

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

MICROBIOLOGIE
**CANNIBALISME
CHEZ LES
BACTÉRIES**

PHYSIQUE
**INTRICATION
QUANTIQUE : DES
TESTS SANS FAILLE**

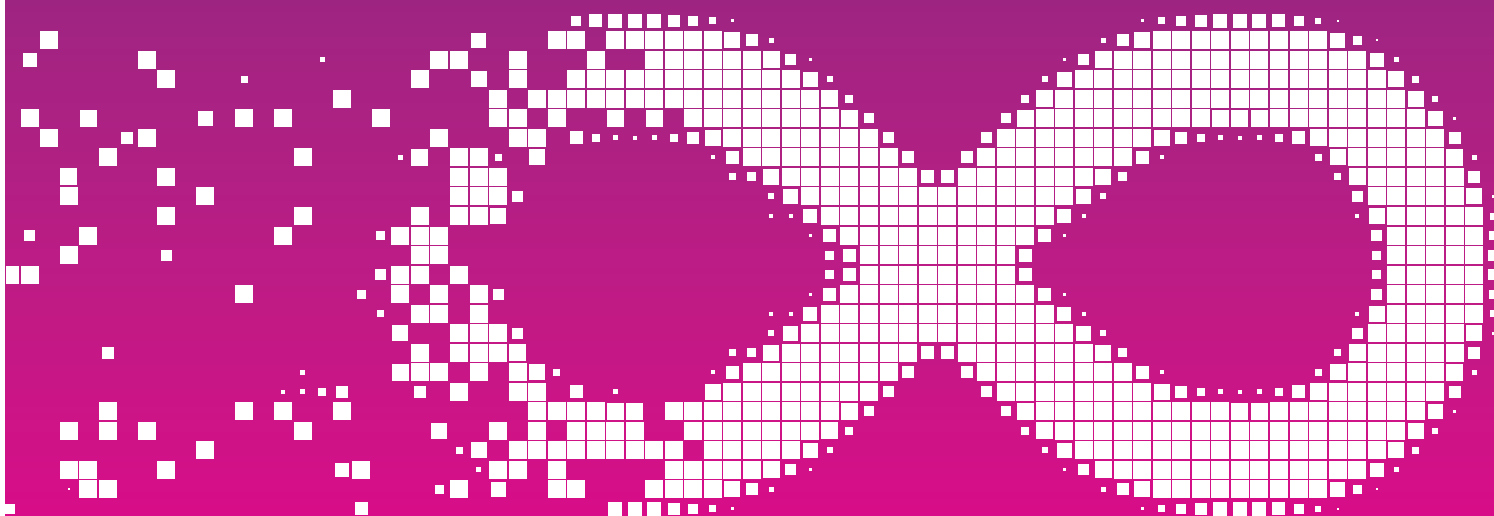
HISTOIRE DES SCIENCES
**DES NATURALISTES
SUR LES TRACES
DE LA NEIGE ROUGE**

M 02687 - 504 - F: 6,90 € - RD

OCTOBRE 2019
N° 504

VERS UNE NOUVELLE THÉORIE DE L'INFINI

**L'hypothèse du continu
bientôt prouvée?**





**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

LES VÉRITÉS MATHÉMATIQUES NE SONT PAS TOUTES IMMUABLES

On peut aimer les mathématiques pour des raisons diverses: pour leur côté ludique, pour leur utilité dans les sciences et la technologie, pour la rigueur des raisonnements, pour la beauté des démonstrations... Beaucoup les aiment pour une caractéristique fort rassurante dans un monde si instable: la permanence des théorèmes et autres résultats produits par cette discipline. Contrairement aux autres sciences comme la physique, où une théorie peut être remplacée par une autre, plus fidèle à la réalité et fondée sur des concepts très différents, les mathématiques apportent en effet des vérités éternelles, comme: «Il existe une infinité de nombres premiers» ou: «La relation de Pythagore s'applique à tout triangle rectangle».

Il convient cependant de nuancer. Bien que les mathématiques soient aujourd'hui assises sur des systèmes d'axiomes bien solides, les logiciens ont démontré que dans toute théorie axiomatique assez puissante pour englober l'arithmétique usuelle, on peut formuler des énoncés indécidables, c'est-à-dire dont la théorie ne peut ni prouver qu'ils sont vrais, ni prouver qu'ils sont faux.

Ces énoncés indécidables ne sont généralement pas gênants, mais l'une des exceptions est «l'hypothèse du continu». Elle stipule qu'entre l'infini le plus petit, celui des nombres entiers, et l'infini des nombres réels, il n'existe pas d'intermédiaire. Or certains mathématiciens refusent d'admettre que l'hypothèse du continu soit indécidable. Ils cherchent donc à étendre le système axiomatique à la base des mathématiques de telle façon que cet énoncé, ou sa négation, puissent être prouvés. Comme Jean-Paul Delahaye l'explique dans ce numéro (voir pages 26 à 36), les travaux récents de l'Américain Hugh Woodin sur les grands ensembles infinis laissent penser que l'objectif est à notre portée. S'il est atteint, l'hypothèse du continu deviendra vraie... tandis que son indécidabilité deviendra fausse. Peut-être plus important encore, une nouvelle théorie de la hiérarchie des infinis s'imposera. ■

SOMMAIRE

N° 504 /
Octobre 2019

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Des ondes cérébrales dans des minicerveaux
- Climat et sols, la synergie des solutions
- La tectonique des plaques a plus de 3,3 milliards d'années
- La cochlée indique le sexe
- Un cycle en pur carbone
- Le crâne du supposé ancêtre de notre ancêtre présumé
- Comment les bactéries se réveillent
- Des humains à haute altitude
- Algue-champignon, une symbiose inédite
- La valse des gouttes supermarcheuses
- Deux capes d'invisibilité contre les vagues

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Internet a cinquante ans

Gilles Dowek

P. 24

QUESTIONS DE CONFIANCE

Le futur du passé est-il assuré?

Virginie Tourney

GRANDS FORMATS



P. 38

BIOTECHNOLOGIES

UNE VIDÉO STOCKÉE DANS L'ADN

James E. Dahlman

Un cheval au galop enregistré dans l'ADN d'une bactérie, c'est possible! Dispositif de stockage numérique, outil de gestion de données lors d'expériences, code-barres... l'ADN endosse des rôles de plus en plus variés.



P. 52

PHYSIQUE

DES TESTS SANS FAILLE DE L'INTRICATION QUANTIQUE

Ronald Hanson et Krister Shalm

L'étrange influence à distance à l'œuvre dans l'intrication quantique s'expliquerait-elle par l'existence de variables cachées respectant un principe de localité? Réponse donnée par des expériences récentes: définitivement non!



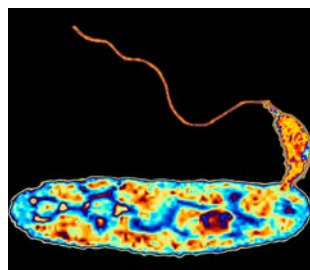
P. 46

PSYCHOLOGIE

LE GRAND MÉNAGE DE LA PSYCHOLOGIE

François Maquestiaux

Non, vous ne vivrez pas plus longtemps si vous souriez sur les photographies. Non, tenir un crayon entre les dents ne modifie pas votre jugement... Nombre de conclusions d'études menées en psychologie doivent être soumises à un examen plus approfondi. Depuis quelques années, les chercheurs de cette discipline s'y attellent.



P. 62

MICROBIOLOGIE

CES BACTÉRIES QUI EN DÉVORENT D'AUTRES

Stéphan Jacquet et Jade Ezzedine

Dans les profondeurs des grands lacs de montagne et ailleurs, des bactéries se nourrissent de leurs semblables avec une efficacité redoutable. Nommées Balo, ces bactéries prédatrices offrent une alternative prometteuse aux antibiotiques.



POUR LA
SCIENCE.FR

LETTRE D'INFORMATION

NE MANQUEZ PAS
LA PARUTION DE
VOTRE MAGAZINE
GRÂCE À LA NEWSLETTER

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque

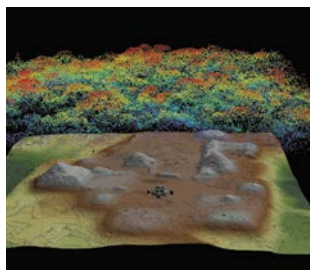


Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr



En couverture :
© Shutterstock.com/Aha-Soft

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot



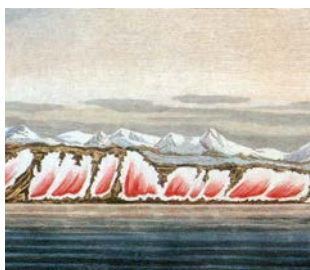
P.72

ARCHÉOLOGIE

LES PRÉCOLOMBIENS DÉNOMBRÉS AU LIDAR

William E. Carter,
Ramesh Shrestha
et Juan Carlos Fernández Díaz

Grâce à la technique du lidar aéroporté, les archéologues repèrent et cartographient des sites précolombiens cachés par une épaisse forêt. Ce qui permet de mieux quantifier les populations du passé.



P.80

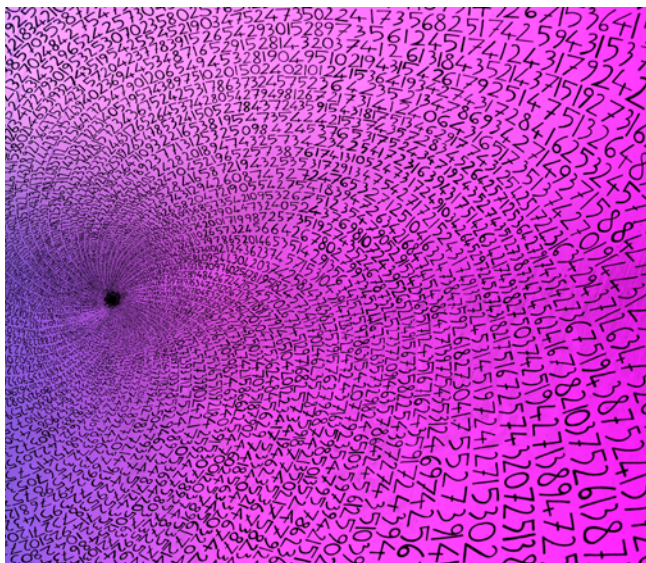
HISTOIRE DES SCIENCES

ROUGE... COMME NEIGE

Frédérique Rémy

Des champs de neige rouge dans les montagnes, des averses pourpres, des traces sanglantes de pas sur un tapis neigeux immaculé... Au XIX^e siècle, les savants multipliaient les hypothèses et les études pour comprendre cet étrange phénomène, élucidé il y a peu.

À LA UNE



P.26

MATHÉMATIQUES

EN FINIR AVEC L'HYPOTHÈSE DU CONTINU

Jean-Paul Delahaye

L'existence ou non d'un infini intermédiaire entre celui des nombres entiers et celui des nombres réels est une question que les mathématiciens et les logiciens pensaient impossible à trancher. Mais l'Américain Hugh Woodin est d'un avis contraire. Et ses travaux récents indiquent une voie possible pour résoudre cette énigme centrale posée par l'infini.

RENDEZ-VOUS

P.86

IDÉES DE PHYSIQUE
LA CLÉ
DES CHAMPS FORTS

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P.90

ART & SCIENCE
LE CORAIL FAIT
DANS LA DENTELLE

Loïc Mangin

P.92

CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION
LA MYXINE,
UN VERTÉBRÉ
SANS VERTÈBRES ?

Hervé Le Guyader



P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE
DES ÉMULSIONS
PLUS PARFUMÉES

Hervé This

P.98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

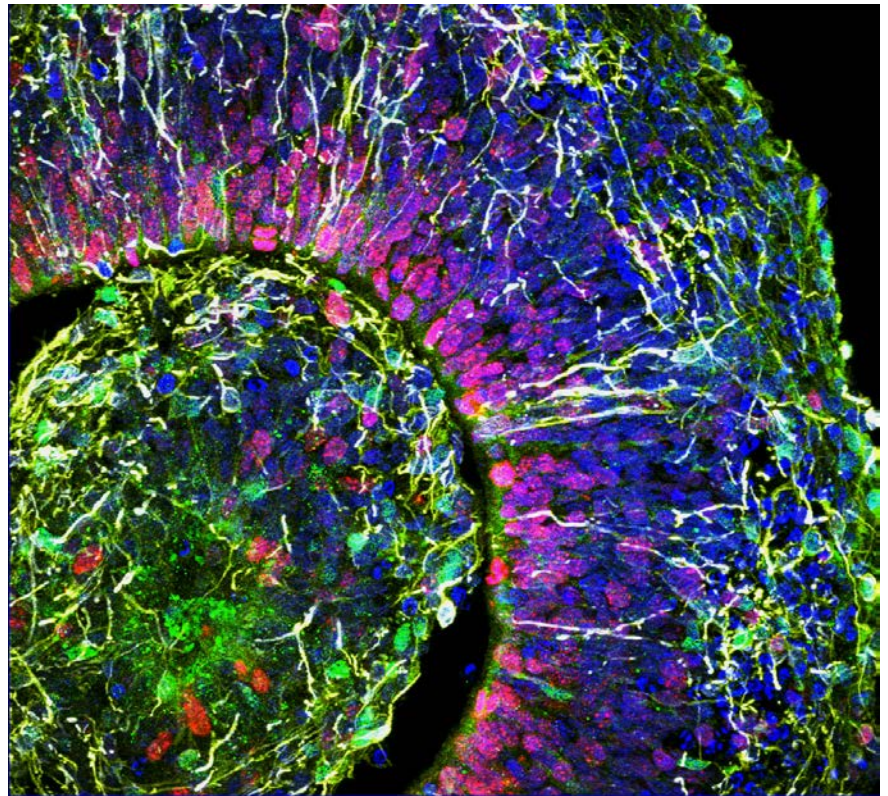
P.20 Agenda

P.22 *Homo sapiens informaticus*

P.24 Questions de confiance

NEUROSCIENCES

DES ONDES CÉRÉBRALES DÉTECTÉES DANS DES MINICERVEAUX



Coupe d'un organoïde cérébral. Chaque couleur marque un type différent de cellules cérébrales.

Grâce à une nouvelle méthode de croissance de cellules souches, des chercheurs ont obtenu un réseau de neurones assez complexe pour produire des ondes cérébrales.

Avec ses quelque 86 milliards de neurones, le cerveau est un organe particulièrement difficile à étudier. Une solution est de procéder sur un système simplifié contenant moins de neurones. En 2013, l'équipe de Madeline Lancaster, de l'Institut de biotechnologie moléculaire, à Vienne, en Autriche, a produit *in vitro* à partir de cellules souches humaines des cerveaux miniatures, aussi nommés organoïdes cérébraux.

Si ces cerveaux de laboratoire sont très utiles aux chercheurs, on n'y avait

jusqu'à présent jamais observé d'activité sous la forme d'ondes électriques. C'est désormais chose faite. Alysson Muotri, de l'université de Californie à San Diego, et son équipe ont amélioré les techniques de production des organoïdes et ont constaté l'apparition spontanée, après une certaine durée de développement, d'ondes cérébrales similaires à celles observées dans le cerveau de bébés prématurés.

Dans le cerveau des prématurés, l'activité électrique présente des motifs chaotiques. Mais ce qui se passe avant, c'est-à-dire la façon dont émerge et se met

en place une activité neuronale complexe, restait hors de portée. Par ailleurs, si des travaux sur des rongeurs ont permis d'observer l'activité dans des cerveaux jeunes, la question de l'extrapolation au cas des cerveaux humains se pose.

Les organoïdes cérébraux offrent une piste intéressante pour étudier de telles questions. De la taille d'un petit pois, ils sont obtenus à partir de cellules souches humaines pluripotentes. Placées dans un milieu qui reproduit les conditions dans lesquelles se développe le cerveau, ces cellules se différencient et forment des neurones qui s'autoorganisent dans une structure tridimensionnelle. On obtient alors une version réduite et simplifiée d'un cortex humain (zone du cerveau impliquée dans la cognition et l'interprétation de

l'information sensorielle). Par rapport aux travaux antérieurs menant à des minicerveaux sans activité électrique, l'équipe d'Alysson Muotri a perfectionné la technique, ce qui lui a permis de suivre pendant dix mois les centaines d'organoïdes produits.

Les chercheurs ont d'abord montré que les organoïdes présentaient les mêmes types de cellules et dans les mêmes proportions que des cerveaux humains au même stade de développement. Ils ont aussi suivi l'activité électrique des organoïdes en utilisant des réseaux multiélectrodes. En quelques mois, les minicerveaux ont produit une activité jamais observée auparavant sur de tels systèmes: des motifs électriques chaotiques à une seule fréquence, des signaux que l'on observe également dans le cerveau immature de bébés nés prématurément. Ces signaux sont ensuite devenus plus réguliers et plus riches en termes de fréquences. Une transition qui suggère que les minicerveaux continuent de se développer en augmentant le nombre de leurs connexions neuronales.

Les chercheurs ont ensuite mis au point un programme d'apprentissage profond pour étudier le développement des minicerveaux. Ils ont utilisé en guise de référence l'enregistrement des ondes cérébrales de 39 bébés nés six à neuf mois après la conception. En analysant les signaux des organoïdes à différents stades de développement, l'algorithme était en mesure de prédire le niveau de maturité des minicerveaux. Cela confirme que les cerveaux humains et les minicerveaux ont un développement comparable. Ces derniers seraient donc des modèles très intéressants pour étudier le développement du cerveau, mais aussi des pathologies telles que la maladie d'Alzheimer, les épilepsies ou l'autisme, ou pour tester des médicaments.

Malgré ce progrès certain, les organoïdes restent des modèles rudimentaires et très éloignés de la complexité du cerveau humain. Ces travaux sur les minicerveaux soulèvent par ailleurs des questions éthiques: à partir de quand un minicerveau présentant une activité cérébrale peut-il être considéré comme conscient? On est encore loin d'en savoir assez sur le cerveau pour répondre à cette épineuse interrogation. ■

SEAN BAILLY

C. A. Trujillo et al., *Cell Stem Cell*, vol. 25, pp. 1-12, 2019

Climat et sols, la synergie des solutions

En août dernier, le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a publié un rapport spécial portant sur l'évolution des terres émergées, en lien avec l'activité humaine et le réchauffement climatique. Nathalie de Noblet-Ducoudré, une des auteurs principaux de ce rapport, nous présente quelques-unes de ses conclusions.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

NATHALIE DE NOBLET-DUCOUDRÉ
directrice de recherche
du CEA au laboratoire
LSCE, à Gif-sur-Yvette

Pourquoi se focalise-t-on dans ce rapport sur les seules terres émergées ?

La question du réchauffement climatique touche l'ensemble du globe, mais les terres émergées correspondent à nos lieux de vie, à nos sources principales d'approvisionnement en eau et en nourriture.

L'homme occupe ou exploite plus de 70 % de ces terres (non englacées). Et près de 25 % des terres émergées sont aujourd'hui dégradées, c'est-à-dire qu'elles ont perdu la faculté de se restaurer ou de produire de la nourriture, du bois, etc. Cette évolution négative des sols tient beaucoup plus à l'activité humaine qu'à l'augmentation des températures, mais le rôle du changement climatique s'amplifiera dans les années à venir.

Il était nécessaire de faire le point des connaissances dans ce domaine. Cela a pris la forme d'un projet ambitieux mené en seulement 22 mois avec une approche transverse et pluridisciplinaire, dans laquelle près de 7 000 articles scientifiques ont été analysés. En se concentrant sur quatre axes : la désertification, la dégradation des sols, la sécurité alimentaire et l'atténuation du réchauffement climatique. Nous avons fait un état des lieux sur ces points puis nous avons évalué les solutions proposées pour résoudre chacun de ces problèmes. Enfin, ce qui est vraiment original, nous avons étudié les conséquences sur les autres axes de chaque solution envisagée.

Que montre l'évaluation des solutions ?

Une conclusion forte du rapport est que chaque solution appliquée pour traiter un axe contribue en général de façon positive aux autres axes. Par ailleurs, une bonne solution doit prendre en compte trois aspects essentiels : la contextualisation (une même solution n'est pas valable

partout), la diversification (plutôt que la monoculture) et l'adoption du « local » (utiliser des plantes qui poussent déjà dans la région).

L'agroécologie et l'agroforesterie (modes d'exploitation des terres agricoles associant des arbres et des cultures ou de l'élevage) offrent des outils et des approches diversifiées qui répondent à ces différents critères et s'inscrivent dans une exploitation durable des sols.

Que dit le rapport en matière de sécurité alimentaire ?

Le chiffre le plus important à cet égard est que 25 % de la production est perdue ou gaspillée. Si l'on pouvait limiter cet effet, c'est autant de terres que l'on utiliserait pour la reforestation, par exemple. Dans les pays développés, le gaspillage prédomine, avec une surconsommation marquée. C'est un problème sur lequel nous devons agir à tous les échelons dans la société.

Dans les pays en développement, ce sont les pertes qui pèsent le plus dans le bilan. Mais des solutions techniques existent. La résolution du problème passe donc par des moyens et une volonté politique de transférer le savoir-faire et les technologies.

Que faut-il retenir d'autre du rapport ?

La première chose à faire est de limiter au maximum les utilisations des sols qui contribuent aux émissions de dioxyde de carbone (déforestation, assèchement des marais, etc.). Par ailleurs, il faut agir maintenant : plus on attend, plus le réchauffement climatique et la dégradation des sols augmentent. Certaines régions pourraient atteindre des points de non-retour et il deviendra trop difficile de réhabiliter ces espaces.

Les auteurs du rapport ont ainsi déterminé que le coût qu'entraînera l'inaction dépasse de un à deux ordres de grandeur celui des actions immédiates. Le monde économique et financier doit donc prendre la mesure de ces conclusions : il faut investir maintenant. ■

Le rapport du Giec sur climat et sols : <https://www.ipcc.ch/report/srcc/>

GÉOSCIENCES

LA TECTONIQUE DES PLAQUES A PLUS DE 3,3 MILLIARDS D'ANNÉES

Des roches volcaniques attestent que le recyclage des plaques tectoniques était déjà actif il y a 3,3 milliards d'années, plus tôt qu'on ne le pensait.

Elle remodèle sans arrêt le visage de la Terre: la tectonique des plaques déplace depuis des milliards d'années les continents les uns par rapport aux autres, modifiant la géographie, donc le climat et le monde vivant. Mais dater sa mise en place se révèle délicat. Alexander Sobolev, de l'institut des sciences de la Terre (ISTerre), à Grenoble, et ses collègues apportent de nouveaux indices montrant que ce processus était déjà à l'œuvre au Paléoarchéen (il y a entre 3,6 et 3,2 milliards d'années), 600 millions d'années plus tôt qu'on ne l'estimait précédemment.

Les chercheurs ont étudié des komatiites trouvées à Barberton, en Afrique du Sud, et formées il y a 3,3 milliards d'années. Ces roches volcaniques résultent du refroidissement de magma issu de la fusion de roches du manteau et remontant vers la surface sous la forme de panaches très chauds. Alexander Sobolev et ses collègues se sont intéressés à la chimie des inclusions vitreuses contenues dans ces komatiites pour connaître les conditions de leur formation. Alors que le magma s'est lentement refroidi en cristallisant sous la forme de minéraux, ces derniers ont parfois piégé des gouttelettes de magma qui sont passées très vite à l'état solide, formant ainsi les inclusions vitreuses.

Lors de leur analyse, les géologues ont trouvé que les roches mantelliques à l'origine de ces komatiites présentaient un excédent d'eau par rapport à ce qui était attendu pour le manteau à cette époque dans les modèles classiques d'évolution de la planète. La présence d'eau en excès en profondeur serait révélatrice d'une tectonique active: une croûte océanique hydratée aurait plongé dans le manteau (on parle de subduction) où elle se serait déshydratée, principalement au niveau du manteau supérieur, mais aussi plus profondément, dans la zone de transition entre le manteau supérieur et inférieur (entre 400 et 600 kilomètres de profondeur), où le magma commence à se former.

Pour s'assurer que l'eau en excès provient de la plongée d'une plaque tectonique, les chercheurs ont étudié la composition des inclusions en isotopes légers (H) et lourds (D) de l'hydrogène. Dans les inclusions des komatiites, le rapport D/H est plus faible que celui du manteau



Produit d'une fusion à température élevée de roches du manteau terrestre, les komatiites (ici l'une d'elles en gros plan) renseignent sur la composition ancienne de celui-ci.

1 700 °C

C'EST LA TEMPÉRATURE MINIMALE DES PANACHES NÉCESSAIRE POUR FORMER DES KOMATIITES. AVEC LE REFROIDISSEMENT DE LA TERRE, LES ÉRUPTIONS MAGMATIQUES NE PRODUISENT PLUS DE KOMATIITES DEPUIS 2,4 MILLIARDS D'ANNÉES.

paléoarchéen, et correspond à celui d'une croûte plongeante arrivée dans la zone de transition. Enfin, les géologues y ont trouvé des concentrations élevées de chlore, caractéristique de roches altérées par l'eau de mer.

À partir de tous ces indices, les chercheurs ont reconstitué le scénario à l'origine des komatiites de Barberton. Il y a 3,3 milliards d'années, un panache de roches très chaudes, en provenance du manteau profond, est remonté jusqu'à la zone de transition, où les roches ont partiellement fondu. Dans cette zone, la composition du manteau était modifiée par l'apport d'eau et de chlore d'une plaque tectonique plongeante. Ces éléments ont été entraînés par le magma du panache. Arrivé près de la surface, le magma a cristallisé, et des inclusions vitreuses porteuses de la signature géochimique de la plaque plongeante ont été emprisonnées dans les minéraux.

La tectonique des plaques aurait donc débuté il y a au moins 3,3 milliards d'années. Mais au vu du temps nécessaire au plongement d'une plaque tectonique jusqu'au manteau profond, elle avait certainement démarré bien avant la formation des komatiites de Barberton. ■

NICOLAS BUTOR

A. V. Sobolev et al., *Nature*, vol. 571, pp. 555-559, 2019