes ne suffit donc pas pour répondre précisément aux questions locales, à savoir : quelles dimensions donner à une digue pour préserver une ville ou un village donnés ? À quels effets du changement climatique s'attendre dans telle vallée ou sur tels contreforts de montagne ? Pour répondre correctement à ces questions cruciales, la dif-



▼ *Lac d'Allos (Alpes-de-Haute-Provence). L'équipe de l'IGE identifie des dépôts de crues dans l'accumulation sédimentaire de ce lac (photo de droite), grâce à un système de carrotage (photo de gauche).*

BRUNO WILHELM / INSTITUT DES GÉOSCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT, GRENOBLE

La surveillance des crues en France métropolitaine

Prévoir et anticiper les risques d'inondations en France est une mission complexe. Jusqu'à 11 % de la population est exposée au risque d'inondation par cours d'eau, selon le ministère de la Transition écologique. En métropole, douze départements possèdent 20 % ou plus de leur population habitant dans des zones où le risque d'inondation existe. C'est par exemple le cas du Var, des Alpes-de-Haute-Provence ou des Alpes-Maritimes. Pour anticiper les crises dans l'Hexagone, plus de 22 000 kilomètres de cours d'eau sont surveillés 365 jours par an et 24 heures sur 24.

▲ *Quotidiennement, le service Vigicrues publie une carte des cours d'eau indiquant les risques de crue.*

Les autorités estiment ainsi assurer une vigilance pour plus de 75 % de la population vivant en zone inondable. La vigilance des crues est calquée sur le principe de vigilance météorologique de Météo-France. Elle intègre tous les cours d'eau à risque, qui sont découpés en tronçons et surveillés par vingt-deux services de prévision des crues (SPC). Ces derniers rassemblent les mesures de terrain réalisées par plus de 3 000 stations. Un service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations, installé à Toulouse (Haute-Garonne) pour travailler avec Météo-France, assure quant à lui une veille sur les crues rapides. Son travail s'appuie notamment sur un réseau de trente et un radars hydrométéorologiques, dont les ondes électromagnétiques permettent de mesurer le cumul d'eau qui tombe au sol. Les données issues de ces services servent à établir une carte de vigilance qui apporte, en temps réel, une première information sur le niveau de risque et les comportements à adopter. Par ailleurs, le service d'avertissement sur les crues soudaines du ministère de la Transition écologique, Vigicrues Flash, couplé au service d'avertissement sur les pluies intenses de Météo-France, apporte une information sur les risques en tête de bassin. M. G.

POUR EN SAVOIR PLUS

■ www.vigicrues.gouv.fr

BRUNO BOURGEOIS. SOURCE : VIGICRUES

ficulté principale réside dans le manque d'observations à long terme. Un enjeu majeur est donc d'étendre les observations à des périodes de temps plus longues, bien au-delà des décennies, afin de mieux appréhender la fréquence et l'ampleur des crues extrêmes, et leur évolution avec le changement climatique.

Comment obtenir des informations sur des crues antédiluviennes ? Il existe autour de nous de nombreuses traces ou archives des crues passées ; leur étude permet de documenter leurs occurrences (dates et lieux), leur ampleur (extension des zones inondées) et leurs magnitudes (valeur de débit maximale atteinte) (2). Ces archives, telles que les articles de presse, la littérature scientifique, les mémoires, les rapports techniques, les comptes rendus de conseils municipaux, les photos, les peintures ou les gravures, sont étudiées par les historiens, les géographes et les géologues. De plus, leurs natures différentes leur confèrent des avantages et limites propres, qui rendent ces archives complémentaires.

Elles peuvent être riches d'informations (date exacte de la crue, extension de la zone inondée, hauteur d'eau atteinte, nature des impacts ou encore situation hydrométéorologique) et couvrir plusieurs siècles. C'est pourquoi elles sont utilisées par les institutions (par exemple dans les Plans de prévention des risques inondation) et les ingénieurs (pour dimensionner les ouvrages de protection). On sait ainsi que l'Orne, premier cours d'eau de Basse-Normandie, a débordé en avril 1315, un événement suivi d'une famine de deux ans dans la région.

Un travail approfondi est cependant nécessaire de la part des historiens pour extraire l'information du contexte social dans lequel elle a été produite afin de l'objectiver. En outre, ces archives peuvent être partiellement détruites, perdues ou endommagées, rendant incertaine la continuité dans le temps des chroniques de crues ainsi reconstituées. Si les archives historiques

(*) La période de retour est la moyenne du temps, ou le nombre d'années, séparant deux crues de grandeur égale. Une crue dont la période de retour est de dix ans est dite « décennale » et a une chance sur dix de se produire chaque année (sa probabilité de survenue est de 0,1).

permettent donc de renseigner la magnitude des crues passées pour mieux dimensionner les ouvrages de protection, leur usage est plus délicat pour discuter de l'évolution de la fréquence des crues en lien avec les changements du climat. Une grande partie des informations ainsi recueillies dans les archives ont été compilées et rendues accessibles au public grâce à des bases de données (voir sites en bas de page).
En complément de ces archives historiques, nous disposons des archives dites « naturelles ». Celles-ci regroupent l'ensemble des témoins de crues qu'il est possible de rencontrer dans la nature. Il s'agit, en premier lieu, des arbres situés le long des cours d'eau. Ceux-ci peuvent en effet être partiellement submergés par l'inondation, déstabilisés par l'érosion des berges ou encore directement marqués par les matériaux charriés. Ils subissent alors un stress qui s'inscrit dans le développement de leurs cernes. Un prélèvement léger par carottage, de l'extérieur vers le cœur des végétaux, permet d'identifier le premier cerne marqueur de ce stress et donc de dater la crue. En travaillant sur des arbres situés à des distances plus ou moins importantes du cours d'eau, on reconstitue ainsi l'extension de la crue et sa magnitude. Cette approche, appelée dendrogéomorphologie, offre la possibilité de reconstituer la fréquence et la magnitude des crues passées. Cette stratégie est cependant limitée dans le temps aux dernières décennies car elle s'appuie sur l'étude d'arbres vivants – la longévité moyenne d'un arbre étant de l'ordre de 100 ans environ.

L'étude des arbres situés le long des cours d'eau peut permettre de reconstituer la fréquence et la magnitude de crues passées

Les seconds témoins de crues que l'on rencontre dans la nature sont les sédiments qu'une rivière qui déborde de son lit dépose dans des zones habituellement non atteintes : bras morts, plaines inondables ou parties hautes de canyons ou de gorges. Lorsque les dépôts sédimentaires se font dans une plaine, il est possible de déterminer l'extension de la zone inondée à partir de l'envergure du dépôt. Dans un canyon, on reconstitue la magnitude de la crue à partir de l'altitude maximale des dépôts, qui signale la hauteur d'eau maximale atteinte. Toutefois, ces témoins sédimentaires ne donnent pas d'informations fiables sur la fréquence des crues, car des dépôts anciens peuvent être érodés par une crue plus récente et de magnitude supérieure.

LE RÔLE CLÉ DES STALAGMITES

Une déclinaison récente de cette approche se fonde sur l'étude de stalagmites dans les grottes. Lors des crues, le niveau d'eau monte dans ces cavernes naturelles, submergeant des stalagmites qui sont habituellement hors d'eau et les recouvrant ainsi de sédiments que les eaux en crue transportent. Après la crue, la stalagmite est à nouveau émergée et poursuit sa croissance par accumulation de calcite. Cette nouvelle couche de calcite scelle le dépôt de crue, qui y reste piégé. En prélevant des stalagmites, il est donc possible d'identifier et de dater des dépôts de crues passées qui sont parfaitement préservés. Si ces stalagmites sont prélevées à différentes altitudes au-dessus de la rivière, on remonte au niveau d'eau maximal atteint et donc à la magnitude de la crue. Ces archives permettent en outre de couvrir de longues plages temporelles – plusieurs millénaires voire centaines de millénaires –, et la calcite qui les constitue peut en théorie être datée avec une grande précision. Cette stratégie comporte néanmoins, là aussi, quelques limites. La première est que la calcite peut être « salie » par les sédiments de crue, rendant la méthode de datation inefficace. La seconde est qu'il est souvent difficile de savoir si la stalagmite est encore active (toujours en croissance), et donc si elle renseigne la période récente.
Après les arbres et les sédiments déposés par les cours d'eau, un troisième témoin intéresse beaucoup les paléohydrologues. Il s'agit encore de sédiments, mais d'un autre type : ceux qui sont laissés au fond des lacs. Cette approche connaît un essor important depuis les années 2000. Au cours d'une crue, l'augmentation du débit de la rivière entraîne une importante érosion de matériaux qui sont transportés par le

POUR EN SAVOIR PLUS

Base de données historiques sur les inondations :
■ **tinyurl.com/4tj5jw53**

Base de données de l'Observatoire régional des risques d'inondation en Alsace et dans le fossé rhénan :
■ **https://orrion.fr**

▲ *Au Pakistan, les inondations qui ont duré de juillet à décembre 2010 ont privé dix millions de personnes de leur logement.*

▲ *En 2008, dans la ville portuaire des Gonaïves en Haïti, l'eau est montée jusqu'à cinq mètres par endroits à la suite de pluies diluviennes.*

GIDEON MENDEL

cours d'eau. Si, plus à l'aval de ce cours d'eau se situe un lac, les matériaux y sont alors piégés et forment un dépôt caractéristique appelé « dépôt de crue ». À chaque crue, un nouveau dépôt se forme et sera parfaitement préservé dans la séquence sédimentaire. Le travail des sédimentologues consiste alors à prélever par carottage cette séquence puis à identifier, caractériser et dater les dépôts des crues afin de reconstituer une chronologie des crues passées. Le carottage, qui suit le même principe que pour les carottes de glace, peut être entrepris à l'aide d'un carottier gravitaire constitué d'un tube plastique fixé sur un poids, le tout accroché au bout d'une corde. Lâché d'une embarcation, le carottier se « plante » dans le sédiment. Il est ensuite possible d'utiliser le poids comme un marteau pour pénétrer plus en profondeur. Cet appareillage léger permet de prélever de quelques décimètres à quelques mètres de sédiments, et donc de couvrir des périodes de temps allant des derniers siècles aux derniers millénaires. Des carottiers plus élaborés, mais également plus lourds à mettre en œuvre, existent pour prélever jusqu'à vingt-cinq mètres de sédiments environ, nous donnant ainsi la possibilité de remonter le temps jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'années. L'identification des dépôts de crues dans l'accumulation sédimentaire des lacs repose sur des techniques modernes de géochimie (scanner de carottes haute résolution), qui mettent en évidence les enrichissements en matériel minéral caractéristiques des dépôts de crues. En complément, ces techniques s'appuient sur des méthodes de mesure de la taille des particules (granulométrie laser), car les dépôts de crues sont également caractérisés par des anomalies granulométriques. En effet, ils sont constitués de particules grossières dont la taille est a priori proportionnelle au débit maximal atteint pendant la crue. À partir de ces mesures, il est donc également possible de reconstituer la magnitude relative des crues passées. Cependant, dans certains cas, cette approche est inopérante : lorsque le matériel érodé est caractérisé par une granularité homogène, par exemple. Il est alors possible d'avoir recours à l'étude du volume de sédiment érodé et déposé pendant la crue, avec pour hypothèse que, plus le débit est important, plus le volume de sédiments le sera.

LA SEINE dépasse de 8,62 mètres son niveau normal, sur l'échelle hydrométrique du pont d'Austerlitz à Paris. La statue du Zouave, au pied du pont de l'Alma, a alors de l'eau jusqu'aux épaules.

▲ *D'importantes crues ont eu lieu en 2014 dans le sud-ouest de l'Angleterre, où il n'avait pas autant plu depuis 1766.*

▲ *À Rio Branco, au Brésil, ce couple et leurs trois enfants ont dû quitter leur maison après des inondations répétées sur cinq ans d'affilée.*

GIDEON MENDEL

Quelle que soit la technique choisie, il sera ensuite nécessaire de calibrer le signal pour transformer l'information granulométrique ou de volume en débit. Cela nécessite toutefois des séries longues de mesures de débit qui, comme nous l'avons évoqué précédemment, sont rares. Une fois que les occurrences et les intensités des crues passées ont été déterminées, plusieurs méthodes sont déployées pour dater ces dépôts, en cherchant par exemple à identifier des contaminations historiques (comme la catastrophe nucléaire de Tchernobyl en Ukraine, par exemple) dans les sédiments pouvant servir de marqueurs chronologiques. À l'échelle des derniers millénaires, la méthode classique de datation au carbone 14 est parfois combinée à celle, plus originale, utilisant les variations séculaires du champ magnétique terrestre. Le croisement de ces méthodes permet de réduire les incertitudes inhérentes à chacune d'elles pour obtenir une chronologie robuste.

Ces chronologies fondées sur des observations sur le long terme sont utiles pour l'aménagement des territoires. En effet, l'implantation de nouvelles activités vulnérables, comme un quartier résidentiel ou une centrale nucléaire, ne peut se faire dans une zone considérée à risque, à moins d'œuvrer à la réduction de ce risque par la construction d'ouvrages de protection. Par exemple, la centrale nucléaire de Fukushima (Japon) a été implantée, dans les années 1960, dans une zone littorale connue pour son risque de tsunami. Celui-ci avait été pris en compte par la construction d'un système de digues. La hauteur de ces digues avait été déterminée sur la base d'estimations probabilistes (risque sismique), de modèles numériques (estimations de la hauteur de vague, propagation jusqu'à la côte et zones inondées) et de l'ajout d'une marge de sécurité. Ce qui n'a toutefois pas suffi lors du tsunami de 2011 qui a détruit une partie de la centrale. Or, en 2001, une équipe de géologues japonais avait montré, grâce à l'étude de dépôts d'inondations, que les plaines de Sendai et Soma, situées à proximité immédiate de la centrale, avaient été immergées à plusieurs reprises au cours des derniers millénaires, et ce jusqu'à plus de quatre kilomètres à l'intérieur des terres (3). Cette équipe avait donc montré que des tsunamis bien plus importants qu'attendu par l'esti-

10 ANS

AVANT LA CATASTROPHE DE FUKUSHIMA
une étude des dépôts d'inondation a révélé que la zone avait déjà été immergée plusieurs fois au cours des trois millénaires précédents, par des tsunamis plus violents que ceux qui avaient servi à modéliser les risques.

mation du risque décrite ci-dessus – de magnitude similaire à celui de 2011 –, s'étaient produits dans la zone… Les autorités n'ont pourtant pas jugé bon de tenir compte de ces données, et la gestion du risque n'a donc pas été réévaluée.
À l'instar des informations sur les extensions d'inondations passées, les archives sédimentaires permettent de documenter les débits atteints par des crues de temps de retour donné. Ces informations peuvent être incrémentées dans une analyse fréquentielle (*), méthode clé pour l'estimation des débits de crue de projet et donc celle des dimensionnements d'ouvrages de protection. Ces méthodes reposent le plus souvent sur des extrapolations statistiques de données de débits, qui sont par définition empreintes d'incertitudes difficiles à évaluer. Pour pallier la faible profondeur temporelle des données de débits, les informations historiques sont parfois intégrées et confèrent une estimation plus robuste. Cependant, encore aujourd'hui, les informations issues d'archives naturelles ne sont pas intégrées dans les travaux d'analyse et d'estimation des risques, alors que leur plus-value a déjà été démontrée (4). À titre d'exemple, les débits des grandes crues du Rhône qui se sont produites au cours des 450 dernières années ont été reconstitués par le biais des volumes sédimentaires transportés puis déposés dans le lac du Bourget (Savoie) par ces événements. L'intégration de ces informations dans une analyse fréquentielle a montré que les débits des crues de temps de retour 100 et 1000 ans étaient de 12 et 21 % supérieures aux estimations qui s'appuient uniquement sur des mesures de débit, qui couvrent pourtant, dans le cas présent, la période particulièrement longue des 150 dernières années (5).

L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les données à long terme sur les crues passées ont également un autre intérêt. Comme elles couvrent de longues périodes climatiques, elles fournissent des informations sur l'impact du changement climatique sur les fréquences et la magnitude des crues. Dans cet objectif, les données issues de sédiments lacustres sont particulièrement intéressantes car elles sont les seules à garantir la continuité dans le temps de l'information. Cette approche a connu un essor remarquable dans les Alpes, où une trentaine de lacs ont été étudiés au cours de la dernière décennie. Ce travail de longue haleine a fourni autant de chroniques de crues couvrant les 200 à 10 000 dernières années. Pour l'ensemble de ces chroniques, la fréquence des crues a été analysée au cours de périodes chaudes et froides de l'ère industrielle (1800-2000), du dernier millénaire (850-1850) et d'une grande partie de l'Holocène (*), 1 000 à 9 000 ans avant le présent. Ces analyses ont révélé une diminution des crues décennales au cours des périodes chaudes passées sur l'ensemble des Alpes (6).
La même analyse réalisée pour les crues centennales donne un résultat plus contrasté avec, en fonction des sites, une augmentation ou une diminution de fréquence au cours des périodes chaudes passées. En conclusion, si le risque de crue semble globalement diminuer pendant les périodes chaudes dans les Alpes, celui-ci pourrait augmenter dans certains bassins-versants torrentiels avec des crues centennales plus fréquentes. Des hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ces tendances. À ce stade, il s'agit cependant d'hypothèses qui méritent une analyse approfondie. Celle-ci est envisagée à l'aide de modèles numériques qui permettent de simuler le climat passé et l'hydrologie associée. Si ces modèles parviennent à reconstituer les tendances observées, alors les processus hydrométéorologiques pourront être déterminés avec précision. Enfin, la continuité de ces tendances dans le futur est incertaine, parce que le réchauffement des décennies à venir devrait atteindre au moins + 2 °C, des valeurs bien supérieures à celles des réchauffements observés dans le passé (+ 0,5 -1,2 °C). Or il est probable que ce taux de réchauffement provoque des effets de seuil, et ainsi des processus générateurs de crues non observés dans le passé. L'effet de ce réchauffement pourrait être testé avec les modèles numériques, ce qui constitue une autre perspective de travail de recherche pour une meilleure connaissance et gestion du risque de crue. Quoi qu'il en soit, ces travaux ne pourront se faire sans intégrer les informations issues des multiples archives sédimentaires. Remonter l'histoire des cours d'eau nous renseigne mieux sur les risques présents et futurs. ■

(*) Les méthodes d'analyse fréquentielle des crues ont pour objectif de déterminer les probabilités d'occurrence d'un événement spécifique et par conséquent les périodes de retour ou les fréquences d'apparition d'un ensemble d'événements.

(*) L'Holocène est la période géologique actuelle et qui a débuté il y a environ 12 000 ans. Elle correspond à une période tempérée, dite interglaciaire, et qui suit la dernière grande glaciation.

(1) G. Blöschl *et al.*, *Nature, 583,* 560, 2020.

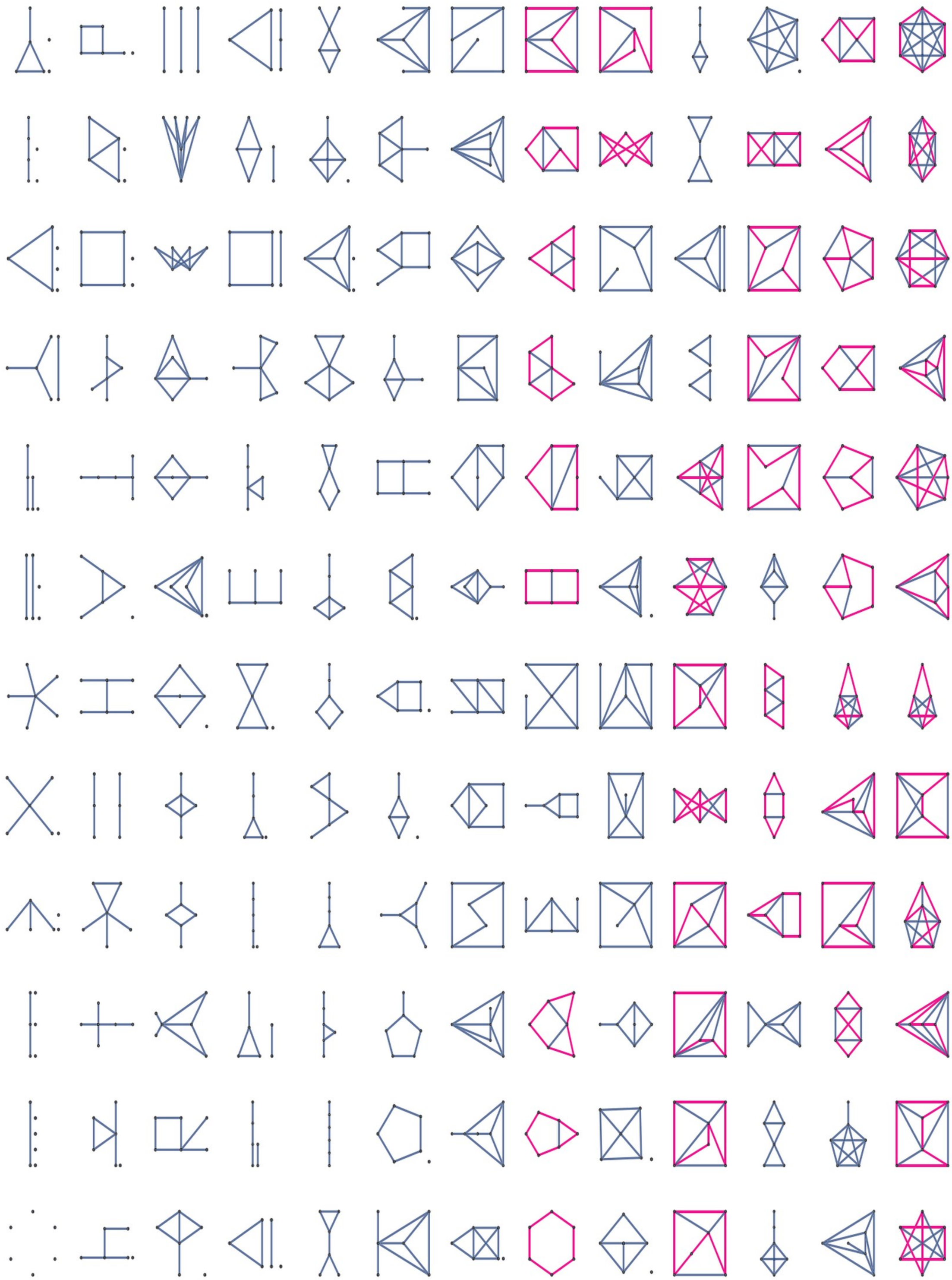
(2) B. Wilhelm *et al.*, *WIRES Water, 1,* e1318, 2019.

(3) K. Minouri *et al.*, *J. Nat. Disaster Sci., 2,* 83, 2001.

(4) S. St. George *et al.*, *Nat. Geosci., 13,* 766, 2020.

(5) G. Evin *et al.*, *Global Planet. Change, 172,* 114, 2019.

(6) B. Wilhelm *et al.*, *Nat. Geosci., 15,* 118, 2022.



Nicolas Curien
MATHÉMATICIEN, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY
Professeur à l'université de Paris-Saclay, il est spécialiste des probabilités et de géométrie aléatoire.

Transitions de phase dans les graphes aléatoires : une preuve inespérée

Les changements d'état de la matière sont régis par des règles thermodynamiques. En mathématiques, elles sont expliquées par les phénomènes de «seuil» où, dans de grands systèmes désordonnés – les graphes aléatoires –, des propriétés déterministes émergent brusquement lors d'une petite variation des paramètres. Une conjecture proposée en 2006, portant sur le calcul du point d'apparition de telles transitions, vient d'être prouvée en mars dernier par une mathématicienne coréenne et un doctorant vietnamien. Leur preuve, courte et astucieuse, ne comporte que des notions de niveau licence. Rafraîchissant, à une époque d'inflation des démonstrations.

INFOGRAPHIES : NICOLAS CURIEN/UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY - DR

◀ *Représentation des 156 formes de graphes à six sommets. En rouge, quand c'est possible, on a représenté un chemin hamiltonien qui relie tous les sommets.*

Les avancées en mathématiques ne sont pas toujours le fruit du travail acharné d'un génie solitaire qui, après dix ans de travail, convainc ses pairs d'un résultat marquant en échafaudant une théorie complexe, profonde… mais souvent hermétique aux non-spécialistes – on peut penser à la conjecture de Fermat démontrée par le mathématicien britannique Andrew Wiles en 1994 (*). Parfois, un théorème est démontré (ou redémontré) de manière inattendue, à l'aide d'une astuce limpide à laquelle personne n'avait pensé, et qui peut être accessible à un grand nombre de personnes. Le célèbre mathématicien hongrois Paul Erdös (1913-1996) parlait du *Livre*, *The Book*, dans lequel « Dieu » consignerait les preuves les plus élégantes et intelligibles de chaque théorème mathématique : *«Vous pouvez ne pas croire en Dieu,* lança-t-il lors d'une conférence en 1985, *mais vous devriez croire en l'existence du* Livre.» Nul doute que Jinyoung Park et Huy Tuan Pham,

tous deux à l'université Stanford (États-Unis), ont découvert l'une de ces preuves récemment : dans un article mis en ligne le 31 mars 2022 sur la plateforme de prépublication Arxiv, la jeune mathématicienne coréenne et son collègue vietnamien, encore en thèse, ont résolu une conjecture proposée en 2006 par l'Américain Jeff Kahn et l'Israélien Gil Kalai. Cet énoncé portait sur l'estimation du moment où les transitions de phases apparaissent dans les graphes aléatoires. D'abord surprise, la communauté mathématique fut immédiatement convaincue par ce résultat qui figure déjà dans les livres de référence du domaine.

Revenons sur l'objet d'étude : les graphes. C'est l'un des concepts mathématiques les plus simples que l'on puisse imaginer : des points (les sommets) reliés par des lignes (les arêtes). Si le graphe possède n sommets, il y a donc $n(n-1)/2$ arêtes possibles (paires de points différentes). Le nombre de « formes » de graphes avec n sommets grossit très vite : avec six sommets on a déjà 156 possibilités (voir l'image d'ouverture), avec sept sommets il y a 1 044 graphes différents et, avec dix sommets, on dépasse les douze millions de graphes possibles…

Il est d'usage de faire remonter la théorie des graphes à 1736, lorsque le mathématicien allemand Leonhard Euler (1707-1783) proposa le problème des « sept ponts de Königsberg » : dans cette ville – aujourd'hui Kaliningrad, en Russie –, existe-t-il une promenade qui permette de parcourir tous les ponts une seule fois ? En représentant la ville sous la forme d'un graphe, Euler parvint à démontrer qu'un tel chemin n'existe pas, signant ainsi l'acte de naissance de la théorie des graphes.

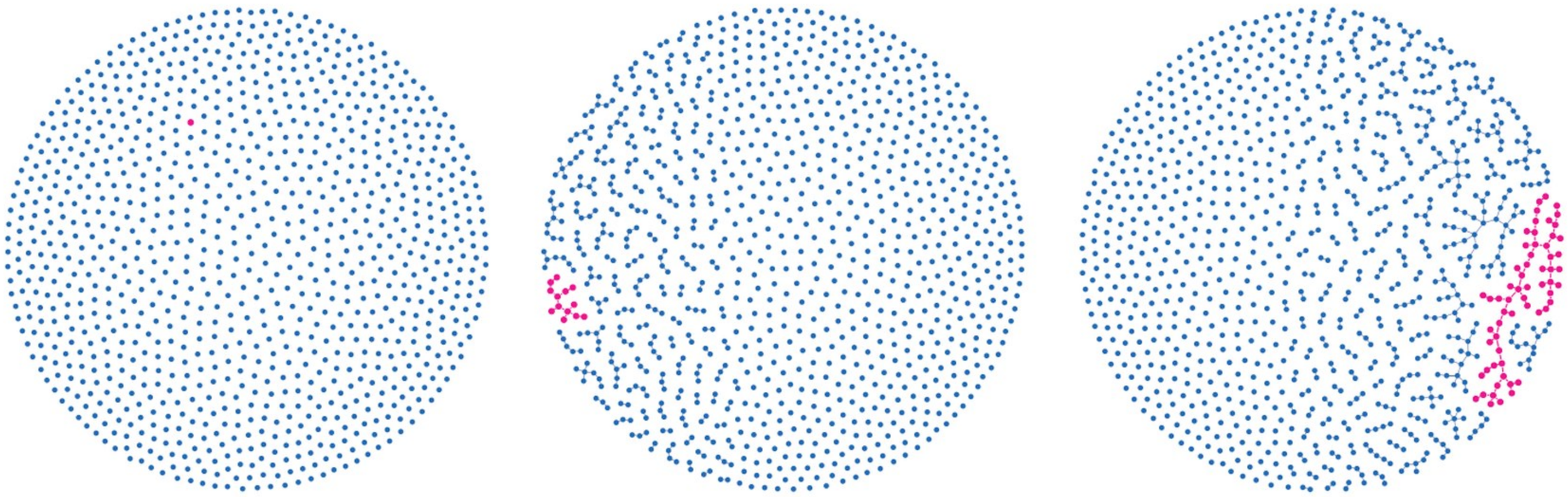
Aujourd'hui, la théorie des graphes est un vaste champ des mathématiques qui offre de multiples applications en physique ou en informatique (la structure des graphes est particulièrement bien adaptée à l'organisation des données). Cette théorie est aussi au cœur des techniques d'apprentissage statistique *(deep learning),* qui sont en train de changer notre quotidien. De nombreux réseaux complexes tels que les réseaux sociaux, les réseaux d'interactions en biologie ou le web sont modélisés par des graphes aléatoires.

L'EAU LIQUIDE DEVIENT BRUSQUEMENT VAPEUR AU-DELÀ DE 100 °C

Mais qu'est-ce qu'un graphe aléatoire ? En 1959, les mathématiciens hongrois Paul Erdös – celui du *Livre* – (1913-1996) et Alfred Rényi (1921-1970) ont proposé le modèle le plus simple et naturel de graphe aléatoire : à partir de n sommets distincts, ajoutez des arêtes une par une, uniformément au hasard, entre ces sommets. D'abord une, puis deux, puis trois, et ainsi de suite de façon aléatoire, jusqu'à ce que toutes les arêtes soient tracées (c'est-à-dire quand tous les sommets sont reliés à tous les autres). On

LA PERCOLATION EN IMAGE

Simulation du modèle de graphe aléatoire d'Erdös-Rényi avec 1000 sommets. Le nombre d'arêtes reliant les sommets entre eux augmente jusqu'au point critique (en gros, 500 arêtes) où apparaît brusquement une composante géante (au quatrième dessin). Ce phénomène est appelé percolation.



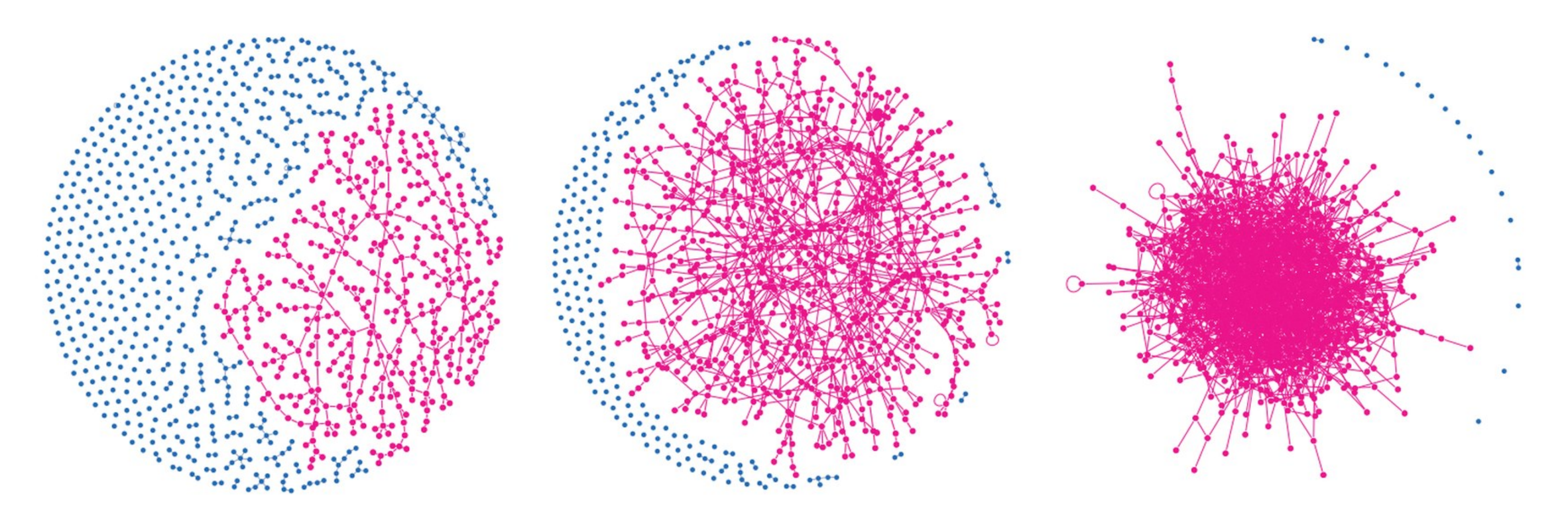
notera dans la suite $G(n,m)$ le graphe aléatoire obtenu lorsque m arêtes ont été ajoutées.
La problématique à laquelle nous allons nous intéresser maintenant est celle des transitions de phase : quand la variation minime d'un paramètre change complètement les propriétés du système. Pour prendre un exemple physique bien connu, l'eau liquide devient subitement solide au-dessous de 0 °C. C'est encore une transition de phase qui se produit au-delà de 100 °C, lorsque l'eau liquide devient vapeur. La transition de phase se définit ainsi comme un changement brusque d'une observable suite à la modification minime d'un paramètre.
Rappelez-vous que $G(n,m)$ est un graphe aléatoire à n sommets où m arêtes ont été ajoutées au hasard. Il faut imaginer le nombre de sommets n très grand mais fixé, alors que m est un paramètre variable, analogue de la température (ou plutôt l'inverse de la température), qui peut prendre toutes les valeurs entre 0 et $n(n\text{-}1)/2$. La question qui se pose alors est de savoir quand apparaissent certaines structures dans le graphe aléatoire à mesure que m croît. Par structure, on entend l'existence à l'intérieur de $G(n,m)$ de certains sous-graphes comme des triangles (trois sommets reliés les uns aux autres par trois arêtes), un chemin hamiltonien (*) ou encore une composante connexe ou amas (en anglais *cluster* – mot rendu hélas populaire par la pandémie) de grosse taille. Bien entendu, la présence d'une structure

Il suffit de quelques arêtes supplémentaires pour qu'une composante géante apparaisse avec une très grande probablité

donnée dans $G(n,m)$ est une variable aléatoire, c'est-à-dire que, pour certaines réalisations du graphe, la réponse sera oui et, pour d'autres, la réponse sera non. Mais lorsque les nombres n et m sont grands, la réponse devient « quasi déterministe », c'est-à-dire toujours la même avec une grande probabilité.
Expliquons cela en prenant l'exemple de l'existence d'une composante de grosse taille, appelée « percolation ». Dès 1959, Erdös et Rényi montrent l'existence d'une transition abrupte lorsque m atteint $n/2$ par l'apparition d'une composante géante (1). Autrement dit, si le nombre d'arêtes est juste en dessous de ce seuil (par exemple 0,49 n), on n'aura pas de composante géante avec une très grande probabilité. Mais il suffit d'ajouter quelques arêtes et d'arriver, par exemple, à 0,51 n pour qu'une composante géante apparaisse avec une très grande probabilité. La propriété « avoir une grosse composante », bien que *stricto sensu* aléatoire, devient déterministe quand n est grand et, de plus, la réponse passe brusquement de « non »

(*) **Andrew Wiles** a travaillé seul pendant près de dix ans avant de produire en 1994 une preuve très longue et complexe, s'appuyant sur les avancées de ses prédécesseurs, de la conjecture proposée par Pierre de Fermat plus de quatre siècles auparavant.
Cette conjecture, maintenant théorème, dit qu'il n'existe pas de solution à l'équation $x^n + y^n = z^n$ pour $n > 2$ et x,y,z des entiers strictement positifs.

(*) **Un chemin hamiltonien** est un cycle d'arêtes qui passent par chaque sommet d'un graphe.



Lorsque la conjecture dite du "seuil en espérance" a été rendue publique, peu de gens y croyaient : trop naïf, trop beau pour être vrai

quand $m \leq 0{,}49n$ à « oui » quand $m \geq 0{,}51n$. Et ceci alors même que le nombre d'arêtes n'a varié que de seulement 4 % ((0,51-0,49)/0,49) ! C'est donc bien une transition de phase, au sens où une infime variation d'un paramètre – ici le nombre d'arêtes dans le graphe – a des conséquences globales impressionnantes.

L'exemple de la percolation présenté ci-dessus est en fait général : en 1987, le Hongrois Béla Bollobás et le Britannique Andrew Thomason montrent que, quelle que soit la propriété recherchée $\mathcal{P}$ (apparition d'un triangle, présence d'un chemin hamiltonien ou de tout autre sous-graphe), il y a toujours une transition de phase à partir d'un certain niveau de m – le nombre critique d'arêtes –, mais possiblement moins abrupte que dans le cas de la percolation (2).

Nous laissons le soin au lecteur d'imaginer le cas d'une transition de phase où le paramètre variable serait la température terrestre et la propriété cible serait l'habitabilité de notre planète… Si une transition de phase abrupte a lieu à la température de 15 °C (grosso modo la température moyenne de la Terre ces dernières années), alors une infime variation de celle-ci pourrait avoir des effets catastrophiques…

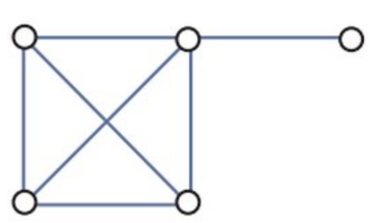
Dans notre modélisation mathématique, étant donné notre propriété $\mathcal{P}$, peut-on calculer le nombre « critique » d'arêtes $m = m_{\mathcal{P}}(n)$ autour duquel notre propriété devient très sensible ? Dans le travail dont nous venons de parler, Bollobás et Thomason montrent que l'on peut prendre $m_{\mathcal{P}}(n)$, tel que la probabilité d'apparition de la propriété $\mathcal{P}$ en mettant $m = m_{\mathcal{P}}(n)$ soit égale à 1/2 (peu ou prou).

À ce stade, on pourrait se dire que c'est gagné, puisqu'ainsi il paraît théoriquement possible de trouver $m_{\mathcal{P}}(n)$ via cette équation qui fait intervenir la probabilité. Hélas, en pratique, ces probabilités sont très difficiles à calculer… En effet, l'ensemble des graphes possédant la propriété $\mathcal{P}$ s'écrit généralement comme l'union de nombreux ensembles ($A_1 \cup A_2 \cup \ldots \cup A_k$). Prenons le cas où la propriété $\mathcal{P}$ est celle d'avoir un triangle, et imaginons que les sommets de $G(n,m)$ sont numérotés $1,2,\ldots,n$. Alors $G(n,m)$ a un triangle si et seulement si les sommets 1,2,3 forment un triangle dans $G(n,m)$, ou bien les sommets 1,2,4 forment un triangle… et ainsi de suite pour tous les triplets i,j,k de sommets. Même dans le cas d'une union de trois ensembles, calculer la probabilité de $A_1 \cup A_2 \cup A_3$ n'est pas si simple, car il faut calculer la probabilité de A_1, ajouter celle de A_2, celle de A_3, enlever celle de $A_1 \cap A_2$ (car on l'a comptée deux fois), idem pour $A_1 \cap A_3$ et $A_2 \cap A_3$, mais aussi ajouter celle de $A_1 \cap A_2 \cap A_3$ que l'on a trop soustraite (voir figure p. 111). La formule générale, dite du crible, est compliquée, et son application est quelquefois humainement impossible. En revanche, il est facile de voir que la probabilité de $A_1 \cup A_2 \cup \ldots \cup A_k$ est toujours plus petite que la somme des probabilités $\mathbf{P}(A_1) + \ldots + \mathbf{P}(A_k)$. Cette inégalité permet de donner une borne inférieure pour $m_{\mathcal{P}}(n)$: on cherche $M_{\mathcal{P}}(n)$ pour que la somme dans le membre de droite soit environ 1/2, et on aura alors $m_{\mathcal{P}}(n) \geq M_{\mathcal{P}}(n)$.

La borne ci-dessus est parfois appelée la « méthode du premier moment » ou « méthode de l'espérance ». Réexpliquons-la dans le cas de l'apparition d'un triangle dans $G(n,m)$: au lieu de trouver $m = m_{\mathcal{P}}(n)$ tel que la probabilité que $G(n,m)$ possède un triangle soit égale à 1/2, on trouve $m = m_{\mathcal{P}}(n)$ tel que la moyenne (en mathématiques on parle d'espérance) du nombre de triangles dans $G(n,m)$ soit égale à 1/2.

Dans le cas de l'apparition des triangles, la méthode de l'espérance donne le bon résultat et $m_{\mathcal{P}}(n)$ est du même ordre de grandeur que $M_{\mathcal{P}}(n)$. Malheureusement, l'espérance est parfois trompeuse. Le cas du Loto est à cet égard frappant : la probabilité de gagner est extrêmement faible alors que l'espérance du gain est autour de 1 euro… pour une mise de 2 euros (la Française des jeux reste une entreprise à but lucratif…). Quand on gagne, on gagne donc beaucoup, mais cela arrive très rarement…

Dans notre cas, il se pourrait donc que $M_{\mathcal{P}}(n)$ (calculé avec l'espérance) soit un piètre indicateur de $m_{\mathcal{P}}(n)$ (calculé avec les probabilités), c'est-à-dire qu'il soit beaucoup plus faible.



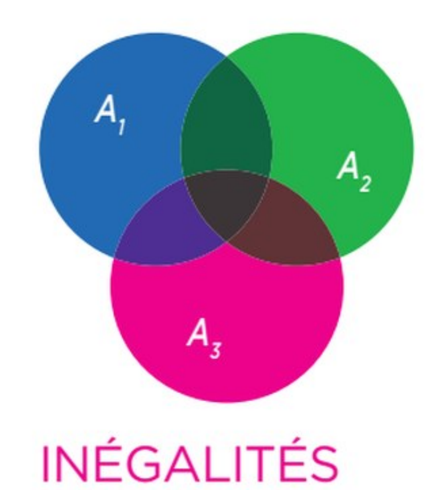
LE « GRAPHE DE LA CASSEROLE »

On montre que dans un graphe aléatoire, dès qu'apparaît le « cœur » de la casserole (le carré et la croix), on obtient beaucoup de casseroles ayant le même cœur, mais des manches différents.

C'est d'ailleurs ce qui se passe avec l'apparition de certaines structures dans le graphe aléatoire, notamment la « casserole ». Ce graphe est constitué de quatre sommets entièrement reliés (le cœur de la casserole), connectés à un cinquième sommet (le manche). Dans un graphe aléatoire, on peut démontrer qu'au cours de sa construction, dès que le cœur de la casserole apparaît, on obtient en fait beaucoup de casseroles avec le même cœur mais des manches différents (c'est comme gagner au loto, quand on gagne, on gagne beaucoup !). Et, du coup, le $M_{\mathcal{P}}(n)$ pour la propriété « apparition de la casserole » est très petit par rapport au véritable $m_{\mathcal{P}}(n)$.
Pourtant, en 2006, Jeff Kahn et Gil Kalai ont proposé une conjecture audacieuse permettant de calculer le seuil de manière assez simple (3). Selon leur hypothèse, le seul écueil est le cas identifié dans la casserole : il faut appliquer la méthode de l'espérance à toutes les « sous-structures » $\mathcal{P}'$ (tous les sous-graphes) de $\mathcal{P}$ et prendre le maximum des $M_{\mathcal{P}'}(n)$ obtenus. Dans le cas de la casserole, ce maximum est donné par l'apparition du cœur de la casserole. Selon leur conjecture, le seuil ainsi calculé est proche de $m_{\mathcal{P}}(n)$ (à un facteur logarithmique près).

RECOUVREMENTS PARCIMONIEUX

Voici une autre manière de présenter la conjecture à l'aide de « recouvrements », dans l'esprit de la preuve qui vient d'être publiée par Jinyoung Park et Huy Tuan Pham. Il faut d'abord se rappeler qu'en général, l'ensemble des graphes qui satisfont la propriété $\mathcal{P}$ s'écrit naturellement comme une union d'ensembles $A_1 \cup A_2 \cup \ldots \cup A_k$ et que la méthode de l'espérance est fondée sur l'inégalité entre la probabilité de l'union et la somme des probabilités, qui, en général, est assez grossière. La conjecture de Kahn et Kalai dit qu'on peut en fait faire un autre recouvrement par des ensembles croissants de graphes $B_1 \cup \ldots \cup B_l$ pour lesquels cette inégalité n'est pas si mauvaise. Ce nouveau recouvrement est dit « parcimonieux », au sens où les ensembles qui le composent ne s'intersectent pas trop.
Lorsque cette conjecture (dite du « seuil en espérance », *expectation threshold* en anglais) a été rendue publique, peu de gens y croyaient : cela paraissait trop naïf, trop beau pour être vrai. Ne pourrait-il pas exister des cas beaucoup plus compliqués où le simple calcul de l'espérance ne donnerait pas du tout le bon seuil ? Les auteurs de la conjecture eux-mêmes la qualifiaient d'« osée » et pensaient qu'elle pourrait être fausse. Mais la recherche d'un contre-exemple, en vain, a conforté leur idée.
La conjecture a résisté… Mais les premières fissures apparurent en 2019, lorsqu'une version affaiblie de celle-ci fut prouvée. Puis, le 31 mars dernier fut publié sur le site Arxiv un article de Jinyoung Park et Huy Tuan Pham prouvant en toute généralité la conjecture de Kahn et Kalai (4). Le papier est très court (six pages), la preuve à proprement parler n'en occupe que deux et n'utilise aucune sorte de mathématiques difficiles – uniquement de la combinatoire élémentaire. C'est remarquable. Cela a permis à beaucoup de personnes de vérifier sa justesse – un étudiant en licence de mathématiques serait tout à fait capable de suivre la démonstration ligne à ligne. Reste qu'elle est très astucieuse et fait elle-même appel à l'aléatoire pour produire des recouvrements parcimonieux $B_1 \cup \ldots \cup B_l$ comme décrits ci-dessus.
Le parcours des deux auteurs de la preuve mérite d'être évoqué. Huy Tuan Pham, un brillant étudiant vietnamien venu aux États-Unis pour suivre des études de mathématiques, est actuellement en thèse à l'université Stanford sous la direction de Jacob Fox. Quant à Jinyoung Park, elle raconte dans une vidéo de l'Institute for Advanced Study, à Princeton (États-Unis), qu'elle n'était pas spécialement douée en maths au collège et qu'elle a décidé de changer sa façon d'étudier en lisant des livres (5). Après une licence de professorat de maths, elle enseigne cette matière durant sept ans dans un collège à Séoul, avant de suivre son époux qui venait d'obtenir un travail aux États-Unis. C'est là qu'elle décide de reprendre des études de maths et soutient une thèse sous la direction de Jeff Kahn (l'un des auteurs de la conjecture de 2006) à l'université Rutgers en 2020. Elle est actuellement en poste à l'université Stanford. Elle raconte qu'en thèse, elle se trouvait trop lente par rapport à d'autres, ce à quoi Jeff Kahn aurait répondu : *« C'est bien d'être rapide, mais c'est plus important d'être profond »*. Et élégant, ajouterai-je ! ■



INÉGALITÉS D'AIRES

Calculer exactement l'aire de l'intersection des trois ensembles (A1 ∩ A2 ∩ A3) est délicat, car il faut prendre en compte les parties comptées plusieurs fois. En revanche, cette aire est toujours plus petite que la somme des aires de chaque ensemble. C'est le même raisonnement avec les probabilités.

(1) P. Erdös et A. Rényi, *Zastos. Mat., 10*, 47, 1969.

(2) B. Bollobas et A. G. Thomason, *Combinatoria, 77*, 35, 1987.

(3) J. Kahn et G. Kalai, doi : 10.48550/arXiv.math/0603218, 2006.

(4) J. Park et H. T. Pham, doi : 10.48550/arXiv.math/.2203.17207, 2022.

(5) www.youtube.com/watch?v=7H2YvxefFro

Entretien avec **Guilaine Lagache**

ASTRONOME AU LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE DE MARSEILLE

“L'AUBE DE L'UNIVERS SE DÉVOILE EN INFRAROUGE”

Quelle est l'histoire de la formation des premières structures de l'Univers ? Pour percer ce mystère, Guilaine Lagache s'est spécialisée dans l'observation des domaines infrarouge, submillimétrique et millimétrique car les longueurs d'onde de ces émissions soumises à l'expansion cosmique sont aujourd'hui principalement dans cette gamme. Problème : la lumière correspondante est en grande partie arrêtée par l'atmosphère terrestre. Toujours à la recherche de technologies innovantes, elle vient d'installer un détecteur – une caméra comprenant des milliers de résonateurs supraconducteurs – sur un radiotélescope du Chili. L'objectif : comprendre cette période particulière de l'histoire cosmique que l'on appelle la réionisation.

YOHANNE LAMOULÈRE/TENDANCE FLOUE

La Recherche **Vous êtes spécialiste de cosmologie observationnelle. Est-ce à dire que vous cherchez à observer l'histoire de l'Univers plutôt que de faire des théories ?**

Guilaine Lagache Les deux sont liés : il ne peut y avoir de théories et de modèles sans observations pour les vérifier et, en retour, les théories prédisent des choses que l'on peut observer. Données et théorie sont donc indissociables. Mais il est vrai que je suis ce qu'on peut appeler une « observatrice », autrement dit je me consacre depuis longtemps à recueillir des données sur les débuts de l'Univers. Mon objectif est de comprendre comment il fonctionne et d'établir une histoire cosmologique.

Vos premiers travaux portent sur le fond diffus infrarouge. Pouvez-vous nous dire ce dont il s'agit ?

La lumière de l'Univers – les photons qui circulent dans le cosmos – peut résulter d'émis-

sions d'objets bien identifiés – étoiles, nuages de gaz ou de poussières, galaxies –, mais il peut aussi exister une composante diffuse qui émane d'un ensemble de sources. Autrement dit, parfois, on est capable de distinguer seulement les sources les plus brillantes, toutes les autres sources se fondant en un rayonnement diffus. Et l'analyse de ce rayonnement diffus nous apprend des choses différentes du rayonnement des astres individuels. Dans le domaine des longueurs d'onde infrarouge, on suspectait depuis 1967 l'existence d'un tel rayonnement issu d'une myriade de galaxies particulières, dites infrarouges. Il a été observé pour la première fois en 1996, à l'aide des données du satellite COBE (Cosmic Background Explorer), par l'équipe dans laquelle je venais de commencer ma thèse (1). Du coup, j'ai rebondi sur ce sujet en faisant des mesures plus précises de ce fond.

Pouvez-vous détailler ce que nous apprend ce rayonnement et en quoi il est important ?

Ce que nous essayons de faire, c'est reconstruire l'histoire de la formation des premières galaxies dans l'Univers, savoir quand elles se sont formées. Pour connaître cette période de la prime jeunesse de l'Univers, il nous faut observer des galaxies très lointaines, car plus on regarde loin dans l'espace, plus on regarde loin dans le temps. En analysant ces galaxies très lointaines, on explore par conséquent les premiers âges de l'Univers. Ce regard vers le passé est rendu possible par le fait que la lumière a une vitesse finie (environ 300 000 kilomètres/seconde), de sorte qu'elle met un certain temps à nous arriver. L'une des composantes directement observables, c'est la lumière des galaxies jeunes émise dans l'ultraviolet. C'est ce que fait le télescope spatial Hubble en cherchant des galaxies très lointaines. En observant l'intensité du flux lumineux ultraviolet émanant des étoiles, on mesure donc directement un taux de formation d'étoiles dans ces galaxies. Malheureusement, beaucoup de ces galaxies dans l'Univers jeune sont pleines de poussières et, dès lors, la lumière ultraviolette de leurs étoiles est absorbée par cette poussière et réémise dans l'infrarouge, à une longueur d'onde comprise entre 3 micromètres et 3 millimètres. En réalité, 95 % de l'énergie de ces galaxies est émise ainsi dans l'infrarouge lointain. Le flux infrarouge de toutes ces galaxies – qu'on ne peut pas individualiser – nous renseigne sur leur évolution dans l'histoire de l'Univers. Les observations en ultraviolet et dans l'infrarouge sont complémentaires.

Quels ont été les résultats ?

Après la découverte de ce fond en 1996, nous avons pu préciser les choses grâce à des instruments spatiaux observant spécifiquement dans ce domaine, tels que l'européen ISO (Infrared Space Observatory) qui a fonctionné entre 1995 et 1998, ou l'américain Spitzer (2003-2009). Étonnamment, nous avons trouvé que le maximum d'énergie de ce fond était émis autour d'une longueur d'onde de 0,2 mm – dans l'infrarouge lointain –, contrairement aux galaxies de l'Univers autour de nous (local), dont l'essentiel de l'énergie rayonne dans le domaine visible. Par ailleurs, l'excès d'émission dans l'infrarouge traduit une formation stellaire aux époques reculées de l'Univers (2) accrue d'un facteur sept par rapport à ce que nous estimions auparavant. Celui-ci est donc passé par une phase très active de formation d'étoiles dans des galaxies infrarouges, obscurcies par la poussière. Ces galaxies lumineuses en infrarouge sont peu nombreuses – dix fois moins que celles que nous voyons dans le domaine visible –, mais ont beaucoup de gaz et forment des étoiles à un rythme vertigineux. Reste qu'à l'époque, il y a une vingtaine d'années, nous n'étions pas en mesure d'identifier les populations de galaxies responsables de cet excès.

Vous vous êtes ensuite tournée vers le fond diffus cosmologique, avec Archeops et Planck ?

Ce sont deux projets consacrés au fond diffus cosmologique, cette lumière baignant tout l'Univers, émise 380 000 ans après le Big Bang (qui, lui, s'est produit il y a 13,8 milliards d'années). Il s'agit du moment clé de la « recombinaison », lorsque les protons et les électrons se sont réassemblés – l'Univers en expansion étant devenu suffisamment froid – pour former les premiers atomes d'hydrogène neutre. Archeops était un instrument embarqué sur un ballon qui a volé en Sicile (Italie) et en Suède entre 1999 et 2002, afin de préparer la mission européenne Planck. Le satellite Planck a été un projet incroyable, doublé d'une aventure

BIO

- **1972** Naissance à Amiens
- **1998** Thèse à l'Institut d'astrophysique spatiale (IAS), à Orsay
- **2000** Poste d'astronome à l'IAS
- **2014** Mutation au Laboratoire d'astrophysique de Marseille
- **2021** Médaille d'argent du CNRS

“Les fluctuations du fond infrarouge retracent la formation des étoiles dans les galaxies et leur connexion aux grandes structures de l’Univers”

humaine extraordinaire. Sa prise de données n’a duré que le temps de son vol, soit trente mois entre 2009 et 2012, mais la mission s’est étalée sur une période bien plus longue : elle a démarré en 1996 et le dernier catalogue de données réduites a été mis à disposition de la communauté – tout un chacun peut utiliser ces données scientifiques – en 2018. Les données précises sur le fond diffus cosmologique obtenues à l’aide de Planck ont marqué la cosmologie, car elles ont conforté le modèle du Big Bang, ce qu’on appelle le modèle standard de la cosmologie. Par ailleurs, le satellite Planck était aussi capable de détecter les fluctuations du fond diffus infrarouge, et c’est ce sur quoi je me suis principalement concentrée.

Qu’est-ce qu’a observé Planck plus précisément ?

Contrairement à ce que nous croyons parfois, le satellite Planck n’a pas observé les valeurs absolues des fonds diffus – cosmologique ou infrarouge. Le dernier à avoir observé le fameux rayonnement cosmologique à 3 kelvins, c’est l’instrument FIRAS, sur COBE, en 1996 (plus précisément, il a trouvé un rayonnement à la température de 2,726 kelvins). Les instruments très précis de Planck, eux, étaient conçus pour observer des fluctuations de ces fonds diffus, c’est-à-dire des petites variations autour de la valeur absolue. En d’autres termes, Planck a fourni une carte des variations de ces fonds. Pour le fond diffus cosmologique, les fluctuations représentent des variations de densité à l’époque de la recombinaison ; ce sont en quelque sorte les germes qui, amplifiés par l’action de la gravitation, ont donné naissance aux grandes structures du cosmos.

Et que nous apprennent les fluctuations du fond infrarouge ?

Elles retracent la formation des étoiles dans les galaxies et leur connexion aux grandes structures de l’Univers. Grâce à la couverture spectrale étendue de Planck, nous avons pu mesurer ces fluctuations (ou anisotropies) avec une extrême précision, à des longueurs d’onde comprises entre 0,35 et 2 millimètres. Ces anisotropies détectées dans le fond diffus infrarouge retracent la distribution à grande échelle des galaxies actives – en train de former des étoiles – et, dans une certaine mesure, la distribution sous-jacente des halos de matière noire dans lesquels les galaxies sont hébergées. Ces données nous permettent ainsi d’étudier comment les processus de formation d’étoiles qui ont lieu dans les galaxies sont liés à la matière noire, une matière dont on infère la présence par ses propriétés gravitationnelles – mais que l’on n’a jamais détectée directement – et qui constitue l’échafaudage où les galaxies se forment et évoluent (3). Finalement, ce que l’on veut, c’est retracer cette histoire passée de l’Univers et, en particulier, mieux comprendre une période particulière que l’on appelle la réionisation.

Pouvez-vous nous retracer dans les grandes lignes cette histoire telle qu’on la comprend aujourd’hui ?

Dans le modèle standard de la cosmologie, tout commence par le Big Bang, cette période dense et chaude qu’a connue l’Univers il y a 13,8 milliards d’années. Dans les tout premiers instants, et pendant un laps de temps extrêmement bref, on imagine qu’il s’est produit une expansion exponentiellement rapide de l’Univers, baptisée inflation. Puis les premiers

éléments se sont formés, typiquement dans les premières minutes après le Big Bang. Ces éléments sont essentiellement de l'hydrogène (75 %) et de l'hélium (25 %), et un peu de deutérium et de lithium ; ils constituent ce qu'on appelle la nucléosynthèse primordiale. S'ensuit une longue période (jusqu'à la recombinaison), durant laquelle on estime que le cosmos contient aussi de la matière noire – dont la nature est inconnue, mais qui interagit via la gravitation. Enfin, 380 000 ans après le Big Bang donc, se produit cette recombinaison aboutissant à l'émission du fond diffus cosmologique qui baigne aujourd'hui le cosmos et qui a été étudié par Planck.

Dans cette période, il n'y a donc ni étoiles ni galaxies ?

En effet, les structures que nous connaissons sont encore absentes et l'Univers est alors essentiellement composé de gaz neutre. Comme il n'y a pas encore de sources de lumière, c'est une période que l'on appelle l'aube cosmique ou encore les « âges sombres ». Ensuite, les premières étoiles se forment par effondrement gravitationnel du gaz dans les halos de matière noire. Ces premières étoiles sont ce qu'on nomme des étoiles de population III. Il s'agit d'étoiles qui contiennent exclusivement les éléments chimiques de la nucléosynthèse primordiale. Comme les modèles prédisent qu'elles naissent avec des masses élevées – plusieurs centaines à plusieurs milliers de fois la masse du Soleil –, elles vivent très peu de temps, typiquement quelques millions d'années, voire moins d'un million d'années pour les plus massives (plus une étoile est massive, moins elle vit longtemps). Ces étoiles se sont donc embrasées et ont disparu très vite – à l'échelle de l'Univers –, tout en enrichissant le cosmos en éléments plus lourds. La seconde génération d'étoiles (les étoiles de type II) est alors apparue et a constitué les premières galaxies. Étoiles de type III comme étoiles de type II dans les premières galaxies ont « réionisé » l'Univers. Tout l'enjeu de mon travail aujourd'hui est de mieux comprendre cette période mystérieuse de réionisation.

À quelle époque ou à quelles époques s'est produite cette réionisation ?

On ne le sait pas très bien. Commençons par introduire le concept de décalage vers le rouge (*redshift* en anglais), qui permet d'étiqueter assez facilement les différentes époques. Il s'agit d'un nombre, noté « z », qui mesure l'âge de l'Univers et qui résulte de l'expansion de ce dernier depuis le Big Bang. J'ai dit que l'Univers était en expansion continue depuis le Big Bang. Cela signifie que, plus on regarde loin, plus on voit des galaxies dans l'Univers jeune, et plus ces galaxies s'éloignent vite de nous. Or, quand on enregistre le spectre de ces galaxies, on voit qu'il est d'autant plus décalé vers le rouge – c'est-à-dire vers les grandes longueurs d'onde – que les galaxies sont lointaines et donc jeunes. Ce phénomène est équivalent à l'effet Doppler-Fizeau pour le son : la sirène d'une ambulance qui s'approche de nous paraît plus aiguë que celle d'une ambulance qui s'éloigne. Toujours est-il que ce décalage vers le rouge est un moyen pratique pour parler des objets très lointains, situés dans l'Univers jeune. Aujourd'hui, nous nous situons à $z = 0$ et le Big Bang est par définition à $z = +\infty$. Le z de l'époque de la recombinaison, 380 000 ans après le Big Bang, correspond à $z \sim 1\,100$. C'est à la fois une mesure de distance et d'âge.

“Le spectre des galaxies est d'autant plus décalé vers le rouge que celles-ci sont lointaines, donc jeunes. C'est ce qu'on appelle le *redshift*”

L'interférométrie radio aux frontières de la réionisation

Le radiotélescope Alma est un instrument qui permet d'identifier des sources de l'époque post-réionisation et réionisation, cette période cruciale de l'histoire du cosmos où le rayonnement des premières galaxies a commencé à réioniser les atomes neutres qui s'étaient formés au début de l'Univers. Il s'agit d'un réseau interférométrique de soixante-six antennes installé sur le plateau de l'Atacama, au Chili, à 5 000 mètres d'altitude. Grâce à l'interférométrie, il peut atteindre dans le domaine radio une résolution angulaire de l'ordre de la seconde d'angle, très petite pour ces longueurs d'onde du millimètre. La résolution angulaire est proportionnelle à la longueur d'onde divisée par la taille du télescope, de sorte qu'avec Alma, dont les antennes peuvent être éloignées de plusieurs kilomètres, on obtient des résolutions très bonnes, et on distingue des détails sur des objets très lointains. Les astronomes sont ainsi en mesure d'accéder directement à la raie de carbone ionisé, qui est un traceur de la formation d'étoiles dans les galaxies lointaines de l'Univers. Dans le cadre du projet international Alpine, les astronomes ont suivi à l'aide d'Alma 118 galaxies de l'Univers jeune (de 1 à 1,5 milliard d'années seulement) qui avaient été repérées dans d'autres longueurs d'onde (1). Dans la plupart de ces galaxies, les observations ont pu mettre en évidence la raie du carbone ionisé. Cela signifie que ces galaxies primordiales étaient déjà poussiéreuses et évoluées (leurs étoiles contiennent beaucoup d'éléments plus lourds que l'hydrogène). Ces résultats soulèvent des questions sur l'évolution précoce des galaxies. Pour aller plus loin et voir les galaxies directement responsables de la réionisation, il faudra remonter encore le temps et, pour cela, attendre le radiotélescope géant SKA, en cours de construction sur deux sites, en Afrique du Sud et en Australie. ■ Ph. P.

▲ *Quelques-unes des 66 antennes d'Alma, le plus vaste radiotélescope du monde, installé sur le haut plateau de Chajnantor, au Chili.*

ESO/C. MALIN

(1) 0. *Le Fèvre et al., Astron. Astrophys., 643*, A1, 2020.

Ensuite, pour avoir une idée du moment où se produit la réionisation, on a besoin d'une quantité qu'on appelle l'épaisseur optique de la réionisation. Cette quantité dépend de la densité d'électrons. Un Univers ionisé signifie que les électrons sont séparés des protons, de sorte que, si l'on mesure la densité d'électrons, on a une bonne idée du degré d'ionisation de l'Univers. Cette quantité peut se déduire d'une composante polarisée (*) du fond diffus cosmologique. Avant Planck, le satellite qui avait observé le fond diffus cosmologique était l'américain WMAP, en orbite entre 2001 et 2010. Or, WMAP avait mesuré cette épaisseur optique et avait trouvé une valeur très élevée. Cela signifiait un démarrage de la réionisation il y a très, très longtemps, vers $z = 30$, soit seulement 100 millions d'années après le Big Bang. C'était tellement loin par rapport à nous, que cela en était déprimant : on se disait qu'on n'arriverait jamais à voir quoi que ce soit. Et puis Planck a fait une mesure ultra-précise de cette épaisseur optique, et tout a changé.

Cela veut-il dire que l'on peut observer la réionisation ?

Oui. Ce que l'on a déduit de cette mesure de Planck, c'est que l'Univers est seulement réionisé à 10 % à $z = 10$. En gros, on peut dire que la réionisation se produit entre $z = 10$ et $z = 6$, soit entre 600 millions et 1,2 milliard d'années après le Big Bang. Et de ce fait, même si c'est très loin et difficile, cela devient envisageable d'obser-

(*) Une composante polarisée
La polarisation indique la direction de la vibration du champ électrique de la lumière.

“Concerto a été installé au foyer du radiotélescope Apex situé au Chili, à côté des antennes d’Alma”

YOHANNE LAMOULÈRE/TENDANCE FLOUE

ver les sources responsables de cette réionisation. Pour cela, nous avons plusieurs moyens. Le problème des observations du fond diffus infrarouge que nous avons obtenues jusqu’ici avec différents satellites, c’est qu’il s’agit de la somme de toutes les contributions sur la ligne de visée. Autrement dit, nous n’avons pas l’information sur la profondeur, sur la troisième dimension qu’est le temps (ou le *z*). Pour cela, il faut construire un instrument spécifique. D’où l’idée que nous avons eue de l’instrument Concerto, qui fonctionne sur une technique expérimentale totalement inédite.

Quel en est le principe ?

Il s’agit d’utiliser la cartographie d’intensité de la raie du carbone ionisé comme traceur des premières galaxies formées dans l’Univers. C’est une chose que l’on sait aussi grâce aux résultats d’Alma, un magnifique instrument qui fait de l’interférométrie dans le domaine radio et qui a obtenu des résultats très intéressants sur les galaxies infrarouges situées dans l’Univers jeune *(lire encadré p. 117)*. L’avantage est que l’on observe une raie précise, de sorte qu’en mesurant cette raie, on connaît son décalage vers le rouge et donc le *z* correspondant. En pratique, l’intensité de cette raie dans les galaxies lointaines est très faible, et il va falloir observer pendant très longtemps pour sortir un signal du bruit.

Où en êtes-vous de ce projet ?

Il a très bien démarré et est maintenant opérationnel mais, malheureusement, les problèmes de politique scientifique font qu’il n’ira probablement pas à son terme. Je m’explique. Nous avons dans un premier temps obtenu un financement du Conseil européen de la recherche (ERC), ce qui nous a permis de développer l’instrument, conjointement avec l’Institut Néel de Grenoble et le Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie, également à Grenoble. Il s’agit d’un instrument complètement innovant, à la pointe de la recherche en instrumentation, dont l’élément sensible est à base de

KIDs (Kinetic Inductance Detector), un détecteur matriciel supraconducteur de nouvelle génération, développé dans plusieurs laboratoires en France et à travers le monde. Malgré la pandémie de Covid-19, nous avons travaillé d'arrache-pied et sommes parvenus à construire l'instrument Concerto en un temps record. Celui-ci a été installé en avril 2021 au foyer du radiotélescope APEX situé au Chili, sur le plateau d'Atacama, à 5000 mètres d'altitude, juste à côté des antennes d'Alma. Depuis, il est pleinement fonctionnel et nous observons avec un large champ de vue instantané (20 minutes d'angle, ce qui représente deux tiers de la taille angulaire de la Lune). Je l'ai déjà mentionné, comme c'est un signal très faible que l'on essaye de capter pour voir ces galaxies, il faut recueillir des données durant de longues périodes. Notre instrument était prévu pour rester sur le radiotélescope entre cinq et dix ans. Or, alors qu'il a été installé en avril 2021, l'Observatoire européen austral, qui cofinance l'APEX, a soudainement décidé de ne plus le financer (pour se concentrer sur l'ELT, le télescope optique géant en construction au Chili). Nous devrons donc cesser les observations et démonter l'instrument au début de l'année 2023. C'est un peu du gâchis, alors que tout est déjà fabriqué, installé et fonctionnel.

Existe-t-il d'autres moyens d'observer ces premières galaxies ?

Oui, il y a pas mal de choses envisagées. Le combo gagnant, si j'ose dire, c'est SKA – le plus grand radiotélescope du monde en cours de construction en Afrique du Sud et en Australie – et le James Webb Space Telescope, ce fameux JWST dont les premières images commencent à arriver. Alors qu'avec Concerto, nous faisons la cartographie des fluctuations de brillance du carbone ionisé, ce qui permet de tracer les galaxies en train de se former, avec SKA, nous ferons la cartographie des fluctuations de brillance de l'hydrogène neutre, le gaz neutre qui est entre ces galaxies. Autrement dit, les deux types d'observations (carbone ionisé et hydrogène neutre) seront complémentaires. En parallèle, le JWST a pour ambition de voir les galaxies de faible luminosité actives en matière de formation d'étoiles, mais contenant peu de poussières. Le tableau global devient plus clair. Il reste cependant beaucoup de choses à comprendre : par exemple, on n'a toujours pas identifié précisément les sources responsables de la réionisation. Cela va demander encore un peu de patience puisque si la construction de SKA a commencé, sa mise en service ne devrait pas intervenir avant 2028.

Que pensez-vous du modèle standard de la cosmologie, qui est la description de l'histoire de l'Univers telle qu'on la comprend aujourd'hui ?

Il est vrai que ce scénario est bâti sur l'inflation, dont on ne sait pas si elle existe ; sur la matière noire, dont on ignore la nature ; et sur l'énergie noire – qui serait responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers observée –, dont on ne sait pas d'où elle vient. D'un côté, cela peut paraître un modèle ténu, car fondé sur beaucoup d'inconnues. D'un autre côté, ce modèle est prédictif et on mesure ce qu'il prédit avec une précision extrême. Alors, élaborer un modèle concurrent qui puisse être en accord avec toutes les observations que l'on a faites depuis quarante ans, ce n'est pas facile. Avec Planck, nous avons essayé de casser le modèle, sans y parvenir. Mais, là encore, il y a beaucoup de projets en préparation pour observer le cosmos à la recherche de nouveaux indices qui permettraient de confirmer ou d'infirmer ce modèle. En premier lieu, de nombreuses universités et institutions américaines se sont liées pour construire un ensemble de télescopes au Chili et au pôle Sud à la recherche d'indices observationnels de l'inflation – ce qu'on appelle les modes B dans le fond diffus cosmologique. Regroupé au sein de l'observatoire Simons, cet ambitieux projet – plus d'un milliard de dollars de financement – doit prendre sa pleine mesure en 2027-2028. Du côté de l'énergie noire, cette mystérieuse énergie que l'on estime responsable de l'accélération observée de l'Univers, des résultats pourraient arriver plus tôt, puisque le satellite européen Euclid, justement destiné à mesurer plus précisément l'expansion, est censé décoller en 2024. La décennie devrait être riche en surprises. ■

Propos recueillis par Philippe Pajot

(1) J.-L. Puget *et al.*, *Astron. Astrophys.*, *308*, L5, 1996.
(2) H. Dole *et al.*, *Astron. Astrophys.*, *451*, 417, 2006.
(3) Collaboration Planck, *Astron. Astrophys.*, *571*, A30, 2014.

POUR EN SAVOIR PLUS

■ **tinyurl.com/nvn3fv56**
Séminaire de Guilaine Lagache sur la technique de cartographie de l'intensité de la raie du carbone, mise en œuvre dans l'expérience Concerto. Dans le cadre du cours de Françoise Combes sur la réionisation, au Collège de France.

■ **tinyurl.com/4t2bznm3**
Conférence grand public de Guilaine Lagache sur les âges sombres et la réionisation.

■ Jean-Philippe Uzan, *Big Bang : comprendre l'Univers depuis ici et maintenant*, Collection Champs Sciences, Flammarion, 2021.

Édito

L'enseignement supérieur, la recherche et l'innovation **en Occitanie**

Le conseil régional adoptera en juillet prochain son Schéma Régional Enseignement Supérieur Recherche Innovation (SRESRI) 2022-2027. Ce sera l'occasiond'un important travail d'état des lieux et de définition des enjeux. Sur beaucoup de points l'Occitanie obtient la troisième place parmi les régions françaises, loin derrière les leaders Île-de-France et Auvergne-Rhône-Alpes certes, mais qui marque un vrai dynamisme et de réels atouts.

L'enseignement supérieur : attractif pour les jeunes au-delà des lycéens occitans

En termes de nombre d'étudiants dans chaque région, l'Occitanie arrive troisième avec 260 632 inscrits dans l'enseignement supérieur en 2019-2020, essentiellement dans deux métropoles universitaires, Toulouse et Montpellier. La région compte 8 universités et 31 écoles.

L'université compte 66,9 % des étudiants alors qu'au niveau national ce taux n'atteint que 60,3 %. Proportion encore plus forte à Montpellier une ville dont l'excellence universitaire date du Moyen-Âge – que dans l'académie de Toulouse très liée à l'écosystème aéronautique. Là, les effectifs inscrits en formation d'ingénieurs sont les plus importants.

L'apprentissage est bien développé en Occitanie. En 2019, sur 40 000 apprentis, l'enseignement supérieur en comptait 16 291 et les effectifs sont en augmentation à tous les niveaux de diplômes.

Un des forts enjeux du SRESRI sera d'accompagner l'émergence de formations qui préparent aux métiers de demain en lien avec les filières porteuses sur les territoires.

Un effort de recherche plaçant l'Occitanie parmi les premières régions européennes

La Région possède une intense activité de R&D la plaçant au premier rang national en volume de dépenses de R&D rapporté au PIB. Une dynamique positive est constatée sur le nombre d'étudiants de 3e cycle se formant par la recherche. La Région occupe la place en nombre de chercheurs publics, de chercheurs publics et privés confondus, de doctorants et sur la production scientifique. Une part notable d'organismes de recherche nationaux déconcentrés est à souligner. Plusieurs universités régionales sont présentes dans les classements internationaux d'évaluation de la recherche.

En Occitanie, les filières de recherche emblématiques, source de son attractivité, sont l'aéronautique, le spatial et les systèmes embarqués, l'agroalimentaire, l'agro-industrie, la santé, les biotechnologies et le numérique. Des filières « émergentes » diversifient le tissu économique régional par exemple les énergies renouvelables comme l'hydrogène. Enfin il y a des filières d'excellence localisées comme tourisme et patrimoine, viticulture, Mer et Littoral… Les infrastructures de recherche doivent être consolidées et les outils technologiques indispensables pour, demain, être identifiés et intégrés aux structures existantes.

Une région classée *Strong +* en Innovation à l'échelle européenne

L'Occitanie est encore une fois la troisième région de France en dépôts de brevets, avec, en tête des déposants, trois grandes entreprises de la Haute-Garonne : Airbus, Continental et Safran. Les domaines les plus « brevetés » par les acteurs régionaux sont : Capteurs », « Systèmes embarqués », « Dispositifs médicaux » « Matériaux céramiques ».

Le classement européen, *Régional Innovation Scoreboard*, souligne notamment la performance de sa capacité à offrir des formations tout au long des carrières de sa population active et de son nombre de PME innovantes collaborant avec d'autres entités.

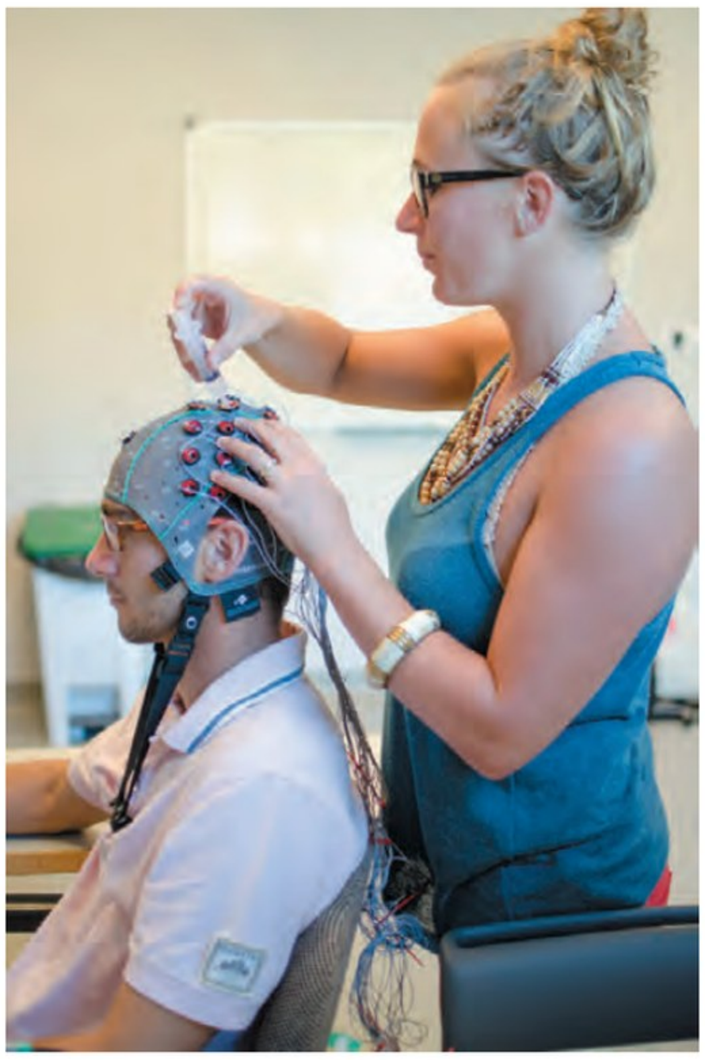
La nouvelle SRI 2021-2027 développera ses moyens sur huit domaines stratégiques d'innovation (DSI) thématiques : alimentation ; eaux ; économie du littoral et mer ; santé, bien-être & bien vieillir ; mobilité ; et trois DSI transverses : les matériaux ; la transition énergétique et économique ; le numérique éthique et souverain. ■

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

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Sécurité alimentaire, protection de l'environnement, santé humaine

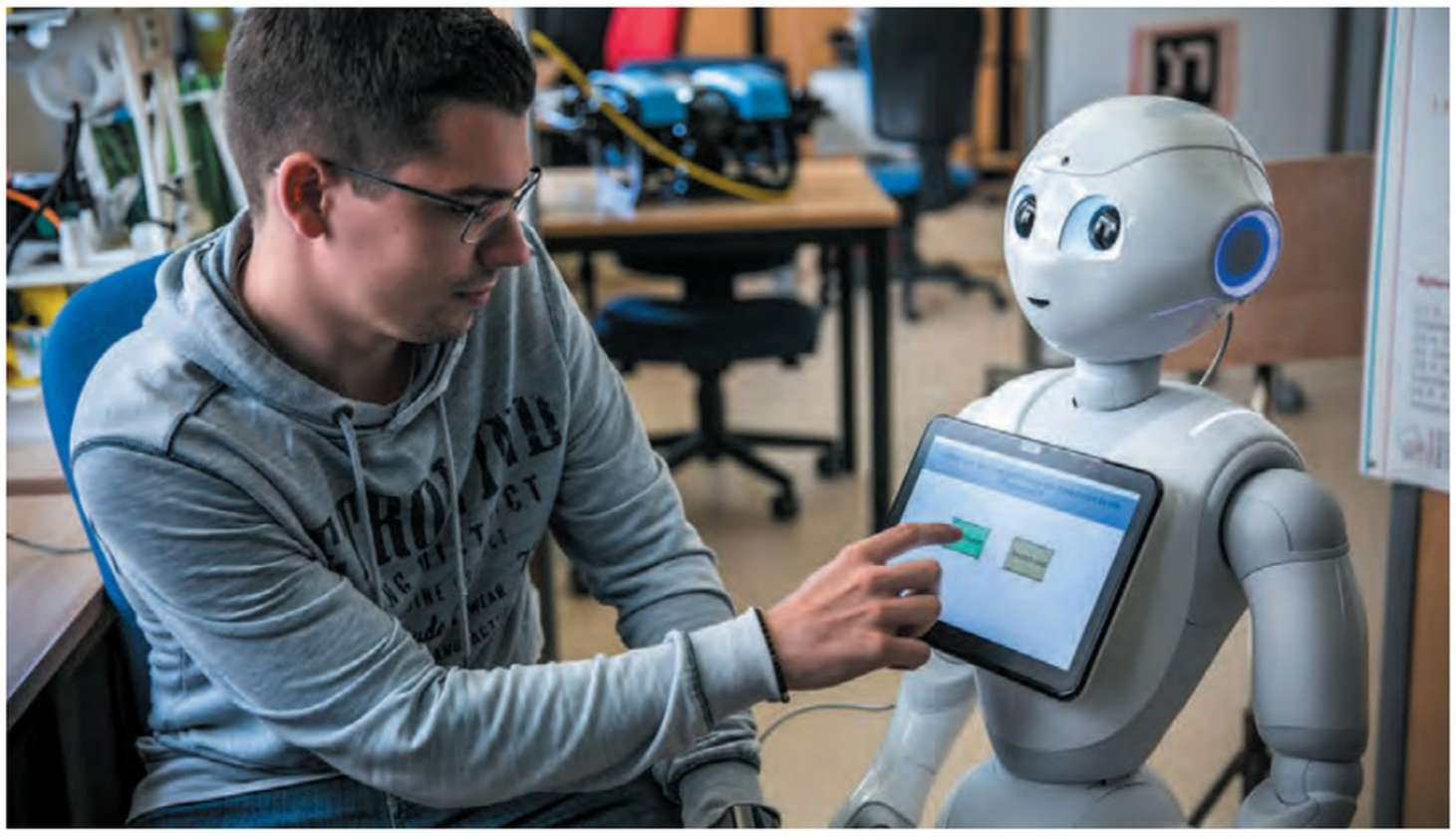
Le projet Montpellier Université d'Excellence (Muse) est articulé autour de ces trois enjeux sociétaux majeurs pour la planète. Sur les recommandations du jury international du programme d'investissement d'avenir Idex-I-Site, ce projet vient d'être définitivement adopté par le gouvernement. Entretien avec Philippe Augé, Président de l'université.



Quelles sont les réussites de l'I-Site Muse qui ont permis sa pérennisation ?
La première est d'avoir réussi à garder 16 établissements et 5 000 chercheurs soudés pendant cinq ans autour d'une ambition commune ! Car de nombreux acteurs sur le site ont travaillé collectivement depuis une dizaine d'années : université, écoles, organismes de recherche, établissement de santé. La deuxième réussite a été *in fine* la construction d'une université de premier rang à l'international jouant concomitamment un rôle moteur pour son territoire. Les succès sont finalement nombreux car une dynamique sans précédent a pu être enclenchée dans tous les champs académiques : soutien à la recherche, transformation pédagogique, renforcement du sentiment d'appartenance, développement des partenariats internationaux, animation de l'écosystème de l'innovation... Preuves en sont données par les classements internationaux : obtention du podium mondial en écologie dans celui de Shanghai, place de leader français dans le classement Reuters sur l'innovation.

Forte de ce label, quels sont les projets de l'Université Montpellier pour demain ?
Nous allons continuer les efforts de transformation dans l'ensemble des champs académiques, dans une démarche innovante, exigeante et résolument interdisciplinaire. La pérennisation de la dotation à hauteur de 589 millions d'euros de capital, soit 17 millions d'euros par an, nous le permettra. De grands projets initiés restent désormais à développer. Par exemple notre nouveau programme IDIL (*InterDisciplinary In Lab*) qui permet l'émergence de cursus de formation par la recherche interdisciplinaires et internationale ; l'obtention récente du label « Pôle universitaire d'innovation » ou le projet ExposUM du programme « Excellences sous toutes ses formes » autour du concept d'exposome. C'est-à-dire l'ensemble des expositions à des facteurs externes et environnementaux. Une dynamique à consolider pour construire la grande université pluridisciplinaire de demain.

Comment s'est renforcée votre attractivité internationale depuis 2018 ?
L'augmentation de 10 % du nombre de doctorants à Montpellier – quand il baisse de 5 % en moyenne en France – le succès de l'Université européenne Charm-Eu, la création d'un Centre sur les sciences de l'eau placé sous l'égide de l'UNESCO témoignent de notre attractivité internationale. Plus récemment, nous avons été choisis pour accueillir à Montpellier l'unité technique d'appui de l'*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (IPBES), qui est à la biodiversité ce que le GIEC est au climat.
Mais un événement reflète encore plus particulièrement cette attractivité : l'organisation des « *Montpellier Global Days* » en octobre dernier. L'Université de Montpellier a été au centre des enjeux du Nouveau Sommet Afrique-France en mobilisant plus de 2 000 scientifiques internationaux autour de six thématiques phares : la santé « *One Health* », l'agroécologie, l'eau, la biodiversité, les systèmes alimentaires ou les technologies au service des enjeux Nourrir-Soigner-Protéger. ■



© DAVID PELL

Laurent Coulon
ÉGYPTOLOGUE, INSTITUT FRANÇAIS D'ARCHÉOLOGIE ORIENTALE DU CAIRE (IFAO)
Directeur de l'Institut français d'archéologie orientale (IFAO) depuis 2019, il est également directeur d'études à l'École pratique des hautes études, membre de l'unité de recherche « Archéologie et philologie d'Orient et d'Occident », et ancien président de la Société française d'égyptologie (2017-2019). Ses recherches portent notamment sur le culte d'Osiris à Karnak et en Égypte au Ier millénaire avant notre ère.

Champollion, la pierre de Rosette et les débuts de l'égyptologie

L'année 2022 marque le bicentenaire du déchiffrement des hiéroglyphes par Jean-François Champollion, qui s'appuya pour cela sur un document bilingue exceptionnel : la pierre de Rosette. Deux décennies séparent la découverte de ce fragment de stèle par les soldats de Bonaparte et le moment où s'éclaire le fonctionnement de l'écriture égyptienne. Une période fondatrice pour une science qui naît en France au XIXe siècle dans un contexte de rivalités nationales : l'égyptologie.

G. DAGLI ORTI /DE AGOSTINI PICTURE LIBRARY / BRIDGEMAN IMAGES / MUSÉE ÉGYPTIEN DE TURIN - DR

◀ *Des hiéroglyphes incrustés en pâte de verre ornent ce sarcophage en bois où fut inhumé le frère de Pétosiris, l'un des grands prêtres du dieu Thot et datant d'environ quatre siècles avant notre ère. Il a été mis au jour en 1920 dans la nécropole d'Hermopolis, à Tounah el-Gebel en Égypte.*

Egypte, juillet 1799. Depuis le milieu de l'année précédente, l'expédition française menée par Napoléon Bonaparte – une entreprise à la fois militaire et scientifique – est en cours dans le pays (elle durera jusqu'en 1801). Dans le delta du Nil, non loin des rives de la Méditerranée et de la ville portuaire de Rosette (aujourd'hui Rashid), l'officier Pierre-François Bouchard dirige les travaux de renforcement des défenses du fort Jullien, qui permet de contrôler le fleuve. Une pierre, remployée à l'époque médiévale comme matériau de construction du fort, est bientôt extraite. Elle comporte des inscriptions en grec ancien, ainsi qu'en démotique et en hiéroglyphes – deux écritures non encore déchiffrées à l'époque –, dont Bouchard reconnaît immédiatement la valeur exceptionnelle. La pierre est alors confiée aux savants français de l'Institut d'Égypte, au Caire. Pas pour longtemps : au moment de la capitulation française, en 1801, la pierre de Rosette, comme elle est aujourd'hui mondialement

▲ *Le buste de Jean-François Champollion, sculpté par Paul Roussel en 1923, orne le perron de l'Institut français d'archéologie orientale du Caire, en Égypte.*

connue, doit être cédée, après d'âpres négociations, aux Britanniques, qui l'emportent jusqu'à Londres où elle est jusqu'à ce jour exposée au British Museum. À peine mise au jour, la pierre de Rosette fut ainsi l'enjeu d'une rivalité entre deux nations. Une rivalité sur laquelle se superposera une concurrence scientifique entre les protagonistes du déchiffrement. Elle va devenir l'emblème même de ce déchiffrement, voire de toute entreprise visant à briser les codes des écritures inconnues et, dans la recherche récente, un objet d'étude autant historique qu'historiographique, témoin de la naissance d'une discipline comme de l'histoire de notre rapport au passé de l'Égypte.

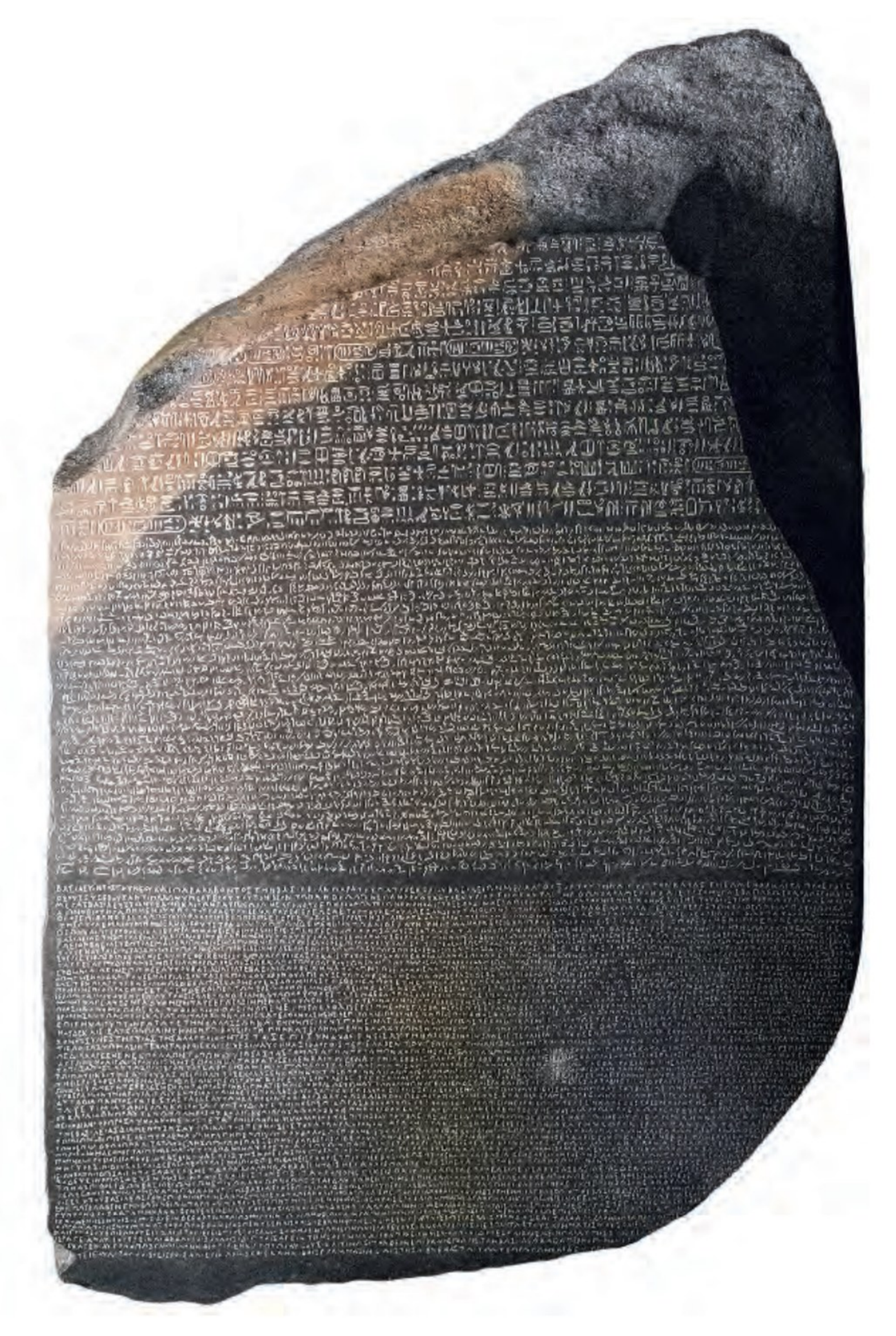
LE DÉCRET QUI LIE DEUX CULTURES, GRECQUE ET ÉGYPTIENNE

Le monument lui-même est imposant. Il se présente comme un monolithe de granodiorite (*) de 1,13 mètre de haut, 76 centimètres de large et 28,5 centimètres d'épaisseur, pour un poids de 762 kilogrammes. Il ne s'agit que d'un fragment de la pierre originale, la partie supérieure de l'inscription hiéroglyphique et le cintre décoré restant introuvables. Cette stèle devait originellement avoir été dressée dans la ville de Saïs, dans le Delta du Nil, à quelques dizaines de kilomètres de Rosette. Elle contient, comme on le sait aujourd'hui, trois versions superposées du texte d'un décret sacerdotal émis sous le pharaon Ptolémée V, un souverain d'origine grecque régnant à Alexandrie en 196 avant notre ère, soit un peu plus d'un siècle après la conquête de l'Égypte par Alexandre le Grand. Ce décret rend public un accord trouvé entre le pouvoir grec et les prêtres égyptiens, à l'issue d'un synode les ayant réunis à Memphis, capitale traditionnelle du pays. Ce « décret de Memphis » reflète dès lors cette rencontre des deux cultures, des deux communautés auxquelles il s'adresse, par les deux langues présentes, le grec et l'égyptien.
La partie égyptienne est déclinée en deux états de langues transcrits en deux écritures, hiéroglyphique d'un côté, démotique de l'autre : un égyptien de tradition pour l'un, figé dans un usage « classique », à des fins de sacralisation, et un égyptien vernaculaire, utilisé pour l'administration. L'écriture démotique est une version cursive, une « tachygraphie » de l'écriture hiéroglyphique, les signes iconiques ayant connu une extrême simplification. Vers 700 avant notre ère, elle a supplanté dans les usages du quotidien une autre tachygraphie, en usage depuis les débuts de l'histoire égyptienne : le hiératique.
La pierre de Rosette présente donc un instantané de la situation linguistique de l'Égypte à un stade déjà tardif de son histoire, près de 3 000 ans après l'invention des hiéroglyphes. Six siècles plus tard s'éteint la pratique des écritures hiéroglyphiques puis de l'écriture démotique, dont des graffitis du temple de Philae (sud-est de l'Égypte) sont les derniers exemples datés. La langue égyptienne est désormais transcrite en copte, utilisant l'alphabet grec, auquel s'ajoutent sept signes issus du démotique. Paradoxalement, les écrits des savants grecs des premiers siècles de notre ère, qui véhiculent encore une connaissance des textes hiéroglyphiques, vont contribuer à obscurcir leur compréhension pour une longue période. En effet, ces écrits s'appuient en grande partie sur les élaborations savantes des hiérogrammates (*) égyptiens des derniers temps de la civilisation égyptienne, qui glosent sur les valeurs allégoriques des hiéroglyphes.
Dans un traité attribué au philosophe alexandrin Horapollon (Ve siècle) (1), qui connaîtra un grand succès à la Renaissance, on trouve ce type d'affirmations, reprises peut-être d'un traité rédigé par le prêtre Chérémon, lui aussi alexandrin, au Ier siècle : *« Voulant signifier le fils, ils dessinent une oie. Parce que cet animal aime ses enfants plus que tout »* ; *« Voulant signifier l'obscurité, ils dessinent une queue de crocodile car le crocodile, lorsqu'il saisit un animal, n'a d'autre moyen de le tuer et de le détruire que de l'attaquer avec sa queue et de le mettre hors de combat »* (2). La dimension phonétique de l'emploi du hiéroglyphe s'estompe ici totalement derrière son interprétation comme symbole, qui établit un lien motivé entre le signifié et le signifiant graphique du signe, ce que l'égyptologue allemand Jan Assmann a appelé étymographie (3). Cette approche conditionne les travaux de ceux qui, à la Renaissance et au XVIIe siècle, vont s'attacher à expliquer l'écriture des anciens Égyptiens. Ainsi, Athanase Kircher (1602-1680), jésuite allemand, tout en maîtrisant le copte et en étant persuadé à raison que cette langue dérive de la langue des

(*) **La granodiorite** est une roche magmatique proche du granite, principalement constituée de quartz et de feldspath.

(*) **Un hiérogrammate** est un scribe attaché au service d'un temple, chargé de transcrire en hiéroglyphes les oracles et prescriptions divines.

IFAO, LE CAIRE



▲ *La pierre de Rosette, un fragment de stèle de plus de 760 kilogrammes, a été extraite en 1799 au cours d'une expédition menée par Napoléon Bonaparte en Égypte. Les textes, en grec ancien et en égyptien ancien, révéleront un décret promulgué en 196 avant notre ère par le roi Ptolémée V.*

JOAO LUIZ BULCAO / HANS LUCAS VIA AFP

Pharaons, élabore des théories hasardeuses sur la lecture des hiéroglyphes uniquement fondées sur leur valeur symbolique.

La situation évolue toutefois au XVIIIe siècle : des avancées sont réalisées par le révérend anglais William Warburton (1698-1779), qui approche l'histoire de l'écriture d'une manière globale et, en se démarquant de l'ésotérisme de ses devanciers, présente les différents types d'écriture égyptienne comme faisant l'objet d'une dérivation l'une de l'autre. Dans la continuité, l'ecclésiastique et homme de lettres français Jean-Jacques Barthélémy (1716-1795) construit une méthodologie du déchiffrement, fondée sur l'usage de textes bilingues permettant des équivalences assurées en partant des noms propres. Il parvient ainsi à déchiffrer l'alphabet palmyrénien (en1754), en s'appuyant sur une inscription bilingue en grec/palmyrénien et sur la parenté de la langue transcrite avec le syriaque ; puis perce le secret de l'alphabet phénicien (en 1758), qui transcrivait la langue antique des habitants des côtes du Liban et des colonies phéniciennes. S'attaquant aux textes hiéroglyphiques des obélisques de Rome, il déduit que les signes ovales (« cartouches ») enserrant certaines séquences les désignent comme des noms propres. Peu après, d'autres savants produisent les premières listes systématiques de signes hiéroglyphiques, avec l'intuition que le nombre limité de ces signes contredit l'interprétation purement idéographique de l'écriture égyptienne (4). Les recherches des savants du siècle des Lumières éclairent ainsi la question de l'écriture hiéroglyphique d'une manière nouvelle, en prêtant une attention plus marquée aux sources originales et en réfléchissant sur la parenté des langues et les conditions possibles du déchiffrement des systèmes d'écriture encore inconnus. S'agissant des hiéroglyphes, il ne manque qu'un texte bilingue qui puisse être exploité pour ce déchiffrement…

UN PREMIER LEXIQUE DRESSÉ PAR LE BRITANNIQUE THOMAS YOUNG

Aussi la découverte de la pierre de Rosette est-elle immédiatement perçue comme un événement majeur. La fin du texte grec confirme aux premiers lecteurs que la pierre porte trois versions du même texte : « *Ce décret sera inscrit sur une stèle de pierre dure en caractères sacrés* [en hiéroglyphes], *indigènes* [identifié très vite au démotique mentionné par Hérodote] *et grecs.* » Des reproductions en sont faites par les experts qui accompagnent l'expédition d'Égypte, envoyées ensuite à Paris où elles sont jalousement gardées, pour que l'entreprise de déchiffrement reste une prérogative française (5). Ce n'est que quand la pierre de Rosette parvient à Londres que des moulages en sont réalisés pour les grandes universités britanniques et que des gravures en viennent à circuler dans toute l'Europe. Dès 1801-1802, l'orientaliste français Antoine-Isaac Silvestre de Sacy (1758-1838) et

LES CARNETS DE CHAMPOLLION

Toute sa vie, Jean-François Champollion a fait des relevés, écrit des carnets, rempli des fiches. La double page ci-contre est un extrait de ses carnets datant de 1824-1825. Elle présente un relevé des inscriptions qui figurent sur la momie n°3 du musée de Turin, où il s'est rendu après son déchiffrement afin d'obtenir des textes supplémentaires. En dessous figure un extrait de son livre Grammaire égyptienne (1836), *publié quatre ans après sa mort, par son frère. On peut voir les déterminatifs des noms divins. L'œuvre est entièrement disponible en ligne : https://tinyurl.com/225k4cs7*

GRAMMAIRE ÉGYPTIENNE, CHAP V. 113

il s'agissait de déterminer le nom propre : ce déterminatif prend successivement les formes suivantes, selon les noms divins qu'il accompagne :

Nr. nß. nq,	A tête de *bélier*.	*Chnouphis.*
Nr. nq. nß,	A tête de *bélier* surmontée du *disque*,	*Chnouphis.*
Nuor.noru,	A tête de *bélier* surmontée d'un *aspic*,	*Chnoumis.*
Ωncω.ϣωnc,	A tête d'*épervier* surmontée du *disque* et du *croissant*,	*Chons.*
Uno.unt,	A tête d'*épervier* surmontée du *disque* et de deux *longues plumes*,	*Month.*
Pu.pru.frn,	A tête d'épervier surmontée du *disque* entouré par un *aspic*,	*Phré.*
Cßσ.cßн.cτк,	A tête de *crocodile*,	*Sévek.*
Ϩapϩat,	A tête d'*épervier* coiffé du *pschent*,	*Har-hat.*

BNF, PARIS - IFAO, LE CAIRE

surtout son élève, le diplomate suédois Johan David Åkerblad (1763-1819) (6), identifient les équivalences entre les noms propres des versions du décret, isolent certains mots et posent les bases d'un alphabet des valeurs phonétiques en démotique, au détriment toutefois de l'analyse de l'écriture hiéroglyphique.
Douze ans plus tard, Thomas Young (1773-1829), scientifique britannique à l'érudition universelle, célèbre pour ses travaux sur la lumière et l'optique, s'attaque à l'énigme en procédant à l'alignement systématique des sections hiéroglyphique, démotique et grecque, et en établissant certains composants phonétiques des noms propres écrits en hiéroglyphes. Ainsi, il identifie les cartouches mentionnant Ptolémée et Bérénice et pose la valeur de quelques signes phonétiques. Il dresse aussi un lexique de plusieurs dizaines de mots usuels (roi, temple, etc.). Malgré ces résultats considérables, il manque néanmoins une véritable clé de compréhension du système hiéroglyphique. Thomas Young n'a pu franchir la dernière étape, qui revient à son concurrent français, Jean-François Champollion.

LA VALEUR PHONÉTIQUE DES SIGNES, CLÉ DU DÉCHIFFREMENT DES HIÉROGLYPHES

Ce dernier, né à Figeac (Lot) en 1790, n'a rien à envier à ses rivaux pour ce qui est de l'ampleur de sa formation scientifique dans le domaine des langues latines et orientales, de la culture classique et de l'histoire. Il suit en cela l'exemple de son frère aîné, Jacques-Joseph Champollion-Figeac (1778-1867), helléniste versé également dans les langues arabe, hébraïque et copte. Celui-ci s'intéresse dès 1803 à la partie grecque de la pierre de Rosette, tout en étant attentif à tous les travaux menés sur les versions en écritures égyptiennes. Il encourage son cadet à se consacrer au déchiffrement des hiéroglyphes, ce qu'il fait dès son adolescence à Grenoble puis à Paris. Le jeune Jean-François s'y jette à corps perdu, s'appuyant sur sa connaissance de la langue copte. Il est convaincu, comme cela avait déjà été avancé depuis plusieurs siècles, qu'elle était l'aboutissement de l'évolution de la langue des pharaons. Bien avant que Thomas Young ne s'intéresse à la pierre de Rosette, Champollion, partant des travaux d'Åkerblad,

La « Lettre à M. Dacier », texte fondateur exposant les premières découvertes de Champollion

a ainsi déjà établi plusieurs équivalences entre des signes hiéroglyphiques et démotiques et des valeurs phonétiques. Son long travail d'analyse des sources égyptiennes, aussi bien en écriture hiéroglyphique que dans ses deux tachygraphies – le hiératique et le démotique – dure plus de quinze ans, au terme desquels, en 1822, il parvient enfin à une compréhension complète du système : *« Je tiens l'affaire ! »* s'exclame-t-il, épuisé, le 14 septembre.
L'étude du texte hiéroglyphique de la pierre de Rosette laissait apparaître que certains termes tels que « naos», « prêtres » ou « stèle » étaient rendus par des idéogrammes. Il fallait toutefois s'éloigner de ce constat pour comprendre la nature de l'ensemble des signes qui, eux, ne pouvaient répondre à la même analyse. À l'opposé des premières tentatives de déchiffrement cherchant la valeur allégorique des signes, c'est en passant par le phonétisme que Champollion parvient à démêler la complexité de l'écriture hiéroglyphique. L'exposé considéré comme fondateur du déchiffrement, la *Lettre à M. Dacier,* lu par Champollion devant l'Académie des inscriptions et belles-lettres le 27 septembre 1822, est de fait entièrement consacré à la lecture des noms de rois étrangers à partir des valeurs phonétiques qui en permettent la transcription : à partir des caractères hiéroglyphiques formant les noms de Ptolémée et Cléopâtre sur la pierre de Rosette ou un obélisque de Philae, Champollion liste une série de valeurs « alphabétiques » qui lui permettent de lire ensuite les noms d'Alexandre, Bérénice, César, et de nombreux autres empereurs romains. Un tableau récapitulatif des signes ainsi utilisés, en hiéroglyphique et en démotique, est dressé. Il ne s'agit là que d'une extension systématique de principes communs aux premiers déchiffreurs du XIXe siècle. La conclusion de la lettre montre

cependant que l'auteur est parvenu à des résultats autrement plus importants, même s'il ne les développe pas ici : *« Je pense donc, Monsieur, que l'écriture phonétique exista en Égypte à une époque fort reculée. »*

C'est dans *Précis du système hiéroglyphique des Anciens Égyptiens,* paru en 1824, puis augmenté en 1828, que Champollion exposera les fondements de sa découverte majeure : le principe du rébus, mécanisme sous-jacent à cet usage phonétique des hiéroglyphes, c'est-à-dire *« la possibilité de représenter indirectement ou plutôt de rappeler le souvenir de chaque son de sa langue, par l'image d'objets matériels dont le signe oral ou mot qui les exprimait dans la langue égyptienne, contenait en première ligne le son qu'il s'agissait de peindre »*. En d'autres mots, les Égyptiens utilisent la valeur phonétique d'un idéogramme représentant une certaine réalité pour transcrire une autre réalité homophone : par exemple, l'idéogramme de la maison, qui se lit *per,* peut aussi servir de phonogramme pour écrire le verbe « sortir » (*peri*) qui a la même structure consonantique.

UNE ÉCRITURE QUI REPRÉSENTE TANTÔT LES IDÉES ET TANTÔT LES SONS

Champollion arrive alors à la conclusion que, *« l'écriture hiéroglyphique est un système complexe, une écriture tout à la fois figurative, symbolique et phonétique, dans un même texte, une même phrase, je dirais presque dans le même mot »*. Il élucide également le rôle des signes « déterminatifs », sans valeur phonétique : *« Placés à la suite de certains caractères ou groupes de caractères, soit symboliques soit phonétiques, exprimant des individus déterminés d'une espèce, ces caractères deviennent simplement les signes de l'espèce à laquelle appartient l'individu exprimé par le caractère symbolique ou le groupe phonétique »*. Pour reprendre l'exemple du verbe *peri* (« sortir »), on ajoutera après le signe de la maison le déterminatif des deux jambes pour indiquer que le mot doit être lu comme un verbe de mouvement.

Durant la période de gestation du déchiffrement par Champollion, et jusqu'à très peu de temps avant son aboutissement, les raisonnements du génie auront été entravés par certaines erreurs. La dimension phonétique des signes hiéroglyphiques lui est ainsi encore inconcevable quand il écrit en 1821, dans un traité sur l'écriture hiératique qu'il présente à l'Académie, que les signes de celle-ci comme les hiéroglyphes *« sont des signes de choses, et non des signes de sons »*. Cette idée est encore présente dans la première version de la *Lettre à M. Dacier.* Ce n'est que progressivement que s'impose à lui l'idée que les hiéroglyphes représentent *« tantôt les idées et tantôt les sons »* de la langue égyptienne. Il le réalise d'abord par un comptage du nombre de signes hiéroglyphiques, en regard du nombre de mots grecs correspondant, qui démontre que le premier excède largement le second, interdisant une lecture purement idéographique du texte égyptien ; puis par une lecture de noms royaux purement égyptiens connus par les auteurs grecs, tels que Ramsès ou Thoutmosis, à partir de séquences phonétiques connues notamment par le copte. Écriture et langue sont ainsi reliées à travers cet encodage combinant sons et sens.

Comment Champollion est-il parvenu en quelques mois à une solution si aboutie, alors qu'il s'est si longtemps fourvoyé dans une mauvaise direction ? Cela s'explique par l'ampleur de ses connaissances sur l'ensemble du corpus disponible et le travail systématique accompli sur les composantes de l'écriture égyptienne, notamment par les équivalences établies entre les hiéroglyphes et les signes hiératiques et démotiques. Champollion dépasse ainsi très vite les avancées de Young sur les noms étrangers en établissant de nombreuses équivalences avérées entre hiéroglyphes et valeurs phonétiques, les déductions s'enchaînant alors et se vérifiant par différents biais pour dessiner un système de lecture fiable. La documentation sur laquelle s'appuie le savant français est également bien plus

Ajouter au signe de la maison le déterminatif des deux jambes indique que le mot doit être lu comme un verbe de mouvement

EXPOS

- **L'aventure Champollion**
  Dans le secret des hiéroglyphes, Paris, BNF, *12 avril – 24 juillet 2022.*
- **Déchiffrements**
  Figeac, Musée Champollion, *9 juillet – 9 octobre 2022.*
- **Champollion – 1822 et l'Égypte ancienne retrouva la parole**
  Paris, Collège de France, *15 septembre – 28 octobre 2022.*
- **Champollion – La voie des hiéroglyphes**
  Louvre-Lens, *28 septembre 2022 – 16 janvier 2023.*

vaste que celle de ses contemporains. Outre les planches de la *Description de l'Égypte,* compilant les données collectées par les scientifiques de l'expédition de Bonaparte et dont il procède à la révision, Champollion étudie sans cesse de nouvelles sources en sollicitant des copies. C'est par exemple à partir de relevés de textes d'Abou Simbel fournis par l'architecte Jean-Nicolas Huyot (1780-1840) qu'il parvient à déchiffrer les cartouches des souverains égyptiens du Nouvel Empire (-1500 à -1000 environ). Après sa découverte du système hiéroglyphique, ses séjours au musée égyptien de Turin, en Italie, puis en Égypte lui fournissent quantité de textes supplémentaires qui lui permettent d'établir les fondements d'une analyse historique et religieuse de l'Égypte pharaonique renouvelée, tout en restant en partie conditionnée par les auteurs classiques (7).

CONCURRENCE, RESSENTIMENT ET POLÉMIQUES ENTRE LES NATIONS

À suivre les différentes péripéties qui ont ensuite mené à la reconnaissance de la découverte de Champollion par l'ensemble de la communauté scientifique, nous sommes frappés par la concurrence exacerbée qui règne entre les différents acteurs et la virulence des débats et polémiques qui s'instaurent entre eux, sur fond de rivalité personnelle ou d'antagonisme politique. Champollion aura vécu ses années de quête de la solution à la lecture de l'égyptien sous une pression constante, alimentée par les craintes de son frère aîné qu'il se trouve devancé. Le soutien de savants établis comme celui du linguiste, philologue et orientaliste Antoine Isaac Silvestre de Sacy (1758-1838), et d'institutions comme l'Académie des inscriptions et belles-lettres, est alors constamment recherché pour pouvoir présenter publiquement ses travaux sans délai et pour financer leur publication.

Les résultats décisifs présentés en 1822 par Champollion ne suffisent pas à lui épargner les critiques et à éteindre la violence des débats qui entouraient le sujet de l'écriture égyptienne. Même si Thomas Young a, dans un premier temps, accueilli favorablement la découverte du savant français, il fait part, plus tard, de son ressentiment face à l'absence de reconnaissance suffisante de ses propres mérites par celui-ci. Champollion doit également faire face aux pamphlets de savants européens tels le Prussien Julius von Klaproth (1783-1835), ou l'Italien Dominique Valeriani (1777-1864). La publication de *Précis* en 1824 vient néanmoins asseoir définitivement la reconnaissance scientifique du déchiffreur français, dont la découverte est opportunément présentée comme réparant le préjudice national qu'avait été la confiscation par les Anglais de la pierre de Rosette (8).

L'attribution à Champollion du poste de conservateur des salles égyptiennes du musée du Louvre en 1826, puis son élection à l'Académie des inscriptions et belles-lettres en 1830, et enfin sa nomination sur une chaire d'archéologie au Collège de France en 1831 viennent parfaire l'intégration de l'égyptologie au paysage scientifique français. La discipline est ainsi « institutionnalisée », même si le décès prématuré de son fondateur en 1832 la fragilise quelque temps. Auguste Mariette (1821-1881) lui apportera sa pleine dimension archéologique en menant des fouilles documentées à Saqqara, Abydos ou Karnak et en créant le Service des antiquités de l'Égypte et le Musée égyptien du Caire en 1858. Juste avant la mort de Mariette, en 1880, sous l'impulsion de Gaston Maspero (1846-1916), une nouvelle institution française viendra rendre pérennes les efforts des pères fondateurs de la discipline égyptologique : l'« École du Caire », qui deviendra, en 1898, l'Institut français d'archéologie orientale, qui poursuit depuis, dans un contexte de coopération avec le pays hôte et la communauté internationale, les travaux de recherche sur l'histoire, l'archéologie et la philologie des civilisations de l'Égypte. ■

(1) Jean-Luc Fournet (dir.), *Les Hieroglyphica d'Horapollon de l'Égypte antique à l'Europe moderne,* ACHCByz, Paris, 2021.

(2) Heinz-Josef Thissen (dir.), *Des Niloten Horapollon Hieroglyphenbuch,* B. G. Teubner, 2001.

(3) J. Assmann, *in* A. Assmann et J. Assmann (dir.), *Hieroglyphen. Stationen einer anderen abendländischen Grammatologie, Ärchäologie der literarische Kommunikation,* Fink, p. 37, 2003.

(4) J. Winand, *in Lux Philologiæ,* C. Bonnet, J.-F. Courouau et E. Dieu (dir.), Droz, p. 277, 2021.

(5) B. Savoy, *Études germaniques, 256,* 807, 2009.

(6) Fr. Thomasson, *in* Silvestre de Sacy. *Le projet européen d'une science orientaliste,* M. Espagne, N. Lafi et P. Rabault-Feuerhahn (dir.), éditions du Cerf, p. 271, 2014.

(7) J. Yoyotte, *BSFE, 95,* 76, 1982.

(8) E. Gady, *Revue d'histoire du XIXe siècle, 32,* 41, 2006.

1824

DATE DE PUBLICATION
de *Précis du système hiéroglyphique des Anciens Égyptiens,* qui assoit définitivement la reconnaissance scientifique de Jean-François Champollion.

POUR EN SAVOIR PLUS

■ G. Andreu-Lanoë, V. Desclaux, H. Virenque (dir.), *L'Aventure Champollion – Dans le secret des hiéroglyphes,* BNF, 2022.

■ Alain Faure, *Champollion : le savant déchiffré,* Fayard, 2004, rééd. 2020.

■ Stéphane Polis (dir.), *Guide des écritures de l'Égypte ancienne,* Ifao, 2022

Chimie

Chimique, vous osez dire chimique ?

Bernard Meunier

Chimiste, ex-président du CNRS et ex-président de l'Académie des sciences, c'est peu de dire que Bernard Meunier est un fin connaisseur de ce domaine de recherche. Il tente ici, à travers de nombreux exemples, de rappeler les bienfaits de la chimie dans notre quotidien.

La chimie fait peur. Glyphosate, dioxines, perturbateurs endocriniens, métaux lourds, particules fines… Autant de mots qui suscitent la méfiance ! Il y a de quoi : selon une estimation parue récemment dans *The Lancet Planetary Health*, neuf millions de personnes meurent chaque année dans le monde, parce qu'elles sont exposées à un air, une eau ou des sols contaminés par des substances toxiques. La menace pèse surtout sur les pays en voie de développement. Face à ce constat, il est difficile de garder son sang-froid : l'adjectif « chimique » est systématiquement devenu péjoratif. Son contraire serait « naturel ». Rien n'est plus faux. La vie est chimique ! Les cellules de notre corps sont faites de molécules chimiques. L'eau, la caféine et le sucre sont chimiques. D'une manière générale, tout ce qui a une masse est un produit chimique. La définition de « chimique » englobe ainsi les éléments du tableau périodique (carbone, oxygène…), les molécules petites (caféine) ou grosses (ADN), ou encore les polymères constitués de chaînes presque infinies tels que les plastiques.

La chimie ne doit donc pas être bannie. Nous devons nous y intéresser pour relever les défis écologiques et alimentaires auxquels nous sommes confrontés. C'est l'objectif du livre de Bernard Meunier qui s'efforce de *« remettre à sa place la fonction de la chimie au quotidien »*. Il le fait à travers des exemples concrets, comme celui de l'eau de Javel (ou hypochlorite de sodium), un produit qui a aujourd'hui mauvaise presse. Les hôpitaux ne l'utilisent plus pour nettoyer leurs sols, s'indigne l'auteur. Pourtant, cette molécule, synthétisée pour la première fois en France par Claude-Louis Berthollet à la fin du XVIIIe siècle, dispose d'un fort pouvoir désinfectant. L'hypochlorite dilué dans de l'eau produit de l'acide hypochloreux, ce qui aboutit à la formation d'ions chloronium Cl^+, très oxydants, qui détruisent les membranes des bactéries et virus. Des propriétés très utiles pour contrer de nombreuses épidémies et rendre l'eau potable.

Certes, comme tout produit réactif, l'eau de Javel doit être utilisée avec précaution. Par exemple, elle ne doit pas être mélangée à un autre produit ménager, encore moins à du vinaigre – ce dernier, acide, réagit avec la Javel, basique, ce qui produit un dégagement de chlore gazeux pouvant entraîner une intoxication. Des inquiétudes existent aussi concernant l'accumulation d'eau de Javel dans l'environnement. Mais l'auteur rappelle également que, diluée dans l'eau, elle se décompose toute seule, et finit en sel, *« celui-là même que l'on trouve dans l'eau de mer »*. En fait, Bernard Meunier nous montre que les produits créés en laboratoire ne sont pas plus ou moins dangereux que ceux trouvés dans la nature. Le danger dépend de la structure d'un composé, non de son origine. Il y a de nombreux poisons naturels produits par des plantes ou des animaux. C'est le cas de l'amygdaline, présente dans les noyaux de cerise ou d'abricot : quand elle se décompose dans l'estomac sous l'action d'une enzyme, elle libère du cyanure ! *« Le vivant n'évolue pas dans la pureté du monde des divinités »*, conclut l'auteur, qui insiste sur la nécessité de minimiser notre impact sur l'environnement mais sans laisser croire qu'il existerait un mode de vie sans aucun impact sur la nature… **Mathias Germain**

Bernard Meunier, *CNRS éditions, juin 2022, 220 p., 20 €.*

DR

Éthique

Servitudes virtuelles

Les comités d'éthique du numérique se sont multipliés ces dernières années au sein des institutions politiques et scientifiques afin d'appréhender le développement phénoménal du cyberespace. Ils ont pour vocation d'aider à établir des régulations sur cet univers qui, chaque jour, grignote un peu plus d'espace dans nos vies. Le problème, juge Jean-Gabriel Ganascia (qui collabore à *La Recherche* en tant que chroniqueur, lire p. 138), c'est que les principes sur lesquels ils se fondent et les recommandations qu'ils émettent sont bien souvent *«insatisfaisants»*. Le chercheur en informatique, par ailleurs ancien président du comité d'éthique du CNRS (le Comets), en veut pour preuve l'incapacité de ces groupes de réflexion, en règle générale, à percevoir les projets réellement inquiétants – les interfaces cerveau-ordinateur que Mark Zuckerberg, fondateur de Facebook, appelle de ses vœux pour lire dans nos pensées, par exemple – et, *a contrario*, leur propension à se positionner sur des sujets faisant écho à des craintes... dépassées. Il se propose donc d'apporter sa contribution à une meilleure compréhension du numérique. Pour cela, il fait appel à deux instruments métaphoriques : une rose des vents numériques et un marteau. Avec la première, il nous guide à travers les différentes dimensions du cyberespace afin de nous aider à mieux les appréhender. Avec le second, il nous propose de frapper les principes qui sous-tendent l'éthique du numérique (autonomie, bienfaisance/non-malfaisance, justice et transparence) et d'écouter comment ils résonnent. Une manière d'introduire ses réflexions, issues d'une pensée érudite, profonde et pédagogue sur le fondement des normes morales et politiques du cyberespace. **V. G.**

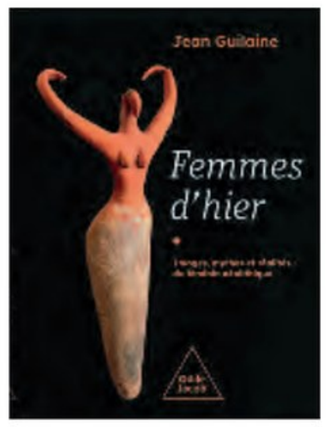
Jean-Gabriel Ganascia, *Seuil, mars 2022, 288 p., 21 €.*

Archéologie

Femmes d'hier

Jean Guilaine

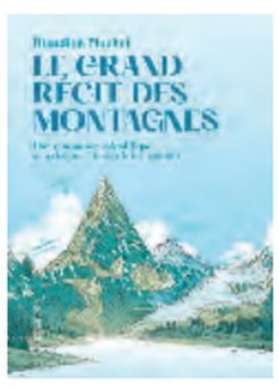
Une typologie remarquable de l'iconographie féminine au Néolithique et une plongée dans les débats sur les fonctions et le statut des femmes de cette période.



Un visage sans traits ; des bras absents ; une taille et un bassin marqués, à l'inverse des seins ; des jambes charnues... Tout interpelle dans cette statuette en terre cuite de la civilisation de Cucuteni-Tripolyé, qui occupait une partie des actuels territoires roumain, moldave et ukrainien au Ve millénaire avant notre ère et au début du IVe. Emblématique de la production artistique de cette culture, la figurine témoigne du raffinement des populations du Néolithique (entre -10 000 et -3 000 pour l'Orient, entre -7 000 et -2 000 pour l'Europe) en matière de représentation féminine. Mais attention ! prévient le préhistorien Jean Guilaine : la production artistique de cette période offre bien d'autres formes de figurations, styles, matériaux, etc. Une diversité dont le livre dresse la typologie, nourrie par une iconographie aussi belle qu'abondante. À partir de ces représentations mais aussi des récentes analyses en paléogénétique, l'ouvrage examine ensuite les fonctions et le statut des femmes néolithiques. Il nous emmène au cœur des débats acharnés des spécialistes. Passionnant. Vincent Glavieux

Jean Guilaine, *Odile Jacob, mai 2022, 432 p., 45 €.*

Culture scientifique



Le Grand Récit des montagnes

Physicienne de formation et écrivaine, Blandine Pluchet aime parcourir les montagnes pour s'aérer, réfléchir et découvrir. Dans ce récit, elle nous invite à considérer les massifs comme des tremplins pour appréhender les lois du monde. Lieux de découvertes pour les naturalistes et les géologues, sites exceptionnels d'observation du ciel et du cosmos, ils regorgent de trésors scientifiques et abritent des sites de haute technologie. Perché à 2650 mètres, sur les flancs du Zugspitze, dans les Alpes allemandes, nous découvrons ainsi le Schneefernerhaus, un laboratoire qui, grâce à son système de sondage lidar, scrute la composition de l'atmosphère (notamment en vapeur d'eau) et aide à comprendre le réchauffement climatique. Une balade originale dans le monde scientifique. **M. G.**

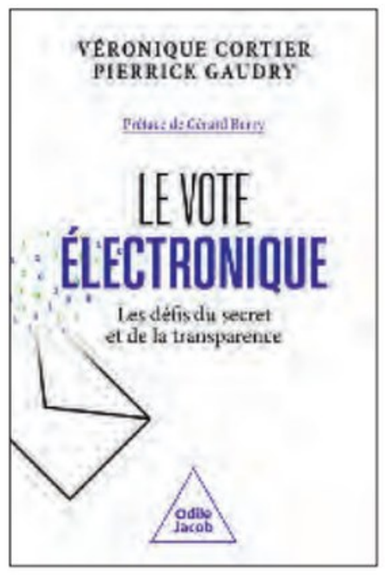
Blandine Pluchet, *Flammarion, mai 2022, 263 p., 20 €.*

DRFP/LEEMAGE/BRIDG+EMAN IMAGES

Informatique

Le vote électronique

L'essor du numérique a accéléré l'adoption de ce nouveau type de scrutin, mais les garanties d'un système que l'on veut le plus transparent possible ne sont pas faciles à mettre en œuvre.



Le vote électronique est-il fiable ? C'est la question que posent les auteurs, spécialistes de sécurité informatique. Véronique Cortier, chercheuse à Nancy (Meurthe-et-Moselle), a conçu la plateforme de vote Belenios, qui permet d'organiser des élections en ligne. Le logiciel garantit le secret du vote et des résultats transparents à tout instant. La boîte à outils nécessaire à ces garanties combine différents outils cryptographiques. Or les constructions peuvent être complexes et, si l'on veut garder un système simple d'utilisation, on est rapidement limité. Par exemple, Belenios satisfait des propriétés de vérifiabilité (individuelle, universelle et de légitimité), ce qui offre un bon niveau de transparence tout en préservant une relative simplicité. Certaines propriétés ne sont toutefois pas assurées, comme la vérifiabilité de l'intention (si l'ordinateur du votant est compromis et change son choix). De nouvelles technologies sont régulièrement mises en avant afin d'augmenter la fiabilité du vote électronique, notamment la chaîne de bloc (blockchain), principe à la base de nombreuses cryptomonnaies. Hélas, cette dernière n'est pas la panacée… En septembre 2019 avaient lieu les élections législatives moscovites pour renouveler les membres de la Douma. Une « prime au bug » était promise à ceux qui trouveraient la clé permettant de déchiffrer les bulletins de vote. Pierrick Gaudry, également auteur de ce livre, a montré qu'une telle clé était facile à casser, les concepteurs du système russe ayant trop misé sur la blockchain et pas assez sur la cryptographie…
À l'issue de cette lecture, on comprend que le traditionnel bulletin papier a du bon. Le vote électronique ne paraît pas applicable à tous les enjeux électoraux. Mais les possibilités ouvertes par le numérique nous amènent à réfléchir à de nouveaux modes de scrutin, comme le classement, la notation des candidats ou le vote au jugement majoritaire, une expérimentation de ce dernier ayant été mise en œuvre pour la présidentielle de 2022 par la primaire populaire. Espérons que cette réflexion permettra d'aboutir à un suffrage où les droits civiques et politiques pourraient s'exercer plus démocratiquement. Philippe Pajot

Véronique Cortier et Pierrick Gaudry, *Odile Jacob, mai 2022, 256 p., 23,90 €.*

Histoire

Le Régiment immortel

En Russie, la Seconde Guerre mondiale est surnommée « la Grande Guerre patriotique ». Depuis 1995, un défilé militaire en l'honneur de la victoire est organisé tous les ans, le 9 mai (avant cela, il n'avait lieu que de manière très épisodique). Point d'orgue, ces dernières années : le passage d'un cortège civil connu sous le nom de « Régiment immortel ». Celui-ci rassemble les descendants des soldats soviétiques engagés dans le deuxième conflit mondial, extrêmement nombreux (26 à 27 millions) à y avoir perdu la vie. À lui seul, ce « régiment » symbolise le tournant pris par les célébrations de la Seconde Guerre mondiale en Russie, en particulier sous l'impulsion du président Vladimir Poutine : d'abord événement local commémoratif, il est devenu *« un puissant moyen de mobilisation du peuple russe » ; « une manifestation ultra-patriotique qui […] affirme la supériorité morale intrinsèque du peuple vainqueur »*, explique la journaliste et historienne Galia Ackerman. Avec lui, c'est tout *« le récit national* [qui] *est de plus en plus glorieux, exempt de toute noirceur, de tout échec, de toute défaite. Que l'on ose contredire ce récit, la réaction est épidermique. L'histoire de cette guerre est sanctifiée et momifiée »*, écrit-elle encore. Le livre, dont c'est ici la seconde édition (la première datait de 2019), décrypte les ressorts de cette mythification en marche. Particulièrement éclairant, dans le contexte de l'invasion russe en Ukraine. À noter qu'un autre ouvrage de Galia Ackerman vient d'être réédité par Premier Parallèle, dans une version augmentée de deux chapitres : *Traverser Tchernobyl*, qui relate la vie de ceux – scientifiques, ethnographes, habitants, etc. – qui forment la mémoire de la catastrophe nucléaire et de ses conséquences. **V. G.**

Galia Ackerman, *Premier Parallèle, mars 2022, 288 p., 20 €.*

Astrophysique

Genèse, le grand récit des origines

Les ouvrages sur l'histoire de l'Univers abondent. Du classique *Les Trois premières minutes de l'Univers*, de Steven Weinberg (1977), à *Poussières d'étoiles* d'Hubert Reeves (1984), en passant par les livres de Stephen Hawking ou d'Aurélien Barrau sur le cosmos, les récits de nos origines cosmiques sont tous captivants. La particularité de celui que nous propose le physicien italien Guido Tonelli est de raconter cette genèse en partant du vide cosmique du tout début – *«Au commencement était le vide»*, écrit-il –, pour aller jusqu'aux formes vivantes complexes dont fait partie l'humanité. Le récit, dense et au long cours, mêle les découvertes scientifiques les plus pointues – sur le boson de Higgs, auquel il a lui-même participé – à des réflexions philosophiques, avec des détours par l'art et la mythologie. Il n'oublie pas les grandes questions ouvertes. L'inflation, par exemple, cette expansion de l'Univers aussi importante que brève (un facteur 10^{26} en moins de 10^{-33} seconde): si cet épisode de notre histoire est prévu dans le modèle du Big Bang, ses traces sont aujourd'hui activement recherchées par des télescopes dans le fond diffus cosmologique, la première «lumière» de l'Univers. Ou encore la matière noire et l'énergie noire, deux entités nécessaires au bon déroulement de ce récit, mais dont la nature nous échappe encore... Une multitude de concepts sont balayés dans ce livre, pas toujours en détail, mais l'histoire peut tout de même se suivre sans connaissance particulière. Reste finalement cette question, plus fondamentale encore: qu'est-ce qui fait de nous des humains ? Pour Guido Tonelli, c'est justement notre capacité à faire de la science, à nous interroger sur nos origines et à produire de l'art. **Ph. P.**

Guido Tonelli, *Dunod, mai 2022, 256 p., 19,90 €.*

LU D'AILLEURS Environnement

A Blue New Deal

Chris Armstrong

Face aux nombreuses menaces qui pèsent sur les océans, le politologue britannique milite pour que ces derniers fassent enfin l'objet d'une gestion durable.

Les océans sont essentiels à la vie sur notre planète. Ils régulent le climat, produisent la moitié de l'oxygène créé sur Terre et nourrissent une grande partie de l'humanité. Pourtant, ce sont souvent les grands absents des politiques environnementales. À tel point qu'ils sont aujourd'hui mis en péril par toutes sortes de menaces: surpêche, pollutions, réchauffement des eaux, acidification...
Chris Armstrong, professeur de théorie politique à l'université de Southampton (Royaume-Uni), tire la sonnette d'alarme: il y a urgence à changer radicalement d'approche en matière de protection des océans. Selon lui, les institutions et lois actuelles sont bien trop faibles et bien trop liées à des intérêts économiques pour pouvoir enrayer la destruction de l'environnement marin.
L'auteur retrace comment, au fil de l'histoire, deux conceptions de la gouvernance des océans se sont imposées, conduisant à la crise actuelle: d'un côté, la liberté de la haute mer, où tout un chacun est libre d'exploiter les ressources; de l'autre, le principe d'*enclosure,* en vertu duquel un État côtier possède le contrôle exclusif de son environnement marin immédiat (celui-ci comprend les eaux territoriales, depuis la ligne de base jusqu'à 12 milles marins, environ 22 kilomètres, et la zone économique exclusive, jusqu'à 200 milles marins, environ 370 kilomètres). Ces deux approches ont conduit au même résultat: la mainmise des pays les plus riches sur les ressources marines. Synonyme, bien souvent, de surexploitation.
Pour changer la donne, Chris Armstrong propose une approche fondée sur des principes d'égalité et de gestion durable des ressources marines. L'auteur suggère ainsi de faire de 80 % de la surface des océans des aires marines protégées sans interaction humaine (contre 5 % aujourd'hui), d'impliquer les citoyens dans une gestion commune de la mer (par exemple en faisant entendre la voix de ceux déjà victimes de la crise des océans: petits pêcheurs, habitants des îles menacées par la montée des eaux...), de partager les bénéfices tirés de son exploitation et de favoriser les transferts de technologies entre pays riches et pays pauvres. Si ce projet séduisant paraît difficile à mettre en pratique dans sa globalité, il a le mérite de nous faire prendre conscience de l'urgence d'agir pour que l'océan retrouve sa bonne santé, et nous avec. Julien Bourdet

Chris Armstrong, *Yale University Press, février 2022, 272 p., 20 £.*

CHRIS ARMSTRONG

Anticiper la sortie des énergies fossiles : il est temps d'aller au charbon

Le président de la République s'est engagé, au cours de la récente campagne présidentielle, à faire de la France la première nation affranchie de la dépendance au gaz, au pétrole et au charbon. Si cela est urgent, cela est loin d'être simple. Il faut s'attacher à construire un nouveau système énergétique, en repensant les modes de consommation et en basculant vers des productions entièrement décarbonées (renouvelables, nucléaire), qui ne représente toutefois qu'une partie du processus de transition énergétique. En effet, le système fossile, à savoir les secteurs économiques, les emplois, les infrastructures et les besoins reposant sur la consommation de ces énergies devront être profondément réorganisés. Trois défis majeurs s'imposent. Un défi stratégique et sécuritaire, d'abord : la stabilité de notre société repose sur un approvisionnement abordable et continu en gaz, en pétrole et en charbon. Un défi économique, ensuite : il sera coûteux de se passer de ces services et de capacités industrielles déjà en place. Un défi social, enfin : des centaines de milliers de personnes vont voir leurs conditions de travail se transformer ou vont devoir se reconvertir. Le repli du système fossile ne peut pas se faire brusquement car il risque d'entraîner de fortes tensions, tant sur l'accès aux biens et services que du point de vue de la cohésion sociale. Ce sujet reste un angle mort des débats publics : il est difficile d'accepter que ce système est fragile et devra finir par être transformé. Il est également délicat de soutenir directement les « perdants » de la transition. En particulier, il va falloir se pencher sur l'organisation de la logistique pétrolière. Les raffineries, les oléoducs, les dépôts de pétrole, les stations-service sont positionnés sur le territoire selon un maillage finement adapté aux besoins de consommation : 90 % des Français se trouvent à moins de vingt-cinq minutes d'une pompe à essence (1). Leur rentabilité, et donc leur pérennité, s'appuie sur l'adéquation entre cette offre et la demande.

Celle-ci finance la réponse à des obligations de sécurité énergétique et environnementale : niveaux de stockage, modernisation des infrastructures pour limiter les pollutions.

La réduction de la consommation, souhaitable, entraîne une érosion de la capacité d'entretien de ce système. Les investissements de sécurité et de maintenance demeurent cependant nécessaires, même lorsque les clients se font plus rares et que la sollicitation des infrastructures diminue.

Si elle n'est pas guidée, la fermeture des installations s'effectuera en fonction de leur rentabilité économique propre et non pas en fonction des besoins collectifs.

La responsabilité de l'approvisionnement reposera sur des sites moins nombreux et localisés de manière éventuellement moins judicieuse du point de vue de la résilience à une perturbation, qu'elle soit d'origine technique (panne) ou humaine (grève, par exemple).

THIERRY MARRO

Par ailleurs, des « zones blanches » pourraient se former, laissant sans solution les usagers concernés, et pourraient engendrer des pénuries désorganisant les activités économiques et sociales, avec des répercussions politiques locales et nationales. Le calendrier et la géographie future du système pétrolier et, plus largement, fossile – les problématiques sont similaires pour l'approvisionnement en gaz – doivent être précisés. Il faudra décider de l'avenir des stocks et infrastructures stratégiques : où les conserver ? Quels types de carburants liquides y entreposer ? Comment financer ces stockages et les maintenir en bon état ? Cela nécessite d'anticiper les grandes transformations de la demande, comme les changements de pratiques ou l'essor du véhicule électrique. Le rythme et l'ampleur de ces mutations importent également. Cette réflexion devra être mise en regard avec la capacité du secteur des énergies fossiles à amortir ce choc et à assurer cette transition. Elle devra concilier différents intérêts politiques, entre la propension des décideurs locaux à accepter ou non le maintien d'infrastructures polluantes, et la nécessité de continuer à fournir des services de première nécessité. Le coût de ces services pourrait grimper, puisque, plus les marchés seront éclatés, de petite taille, avec des solutions technologiques diversifiées, plus les économies d'échelles seront difficiles à obtenir. Qui financera ? Si ces investissements sont frappés d'opprobre par l'opinion publique, pénalisés par une réglementation à juste titre exigeante et par la fiscalité environnementale, qui se chargera de maintenir les infrastructures en état jusqu'à l'extinction totale de la consommation d'énergie fossile ? La sécurité n'est garantie que lorsqu'elle est assurée à tous les citoyens : cette transition doit donner une place à chacun.

Sans préparation, la fermeture des installations s'effectuera en fonction de la rentabilité économique et non pas des besoins collectifs

DES RESSOURCES PROPRES EN QUANTITÉ LIMITÉE

Par ailleurs, les ressources dites « propres » vers lesquelles se reporter sont en quantité limitée : par exemple, la biomasse utilisée pour les biocarburants sera simultanément sollicitée pour d'autres usages, tels que le biogaz ou le stockage de carbone. Des décisions collectives s'imposent : comment doivent être répartis ces nouveaux services, ces ressources en quantité restreinte ? Faudrait-il hiérarchiser les types de consommation, privilégier certains consommateurs ? Sur quels critères ? Comment les mettre en place ?

Après avoir répondu à ces questions, il sera temps d'annoncer ce qui devra être préservé dans le « monde fossile » et jusqu'à quand, ce qui sera fermé et les solutions mobilisées pour prendre le relais en amont. Il faudra prévoir les moyens à y consacrer afin que cela soit acceptable pour tous : ménages, entreprises, finances publiques. Les évolutions technologiques, la modernisation des infrastructures suivant une nouvelle architecture de production, de consommation et de nouveaux flux devront être envisagées. Il en est de même pour les transitions professionnelles que ces mutations impliquent. Le tout, à un coût économique, énergétique et écologique maîtrisé. Ainsi, une planification des infrastructures énergétiques est nécessaire. Il s'agirait d'établir une cartographie mettant en regard les différents types d'approvisionnement disponibles sur le territoire français avec les besoins à satisfaire, par bassin de vie. Celle-ci fixerait des échéances pour réduire l'offre fossile de manière coordonnée, au regard de l'essor d'alternatives. Cette évolution structurante serait élaborée en concertation avec les acteurs de la filière (fournisseurs, opérateurs de la logistique, consommateurs), et les financements prévus pour les accompagner conditionnés à l'atteinte des objectifs définis collectivement. En parallèle, des négociations internationales seront nécessaires. Des institutions comme l'Agence internationale de l'énergie et l'Union européenne organisent les solidarités transnationales et la coordination des réponses aux chocs dans le domaine de l'énergie. Celles-ci ont historiquement pour objectif la sécurisation de l'accès aux énergies fossiles, mais les réponses et obligations que se donnent les États devront refléter cette nouvelle donne. Sans anticipation, passer d'un réseau d'infrastructures consacré aux énergies fossiles à un réseau consacré aux énergies décarbonées est périlleux. Il faut dès aujourd'hui s'atteler à en écrire la feuille de route qui doit articuler une réponse claire, assumée et cohérente avec les différentes contraintes portant sur les systèmes énergétiques. ■

(1) Ministère de la Transition écologique et solidaire, « Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2023 et 2024-2028 », 2020, p. 169 : https://tinyurl.com/3wn6evxr

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

NUMÉRIQUE ET IA

La chronique d'Arnaud Latil

Le contrôle humain, miroir aux alouettes numériques

C'est l'une des propositions phares du projet de Règlement sur l'intelligence artificielle (IA), présenté par la Commission européenne le 21 avril 2021, mais aussi l'une des plus discutables : le « contrôle humain ». Ce dispositif juridique est conçu comme une garantie contre les dysfonctionnements des systèmes d'IA, permettant aux utilisateurs de reprendre la main en cas de défaillance. Quoi de plus louable en apparence ? Concrètement, si cette disposition devait être adoptée par l'Union européenne – peut-être début 2023 – il s'agirait d'obliger les concepteurs de certains systèmes d'IA (ceux dont le fonctionnement présente des risques pour la sécurité, la santé ou les droits fondamentaux) à prévoir des interfaces humain-machine autorisant un contrôle effectif par l'utilisateur. Suivant la nature des systèmes en cause, ces mécanismes devraient détecter les faiblesses, prévenir les biais d'automatisation, expliquer le fonctionnement et, au besoin, passer outre ou inverser le résultat, ou encore interrompre son fonctionnement.

Le contrôle humain prendrait alors des formes diverses : bouton « stop », messages informatifs, mises en garde, entre autres. Pour les cas d'usage les plus à risque, il est même prévu des procédures de vérification par deux personnes, voire davantage. L'objectif affiché consiste à renforcer la responsabilisation des utilisateurs, ceci afin de leur donner confiance.

En donnant du pouvoir aux utilisateurs de ces systèmes d'IA, le législateur organise aussi les conditions de leur responsabilité

Une enquête citée en 2017 par la Commission nationale de l'informatique et des libertés (CNIL) indique en effet que la « perte de contrôle » reste la crainte la plus partagée par les utilisateurs de ces systèmes d'IA (1). On peut pourtant douter de l'efficacité de cette garantie humaine, pour deux raisons : l'une est pratique, l'autre est juridique. Il semble d'abord illusoire d'imaginer que des utilisateurs soient toujours en mesure de vérifier le fonctionnement d'une IA. Prenons l'exemple d'un outil d'analyse médicale visant à détecter des cellules cancéreuses.

On sait aujourd'hui que les taux de détection de cancers obtenus par IA dépassent ceux des médecins. Peut-on alors sérieusement penser qu'une personne utilisant un tel outil oserait remettre en cause les résultats obtenus ? Et quand bien même souhaiterait-elle y procéder, comment s'y prendrait-elle ? En recoupant les résultats obtenus avec une autre IA ? Cela n'aurait bien entendu aucun sens. Si personne n'imagine laisser à une IA le soin de décider d'un traitement, il faut bien convenir que les utilisateurs vont utiliser ces systèmes dans le but de se fier à leurs résultats, et non de s'en méfier.

Soyons clairs : si une machine n'est pas fiable, il ne faut pas l'utiliser (des procédures de certification et de normalisation sont à l'étude pour cela). En revanche, il serait vain de prétendre que les utilisateurs, qui ne sont d'ailleurs pas des experts en informatique, seraient en mesure de prévenir ces dysfonctionnements qui, par définition, ne se signalent pas en avance.

Or, l'obligation de « contrôle humain » fait l'impasse sur cette caractéristique majeure des activités à risque qu'est l'imprévisibilité de leurs dysfonctionnements.
Le dispositif produit ensuite un effet juridique secondaire dont la perversité n'apparaît pas immédiatement.
En donnant du pouvoir aux utilisateurs, le législateur organise aussi les conditions de leur responsabilité. L'histoire paraît ici se répéter. Au XIXe siècle, le législateur avait ainsi tenté de faire peser la responsabilité des dommages causés par les machines à vapeur sur la tête de leurs utilisateurs – à savoir les conducteurs de train et les ouvriers – en prévoyant pour cela des obligations d'installation de manomètres et autres boutons d'arrêt d'urgence, les ancêtres du « contrôle humain » en quelque sorte. Pourtant, le législateur est par la suite revenu en arrière. Non pas pour protéger les utilisateurs, mais pour offrir aux victimes des dommages technologiques des modes crédibles de réparation de leurs préjudices. Comment ? En faisant peser sur les concepteurs, sur les exploitants, ou sur la société tout entière – notamment via des fonds d'indemnisation – les risques liés aux dysfonctionnements techniques (2). Faut-il donc condamner l'obligation de garantie humaine ? Ce serait excessif, car comprendre le fonctionnement d'un outil d'IA reste un objectif louable.

Cette garantie, associée à d'autres mécanismes (assurance obligatoire, procédure de certification), participe à la transparence de ces systèmes. Si elle est toutefois conçue comme une garantie contre la survenance de risques, elle pourrait ne constituer qu'une illusion de protection des utilisateurs de systèmes d'IA. De nouvelles alouettes du numérique, attirées par les feux brillants d'un pouvoir imaginaire sur les machines. ■

(1) tinyurl.com/4zam6f

(2) Jean-Baptiste Fressoz, *L'Apocalypse joyeuse, une histoire du risque technologique*, Seuil, 2012.

Arnaud Latil est spécialiste de droit du numérique. Il est maître de conférences HDR à Sorbonne Université, chercheur au Sorbonne Center for Artificial Intelligence (SCAI).

EFFEBI

LA CHRONIQUE DESSINÉE
Par Boulet

ÉTHIQUE

La chronique de Jean-Gabriel Ganascia

La (très contestable) initiative de Clearview AI pour l'Ukraine

Dès le début des hostilités en Ukraine, la plupart de nos concitoyens éprouvèrent une immense émotion à la vue des bombardements russes et de la tentative d'invasion de ce pays. Beaucoup, en France, en Europe ou outre-Atlantique, souhaitent tout mettre en œuvre pour aider ce peuple à recouvrer sa souveraineté ; aussi approuvent-ils toutes initiatives susceptibles d'aider les Ukrainiens dans leur combat contre leurs agresseurs. L'une d'entre elles retient particulièrement notre attention ici, parce qu'elle fait appel à des technologies modernes, en l'occurrence la reconnaissance faciale, et que cela ne requiert rien d'autre de nous que la copie de nos visages, opération simple, indolore et gratuite : on n'en souffre pas, on ne perd rien non plus – ce qu'on donne se résume à une copie numérique de soi-même ; on conserve l'original, sans l'altérer aucunement – et cela promet un bénéfice assuré pour une cause juste. Dès lors, comment ne pas s'y résoudre ? De toutes les façons, cela se fera sans qu'on nous demande notre avis ! Il y a même de fortes chances que plusieurs copies du visage de chacun des lecteurs et lectrices de cette chronique aient déjà été aspirées sans qu'ils et elles le sachent : il suffit à des robots d'exploiter la Toile et de se saisir des portraits individuels présents sur les réseaux sociaux, les CV ou les « trombinoscopes » mis en ligne. Et si ce n'est pas le cas, ça le sera très bientôt. La société américaine Clearview AI est à l'origine de cette initiative « généreuse ». L'entreprise, fondée avec l'objectif affiché d'aider les autorités, propose de mettre gratuitement ses outils de reconnaissance faciale au service des assiégés, dans leur lutte contre leurs assaillants. Selon un article récent de l'agence de presse Reuters, elle envisage plusieurs emplois de ces technologies. Le premier vise à repérer les Russes infiltrés, possiblement espions ou saboteurs, lors des contrôles policiers. Cela aidera aussi à débusquer d'éventuels auteurs de crimes contre l'humanité lors de procès ultérieurs. Enfin, toujours grâce à ces technologies, on identifiera sans ambiguïté les réfugiés ukrainiens. Soulignons, à ce propos, que la reconnaissance faciale n'identifie pas un individu avec une parfaite certitude ; il risque donc d'y avoir des méprises aux conséquences dramatiques. Une deuxième catégorie d'applications s'applique aux prisonniers russes, en avertissant leurs familles qu'on les détient, en leur permettant de communiquer avec elles, puis en diffusant sur des réseaux sociaux leurs photos, voire des vidéos où ils apparaissent captifs. Enfin, un troisième type d'application, assez macabre, porte sur le corps des soldats russes morts au front. Clearview AI propose de déterminer automatiquement leur identité avec la reconnaissance faciale, puis d'envoyer à leurs familles et amis leur photographie, en vue de les démoraliser. On raconte par exemple le cas d'une mère russe à qui l'on a envoyé l'image de son fils décédé, le corps maculé de boue. Dans le contexte dramatique de cette guerre, les intentions de l'entreprise américaine apparaîtront peut-être salutaires à certains, puisqu'elles promettent au peuple ukrainien assiégé, victime d'attaques sanguinaires, des moyens de se défendre. Ces utilisations de la reconnaissance faciale n'en auraient pas moins des conséquences inadmissibles sur le plan moral.

PIERRE KITMACHER

En découleraient injustices, humiliations, violations des conventions de Genève sur les prisonniers de guerre, instrumentalisation et profanation de l'image des morts : autant de pratiques condamnables qu'on ne saurait cautionner, même dans une situation aussi tragique.
Ces considérations amènent à s'interroger sur la société Clearview AI, sur ses pratiques et sur les procédés qu'elle emploie. Les technologies avancées de reconnaissance faciale recourent à l'apprentissage supervisé pour entraîner des logiciels de classification sur des masses considérables de portraits photographiques, plusieurs pour chacune des personnes que l'on souhaite reconnaître, étiquetés par leur identité. L'algorithme d'apprentissage établit des corrélations entre les traits des visages de ces personnes et leur état civil. À condition qu'il n'existe pas de sosies, c'est-à-dire d'individus très ressemblants, un logiciel ainsi entraîné peut retrouver, avec une faible probabilité d'erreur, l'identité de chacune des personnes présentes dans l'ensemble d'apprentissage à partir de son portrait.

La charité dont l'entreprise américaine se prévaut en Ukraine ne vise qu'à faire écran à la rapine à grande échelle à laquelle elle se livre

LES ACTIONS EN JUSTICE AUX ÉTATS-UNIS, AU CANADA ET EN EUROPE ONT PEU D'EFFETS

Créée en 2017 et financée notamment par Peter Thiel – cofondateur du service de paiement en ligne PayPal, en 1998, puis investisseur précoce de Facebook et directeur de Palantir (société spécialisée dans le recueil et l'analyse de données pour les services de renseignement) depuis 2003 –, Clearview AI accumule les images de visages dans le but d'entraîner par apprentissage supervisé des outils de reconnaissance faciale. Elle collationne ces portraits annotés en aspirant les données disponibles sur les réseaux sociaux ou sur d'autres ressources accessibles en ligne. La société disposait initialement de trois milliards de photographies ; elle affirmait en avoir recueilli plus de dix milliards à la fin 2020 et poursuivre cette accumulation sur un rythme d'un milliard et demi par mois.
Un article, paru à la mi-février dans le quotidien américain *The Washington Post,* annonce l'ambition de cette entreprise : établir d'ici à un an un catalogue « sans frontière » de visages humains comprenant 100 milliards de portraits, ce qui ferait en moyenne treize photographies par individu vivant, en comptant 7,7 milliards d'habitants sur la planète ! Un objectif que devrait lui permettre d'atteindre la levée de fonds que l'entreprise a réalisée l'été dernier (trente millions de dollars), et celle qu'elle entend lancer très bientôt lors d'un troisième tour de table (cinquante millions de dollars espérés). Tout va bien ? Non, car Clearview AI constitue son catalogue sans recueillir le consentement ni des sites où elle trouve les images, ni des personnes concernées, au mépris des différentes lois existant dans le monde. Facebook, Google, Twitter et YouTube lui ont demandé d'arrêter de prendre indûment ces photos et de détruire celles qu'elle emmagasinait.
Aux États-Unis, plusieurs États – la Californie, le Vermont, l'Illinois, l'État de New York et la Virginie – ont lancé des actions en justice contre l'entreprise. Le Canada, la Suède et le Royaume-Uni ont fait de même. L'Australie et la France lui ont ordonné de détruire les photographies de leurs citoyens.
Même si un jugement du 9 mai 2022 l'empêche de commercialiser ses services aux États-Unis, Clearview AI continue à piller la Toile sans vergogne, en exploitant les images de nos visages que nous laissons par inadvertance sur nos sites personnels, sur nos CV accessibles en ligne ou sur les réseaux sociaux.
Pour se dédouaner de ses forfaits et présenter une figure avenante, elle parade en promettant de recueillir les consentements et de secourir les plus démunis, en l'occurrence le peuple ukrainien à l'heure où il est assailli. Or cette prétendue aide militaire se révèle, à l'examen, contre-productive : en l'utilisant, les Ukrainiens perdront leur âme et la sympathie qu'ils inspirent, sans pour autant prendre le dessus sur leurs agresseurs.
On ne lutte pas contre la barbarie par la barbarie.
Au-delà, et pour reprendre le mot d'Arthur Rimbaud dans son recueil de poèmes *Une saison en enfer* (1873), cette charité dont Clearview AI se prévaut aujourd'hui est *« ensorcelée »* : elle ne vise qu'à faire écran à la rapine à grande échelle à laquelle elle se livre.
D'enfer, il est donc bien question ici. Un enfer où nos visages nous sont extorqués sans notre consentement, avant d'être instrumentalisés par-devers nous. Un enfer qui, contrairement à ce qu'affirme le dicton, n'est en fait pavé que de mauvaises intentions. ■

Jean-Gabriel Ganascia est professeur d'informatique à Sorbonne Université.
Les vues exprimées dans cette chronique n'engagent que leur auteur.

▼ *Dans* Skylines, *de Liam O'Donnell (2020), Rosa Corley (jouée par Lindsey Morgan), embarque pour une mission vers un monde extraterrestre, afin de sauver ce qui reste de l'humanité, menacée par un méchant virus.*

La science-fiction regorge d'extraterrestres qui en veulent visiblement beaucoup au genre humain. Y aurait-il des explications biologiques à cette animosité patente ? Passage en revue de quatre hypothèses en compagnie du neurologue Laurent Vercueil.

Pourquoi les aliens ne nous aiment-ils pas ?

Laurent Vercueil
NEUROLOGUE, CHU GRENOBLE-ALPES, *il est également chercheur au Grenoble-Institut des neurosciences (Inserm) et a notamment écrit* La Belle au bois dort-elle vraiment ? Neurophysiologie des contes de fées *(HumenSciences, 2020) ; à paraître :* Neuro-science-fiction, les cerveaux d'ailleurs et de demain (*Le Bélial).*

Les aliens ne nous aiment pas, cela semble une affaire entendue. Depuis les Martiens du roman fondateur *La Guerre des mondes* (H.G. Wells, 1898), en passant par le xénomorphe, huitième passager du film *Alien* (Ridley Scott, 1979), ils semblent nourrir du ressentiment contre les humains. Dans le roman humoristique *Martiens, Go Home!* de l'auteur américain Fredric Brown (1955) ou dans le film *Mars Attacks!* (Tim Burton, 1996), les Martiens sont des nuisibles qui jouissent du mal qu'ils répandent sur la Terre. Pourquoi tant de haine ?
Gardons-nous cependant de trop généraliser, car tous les extraterrestres ne sont pas aussi belliqueux : dans les films *Premier Contact* (Denis Villeneuve, 2016) ou *Rencontres du troisième type* (1975, Steven Spielberg), les extraterrestres semblent animés d'intentions favorables quoique opaques. Dans son film *Avatar* (2009), l'Américain James Cameron dépeint le peuple Na'vi de la planète Pandora comme des écologistes dont les valeurs nous sont familières. Mais pour un inoffensif E.T., combien d'aliens effrayants, guerriers ou prédateurs ? La page Wikipédia qui recense les films mettant en scène des extraterrestres dénombre plus de 600 entrées, échelonnées de 1902 à 2022. Dans cette liste, la recherche (en anglais) des mots « guerre » / « bataille » / « invasion » / « effrayant » / « terreur » dans les titres trouve 94 occurrences (15 % du total), alors que la recherche des mots de sens opposés, tels que « paix » / « accord » / « collaboration » / « cool » / « amical » n'en retrouve que… 3 (soit moins de 0,5 % du total). Évidemment, la tragédie est un moteur efficace de la fiction, comme l'écrivain russe Léon Tolstoï l'a si bien écrit dans *Anna Karénine* (1878) : *« Toutes les familles heureuses le sont de la même manière, les familles malheureuses le sont chacune à leur façon. »* Les scénaristes seraient donc enclins à privilégier la confrontation avec les aliens plutôt qu'une entente sans nuage, qui serait clairement moins favorable à l'exploitation dramatique du récit.
Prenons le parti de suivre le fil qui se propose ici et examinons les raisons possibles de cette détestation et d'un tel déchaînement de violence létale. Comme nous devons admettre que nous ne partageons pas la même Histoire, laquelle aurait pu, le cas échéant, constituer un passif qu'il s'agirait de régler une fois pour toutes, il est plus vraisemblable que les

COLLECTION CHRISTOPHEL © MIRABELLE PICTURES PRODUCTIONS - ARTBOX - FASTEN FILMS - DR

raisons qui motivent cette hostilité trouvent leur origine dans la biologie des aliens, davantage que dans des différends culturels, sociaux ou historiques. On pourrait ainsi dire que les aliens ne nous aiment pas parce que c'est dans leur nature. Autrement dit, cette haine serait câblée dans leur cerveau. Pourquoi donc ?
Première possibilité : les aliens ne nous aiment pas, parce que ce sont des psychopathes. Lorsqu'ils débarquent sur Terre, ils ont des objectifs qui sont, manifestement, contraires à nos intérêts. Cette compétition pour des ressources n'est pas totalement inédite au sein de l'univers connu. Nous sommes même habitués au fait qu'entre les espèces vivantes ou, au sein d'une même espèce, entre les groupes, ou encore, entre les individus au sein des groupes, la rivalité puisse aboutir à une forme de violence. Convoiter de la nourriture, un partenaire sexuel ou une position sociale favorable, expose au règlement du conflit par la brutalité, l'élimination du compétiteur adverse. Pourtant, c'est loin d'être inévitable car il existe des freins à cette violence. Ainsi, l'être humain dispose-t-il d'une capacité à comprendre le comportement de ses semblables en leur prêtant émotions et sentiments.

DEUX EMPATHIES DISTINCTES

L'empathie décrit cette faculté de compréhension d'autrui « par l'intérieur » (par « encorporation », traduction du mot anglais d'*embodiment*). L'empathie n'est pas une capacité exclusivement humaine, car elle est observée dans les comportements des grands singes et chez les mammifères. Et bien que ce soit discuté, aussi chez certaines espèces d'oiseaux, comme la corneille ou le corbeau (1). Elle trouve probablement son origine dans la parentalité et le soin donné aux petits. Plus précisément, les espèces animales présentant l'ensemble de caractéristiques telles qu'une durée de vie individuelle longue, une petite taille de la portée, une immaturité prononcée à la naissance avec une longue dépendance aux soins parentaux, sont celles qui vont le plus développer une aptitude à ces soins, considérée comme la première étape d'une empathie éventuellement généralisable dans les espèces les plus sociales. Les poissons, les reptiles ne prêtent pas d'attention à leur descendance potentielle. Il existe cependant d'autres moyens de communication des états émotionnels – le plus élémentaire étant la contagion émotionnelle – qui sont plus répandus.
L'empathie est distinguée en deux composantes : empathie émotionnelle (ou affective) et

▼ Independence Day, *de Roland Emmerich (1996), raconte l'invasion des extraterrestres, ici au-dessus de Manhattan, dont le but est de piller les ressources terrestres. Ils vont cependant être confrontés à une résistance sans pareille...*

COLLECTION CHRISTOPHEL © 20TH CENTURY FOX

▲ *Illustration tirée du chef-d'œuvre de H.G. Wells,* La Guerre des mondes, *paru au Royaume-Uni en 1898.*

empathie cognitive. Cette dernière repose sur l'existence d'une « théorie de l'esprit », c'est-à-dire la faculté d'identifier chez autrui des contenus mentaux distincts des siens (2). Autrement dit, l'empathie permet de se mettre à la place d'autrui, soit pour comprendre son point de vue (empathie cognitive), soit pour l'éprouver (empathie affective) sans pour autant s'y laisser « embarquer », ce qui est le propre de la contagion. Si les aliens ne nous aiment pas, serait-ce parce qu'ils sont dépourvus d'empathie affective – cette faculté qui rend compte du fait qu'une personne qui souffre et qu'une autre qui l'observe en train de souffrir partagent la même activation au sein d'un réseau de structures cérébrales impliquées dans la composante affective de la douleur (3) ?
L'évolution du système cérébral des aliens pourrait avoir conduit à une dissociation entre ces deux aspects de l'empathie : un déficit dans un domaine qui n'affecterait pas l'autre. Chez les humains, des travaux suggèrent que la psychopathie et l'autisme représentent ces deux pôles opposés : dans l'autisme, l'empathie cognitive est compromise sans altération de l'empathie affective, tandis que le psychopathe exploite sa faculté empathique cognitive pour manipuler et nuire à autrui, sans qu'il soit freiné par une empathie affective qui lui fait défaut. Certaines parties du cerveau ont un rôle majeur dans l'intégration du contexte social pour l'orientation du comportement : privons-le de cortex orbito-frontal, comme dans le cas de Phineas Gage (1823-1860), employé des chemins de fer américains dont une barre à mine a traversé le cerveau, détruisant cette partie située juste au-dessus des orbites, et les freins sociaux aux comportements égoïstes disparaissent. Mais un alien dépourvu de cortex orbito-frontal ne serait pas uniquement un psychopathe vis-à-vis des humains, il serait aussi ingérable pour ses congénères. Comme l'a remarqué le biologiste Stéphane Debove dans son livre *Pourquoi notre cerveau a inventé le bien et le mal* (HumenSciences, 2021) sur les bases naturelles de la morale, les extraterrestres, pour arriver jusqu'à nous, doivent nécessairement mobiliser des facultés collaboratives supérieures. Un peuple de psychopathes n'irait pas bien loin.

UNE DISTANCE PHYLOGÉNÉTIQUE

La deuxième raison à envisager met en jeu le formidable éloignement évolutionnaire qui nous sépare des entités extraterrestres : nous traitons généralement mieux nos proches que les personnes plus éloignées, et mieux les membres de notre propre espèce que les autres. Dans son livre *Face aux animaux* (Odile Jacob, 2022), Laurent Bègue-Shankland, professeur de psychologie sociale à l'université Grenoble-Alpes, raconte comment son équipe a revisité l'expérience de Milgram sur la soumission à l'autorité, afin de voir comment les humains peuvent porter atteinte aux animaux pour des besoins prétendument supérieurs. Il y montre combien nous établissons une frontière idéologique puissante entre les animaux et nous. Dans le même ordre d'idée, des spécialistes de l'évolution ont mesuré, dans une enquête en ligne portant sur 3 500 participants, que le degré d'empathie et de compassion éprouvé pour des êtres vivants était corrélé à la distance phylogénétique établie entre l'espèce en question et les humains. Plus le point de divergence sur l'arbre phylogénétique est éloigné, moins nous ressentons de sentiments pour ces êtres (4).

Notre point de divergence avec les aliens remonte au… Big Bang

Or il faut bien reconnaître que nos aliens explosent les compteurs de la distance phylogénétique, le point de divergence avec eux remontant, pour ainsi dire, au Big Bang…
Cette distance spatiale et génétique pourrait avoir des conséquences plus graves : l'impossibilité de se comprendre ! Examinons une faculté humaine singulière, qui est de prêter à des formes géométriques qui se meuvent et interagissent sur un écran des intentions et des buts qui permettent de les glisser dans la construction d'un récit de leurs activités. C'est l'expérience de psychologie de l'Autrichien Fritz Heider (1896-1988) et de la Germano-Américaine Marianne Simmel (1923-2010), qui remonte à 1944. Cette expérience utilisait un film d'animation rudimentaire, projeté à des spectateurs qui prêtaient à des formes symboliques élémentaires (deux triangles et un rond) des propriétés intelligentes (5).
En 2021, une équipe de

AGENCE MARTIENNE/HENRIQUE ALVIM-CORREA

psychologues américains a analysé le comportement de singes rhésus confrontés à ces vidéos, et a constaté qu'ils n'y accordaient strictement aucun intérêt (6).

L'INCONNAISSABLE ET L'INCOMPRÉHENSIBLE

Ainsi, si les extraterrestres nous voient comme de simples figures mobiles, s'agitant de façon absurde à leur arrivée, il n'y a aucune raison qu'ils comprennent ce qu'ils voient… Là encore, la distance ne plaide pas en faveur d'une compréhension mutuelle. Plusieurs œuvres de science-fiction confrontent l'être humain à l'altérité radicale, celle qui confine à l'inconnaissable. Dans *Émissaire des morts,* le livre du romancier américain Adam-Troy Castro (2008 pour l'édition originale en anglais et 2021, Albin Michel, pour la traduction française), l'humaine Andrea Cort doit enquêter et juger des espèces extraterrestres dont le comportement lui est totalement hermétique. Les voyageurs spatiaux du classique *Rendez-vous avec Rama* (1973) d'Arthur C. Clarke (1917-2008), ou ceux qui vont à la rencontre d'une mystérieuse entité dans *Vision aveugle* (2006), du Canadien Peter Watts, ne comprennent pas ce dont ils ont connaissance. Le titre de ce roman est aussi révélateur que neurologique : la vision aveugle est la possibilité, dans un champ visuel où les informations visuelles ne sont pas traitées consciemment, d'être en mesure de faire néanmoins la preuve d'un traitement de cette information et, par exemple, de se comporter de façon appropriée en fonction de leur présence (7). Ainsi, des sujets porteurs de lésions cérébrales affectant le cortex visuel perdent la possibilité de voir dans la partie opposée de leur champ visuel. Malgré cela, ils peuvent se saisir correctement d'objets qu'ils ne voient pas, comme s'ils avaient néanmoins connaissance de leur situation dans l'espace. En somme, l'inconnaissable et l'incompréhensible ne constituent pas une barrière infranchissable, peut-être grâce à d'autres canaux véhiculant des messages de façon non explicite. Lesquels ? Par exemple, l'olfaction.

L'olfaction, un sens pour véhiculer des messages implicites largement sous-estimé

Cette idée du canal olfactif nous amène à une troisième hypothèse : se pourrait-il que les extraterrestres ne nous aiment pas parce qu'ils ne peuvent pas nous sentir, autrement dit qu'ils ne perçoivent pas nos odeurs ? L'importance de l'olfaction a resurgi lors d'épisodes d'anosmie entraînés par le Covid-19, où l'on s'est rendu compte de l'épreuve que constitue la perte de l'odorat, y compris chez une espèce – la nôtre – où l'importance de ce sens a été largement sous-estimée, voire dévalorisée. Nous pourrions alors redécouvrir les facultés de l'olfaction,

Les raisons de détruire l'humanité

La nouvelle *Pour servir l'homme* (1950), de l'Américain Damon Knight (1922-2002), met en scène l'arrivée sur Terre d'une race extraterrestre très évoluée qui paraît d'abord aider les humains, avant qu'un traducteur ne s'aperçoive que le guide « Pour servir l'homme » des aliens est en fait un manuel… de cuisine. Les raisons des extraterrestres de détruire notre planète et le genre humain entrent le plus souvent dans des catégories délimitées : supplanter la vie humaine, asservir le genre humain, s'en nourrir, accaparer les ressources terrestres… Des scientifiques américains ont même imaginé que des aliens pas forcément méchants puissent détruire la Terre pour protéger d'autres civilisations galactiques (1). Dans un genre plus humoristique, l'auteur britannique Douglas Adams (1952-2001) fait disparaître la Terre pour laisser place à une autoroute astrale. Le personnage Arthur Dent est l'un des seuls Terriens à réchapper à la catastrophe et ses aventures sont égrenées dans le *Guide du voyageur galactique* (1978). Mais cette idée de destruction n'a jamais été aussi bien explorée qu'à rebours, dans le chef-d'œuvre de Ray Bradbury (1920-2012), *Chroniques martiennes* (1950), lorsque des Terriens veulent explorer Mars : l'expédition aboutit, à force de difficultés, à la disparition d'une ancienne civilisation martienne, avant que les Terriens ne détruisent aussi la Terre.

Ph.P.

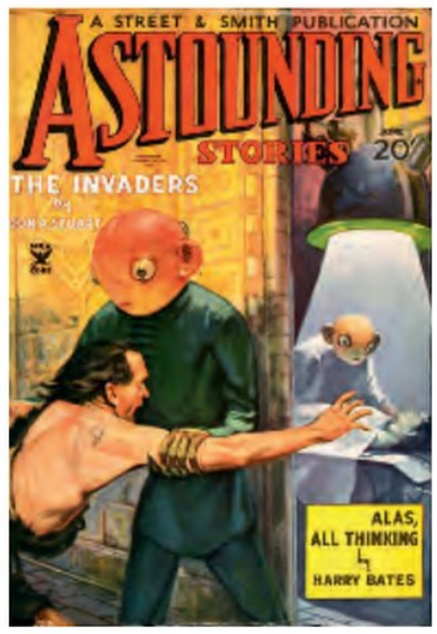
(1) S. D. Baum *et al., Acta Astronaut., 68,* 2114, 2011.

notamment comme sens porteur de messages subtils, influenceurs discrets de nos comportements. Les travaux de l'équipe du neurobiologiste Noam Sobel, de l'Institut Weizmann des sciences, à Tel-Aviv (Israël), exaltent le rôle important de nos odeurs naturelles dans la communication sociale. Son équipe a d'abord recueilli les larmes émises par des femmes qui regardaient un film triste. Puis des sujets masculins ont été invités à respirer un tissu imprégné de ces larmes tandis que de nombreux indicateurs biologiques étaient mesurés, y compris leur activité cérébrale (8). Résultat : les messagers odorants contenus dans les larmes féminines réduisaient les taux de testostérone et le niveau d'éveil sexuel, suggérant que le risque d'agression était substantiellement réduit. Alors, que se passerait-il si les aliens n'étaient pas réceptifs à l'odeur de nos larmes ? Probablement rien de bon pour nous…

DES ALIENS IMMATURES ?

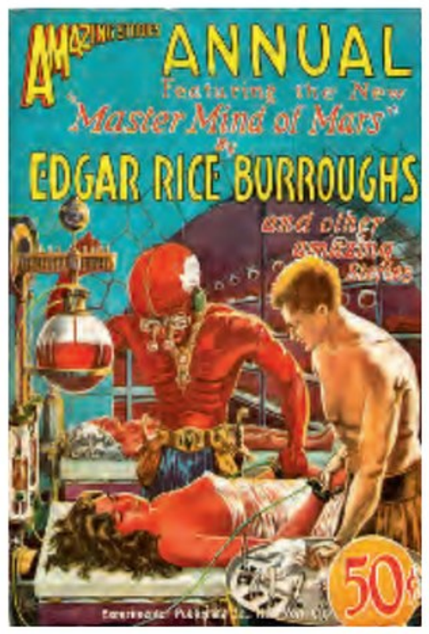
Reste à examiner une ultime éventualité, encore plus inattendue : les aliens ne nous aiment pas, parce qu'ils sont immatures. Après la description des Martiens tentaculaires par H.G. Wells dans *La Guerre des mondes* (1898), une tendance s'est fait jour aux États-Unis, au cours des années 1920-1930, dans les magazines de fiction bon marché (les « pulp ») : mettre en scène des Martiens humanoïdes, bipèdes de couleur grise ou verte, dotés de grosses têtes. Ces crânes surdimensionnés devraient témoigner de facultés cognitives supérieures, d'une intelligence incommensurable à la nôtre (lire *La Recherche* n°566, juillet-septembre 2021, p. 140). Mais il pourrait s'agir de tout à fait autre chose. Cette disproportion du crâne

LES « PULP », MAGAZINES OVNIS



▲ *Couverture de* Astounding Stories, *ou histoires stupéfiantes, paru en 1935.*

▲ *Carte à collectionner sur le thème de* Mars Attacks!, *éditée en 1962.*



▲ Couverture de l'illustrateur américain Frank R. Paul pour Amazing Stories (1927).

refléterait leur caractère immature et la nécessité de poursuivre le développement cérébral hors du ventre maternel (ou ce qui pourrait en tenir lieu). Ainsi la tête du petit humain est-elle proportionnellement plus grosse que celle de l'adulte, ce ratio diminuant à mesure du développement. Chez l'être humain, la tête représente le quart de la taille totale du corps à la naissance, puis un sixième à 6 ans, un septième à 12 ans et un huitième environ chez l'adulte. Si l'on prend les Martiens de *Mars Attacks!* et que nous appliquons notre réglette à mesure humaine, la proportion de la tête rapportée à leur taille totale est située à près de 25 %, soit un âge inférieur à 2 ans ! Comment ne pas comprendre qu'ils fassent vraiment n'importe quoi ? Mais que font les parents ?
Et si toutes ces hypothèses n'étaient pas mutuellement exclusives ? Et si les extraterrestres de nos fictions étaient à la fois immatures, psychopathes, incapables de nous comprendre et de nous sentir ? Des êtres dénués de compassion et d'empathie, manipulateurs et indifférents à nos messages sociaux, explicites ou implicites ? Tout cela, pour la simple et bonne raison qu'en tant qu'aliens, ils ne partagent avec nous aucune proximité génétique et que, dans leurs noyaux cellulaires (si tant est qu'ils en possèdent), aucune trace d'ADN humain n'est présente.
Dans ce cas, il ne faut pas leur en faire reproche : c'est bien dans leur nature de ne pas nous aimer.
D'autant que les raisons pour les aliens de nous en vouloir sont sans doute plus nombreuses encore : sommes-nous vraiment irréprochables ? Les causes éventuelles d'un désamour envisagées ici ne constituent probablement qu'une petite part du passif accumulé depuis le Big Bang. Tâchons donc d'améliorer un peu notre image de marque… ■

(1) J.E.C. Adriaense *et al.*, *PNAS, 116,* 11547, 2019.
(2) D. Premack et G. Woodruff, *Behav. Brain Sci., 1,* 515, 1978.
(3) T. Singer *et al.*, *Science, 303,* 1157, 2004.
(4) A. Miralles *et al.*, *Sci. Rep., 9,* 19555, 2019.
(5) F. Heider et M. Simmel, *Am. J. Psychol., 57,* 243, 1944.
(6) J. L. Schafroth *et al.*, *Sci. Rep., 11,* 3050, 2021.
(7) L. Weiskrantz *et al.*, *Brain, 97,* 709, 1974.
(8) S. Gelstein *et al.*, *Science 331,* 226, 2011.

COLL. MAISON D'AILLEURS / AGENCE MATIENNE - AGENCE MATIENNE © THE TOPPS COMPANY, INC. - COLL. MAISON D'AILLEURS / AGENCE MARTIENNE

Abonnez-vous à La Recherche

et recevez

4 numéros trimestriels
EN VERSION PAPIER

+

PLUS DE 25% DE RÉDUCTION

L'ACCÈS À LA VERSION NUMÉRIQUE
de ces 4 numéros

BULLETIN D'ABONNEMENT
À compléter et à renvoyer sous enveloppe affranchie à : La Recherche, Service abonnements 45, avenue du Général Leclerc - 60643 Chantilly Cedex

La Recherche

OUI, je m'abonne pour 1 AN à La Recherche soit 4 numéros trimestriels en version papier et numérique pour 29 € au lieu de ~~39,60€~~*. **Je réalise plus de 10 € d'économie.**

J'indique ci-dessous mes coordonnées : ☐ M. ☐ Mme ☐ Mlle

PLRC 570

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 La Recherche.**

Mon mode de règlement :

Je règle par :

☐ **Chèque bancaire ou postal à l'ordre de 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 €. Offre réservée exclusivement aux nouveaux abonnés résidant en France métropolitaine. 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 La Recherche, sont responsables de traitement et collectent 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:** Dorothée Nolan • **Ont collaboré à ce numéro:** Bruno Bourgeois, Sophie Ceugniet, Mehdi Harmi, Léna Hespel, Kristel Pierre • **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 marketing direct:** Armelle Behelo • **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: PHILIPPE CLÉMENT/ARTERRA/GAMMA RAPHO ET JEAN BERNARD/BRIDGEMAN IMAGES - PORTRAIT P. GLUCKMAN : INTERNATIONAL SCIENCE COUNCIL - PORTRAIT G. LAGACHE : YOHANNE LAMOULÈRE/TENDANCE FLOUE

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.

TSF JAZZ, LA RADIO 100% JAZZ ET LE CHÂTEAU DE CHANTILLY PRÉSENTENT

TSF JAZZ CHANTILLY FESTIVAL

MELODY GARDOT
IBRAHIM MAALOUF
MICHEL PORTAL - MP85
RHODA SCOTT LADY ALL STARS
ROBERTO FONSECA
CIMAFUNK
KENNY GARRETT
GEORGE CABLES
BELMONDO QUINTET
CYRILLE AIMÉE
TCHAVOLO SCHMITT
THE AMAZING KEYSTONE BIG BAND
EMMET COHEN
BIG IN JAZZ COLLECTIVE
JEANNE MICHARD
HOT SUGAR BAND

SAMEDI 2 ET DIMANCHE 3 JUILLET 2022

MIDI > MINUIT

PARC DU CHÂTEAU DE CHANTILLY

Billetterie et renseignements :
www.tsfjazzchantillyfestival.com

Concert d'ouverture
vendredi 1er Juillet
ABDULLAH IBRAHIM SOLO

Château de Chantilly
INSTITUT DE FRANCE

OFFICE DE TOURISME
CHANTILLY-SENLIS

Avec le soutien de

Vive le Jazz

YAMAHA

Libération

france•tv

Télérama

LES 32 SCIENTIFIQUES QUI ONT PARTICIPÉ À CE NUMÉRO

Anne Augereau, *néolithicienne*, Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap), Paris
Denis Bartolo, *physicien,* École normale supérieure de Lyon
Amélie Chardac, *physicienne,* université Brandeis, États-Unis
Jérémy Choin, *généticien,* postdoctorant à l'Institut Pasteur (Paris) dans l'unité de génétique évolutive humaine (CNRS)
Laurent Coulon, *égyptologue,* directeur de l'Institut français d'archéologie orientale du Caire (IFAO), Égypte
Isabelle Crevecoeur, *paléoanthropologue,* chargée de recherche CNRS, laboratoire PACEA, Bordeaux
Éric Crubézy, *anthropobiologiste*, professeur d'anthropobiologie évolutive à l'université Toulouse III – Paul-Sabatier
Nicolas Curien, *mathématicien*, professeur, université de Paris-Saclay
Marie Dégremont, *chercheuse associée au Centre de sociologie des organisations,* Institut d'études politiques, Paris
Valérie Delattre, *archéo-anthropologue,* Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap), Paris
Manuela Filippa, *docteure en psychologie,* université de Genève, Suisse
Laurent Frantz, *paléogénéticien,* professeur de paléogénomique à la faculté de médecine vétérinaire Louis-et-Maximilien de Munich, Allemagne
Carole Fritz, *archéologue,* directrice de recherche CNRS, responsable du Centre de recherche et d'études de l'art préhistorique Émile-Cartailhac (CREAP), Toulouse
Jean-Gabriel Ganascia, *informaticien,* professeur, Sorbonne Université, Paris
Peter Gluckman, président du Conseil international des sciences, Paris
Christophe Godin, *informaticien,* directeur de recherche Inria, université Claude Bernard Lyon 1
Jean-Jacques Hublin, *paléoanthropologue,* Collège de France, Paris
Klervia Jaouen, *archéogéochimiste,* chargée de recherche CNRS, laboratoire Géosciences environnement Toulouse
Jacques Jaubert, *archéologue*, professeur, université de Bordeaux
Guilaine Lagache, *astronome*, laboratoire d'astrophysique de Marseille
Arnaud Latil, *spécialiste de droit immatériel,* maître de conférences à Sorbonne Université, chercheur au Sorbonne Center for Artificial Intelligence (SCAI), Paris
Béatrice Ledésert, *géologue*, professeur, CY Cergy Paris université
Lysianna Ledoux, *préhistorienne,* université de Bordeaux
Anne Lehoërff, *archéologue,* professeur, CY Cergy Paris université
Diyendo Massilani, *généticien,* Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, Leipzig, Allemagne
François Parcy, *biologiste,* directeur de recherche, CNRS, université Grenoble-Alpes
Stéphane Peyrégne, *généticien,* Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, Leipzig, Allemagne
Lluis Quintana-Murci, *généticien,* directeur de l'unité de génétique évolutive humaine (CNRS) de l'Institut Pasteur, Paris
Théo Tecail, *archéogéochimiste,* postdoctorant à l'université Gutenberg de Mayence, Allemagne.
Boris Valentin, *préhistorien,* professeur à l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Laurent Vercueil, *neurologue,* CHU de Grenoble-Alpes
Bruno Wilhelm, *paléohydrologue,* Institut des géosciences de l'environnement, Grenoble

DANS LE PROCHAIN NUMÉRO, RETROUVEZ NOTRE
GRAND DOSSIER « RÉEL ET RÉALITÉ »
SORTIE LE 15 SEPTEMBRE 2022

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

148 pages
Trimestriel

L 13412 - 570 - 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