

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/srcl/>

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

EN BREF

LA MASSE DU NEUTRINO SE PRÉCISE

Sur les trois types de neutrinos, au moins deux ont une masse non nulle, mais très petite. Les données cosmologiques ne donnent qu'une limite supérieure sur la somme des trois masses, tandis que la physique des particules ne renseigne que sur les différences entre ces masses. Arthur Loureiro, de l'University College, à Londres, et ses collègues ont examiné comment ces contraintes jouent sur la distribution statistique des galaxies. Ils en ont déduit que la masse du neutrino le plus léger est inférieure à 0,086 électronvolt. Six millions de fois moins que la masse de l'électron !

UN PREMIER VACCIN ANTICHLAMYDIA ?

La chlamydie est une maladie sexuellement transmissible qui touche 131 millions de personnes chaque année. Chez la femme, l'infection peut entraîner des douleurs pelviennes chroniques, voire une stérilité. Sonya Abraham, de l'Imperial College, à Londres, et ses collègues ont testé, contre placebo, deux formulations d'un nouveau vaccin auprès d'une trentaine de femmes. Ces vaccins se révèlent bien tolérés et déclenchent une réponse immunitaire efficace contre la bactérie responsable de la maladie.

DES MENHIRS AUVERGNATS

À Veyre-Monton, dans le Puy-de-Dôme, Ivy Thomson et son équipe de l'Inrap ont mis au jour un alignement, unique pour la région, d'une trentaine de menhirs sur 150 mètres. Abattus et retrouvés dans des fossés, ces monolithes auraient été intentionnellement éliminés du paysage, peut-être à cause de changements de croyances. L'un des menhirs se distingue par sa nature calcaire et sa forme grossièrement anthropomorphe dotée de deux petits seins.

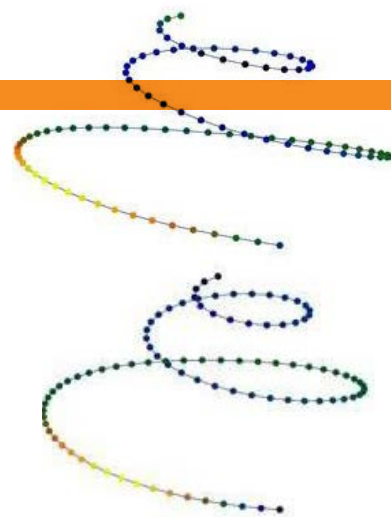
ANATOMIE HUMAINE

LA COCHLÉE INDIQUE LE SEXE

Identifier le sexe d'un humain à partir de son seul squelette n'a rien d'évident. La question se pose en médecine légale et surtout en archéologie avec des squelettes plus ou moins bien conservés. Les chercheurs utilisent différents os, mais même le bassin, le plus fiable, est sujet à caution: chez les jeunes enfants, la morphologie du bassin des filles ne diffère guère de celle des garçons. Une solution se nicherait au sein du rocher, petit os de l'oreille interne et l'un des plus solides du squelette.

Souvent bien préservé chez les fossiles, cet os héberge la cochlée, l'organe spiralé de l'audition qui convertit les ondes sonores en signaux électriques à destination du cerveau. Cet organe est le seul qui présente dès la naissance sa morphologie et sa taille définitives, qu'il imprime en creux dans le rocher. José Braga, de l'université Toulouse 3, et ses collègues viennent de montrer que la forme de la cochlée, plus précisément la torsion de sa spirale, diffère notablement selon le sexe. Ce résultat leur a permis de mettre au point une méthode fiable de détermination du sexe des squelettes, ne faisant pas appel à l'ADN.

Les chercheurs ont obtenu ce résultat grâce à des méthodes d'analyse de formes 3D complexes. Ces outils ont fourni une représentation fine de la forme spiralée de la cochlée de près



Les torsions de la forme moyenne de la spirale cochléaire masculine (en haut) et féminine (en bas) diffèrent.

d'une centaine d'individus dont les données ont été collectées par tomographie à rayons X. Une analyse statistique non supervisée (c'est-à-dire en mélangeant hommes et femmes), où l'effet de la taille a été éliminé, a montré une claire séparation des individus en fonction du sexe. La détermination à l'aveugle du sexe de chaque individu à partir de la cochlée a montré une performance moyenne de 93%. Reste à améliorer la méthode et à la tester sur des squelettes plus anciens, ce à quoi l'équipe s'attelle, et à déterminer à quel moment de l'évolution ce dimorphisme est apparu. ■

NOËLLE GUILLON

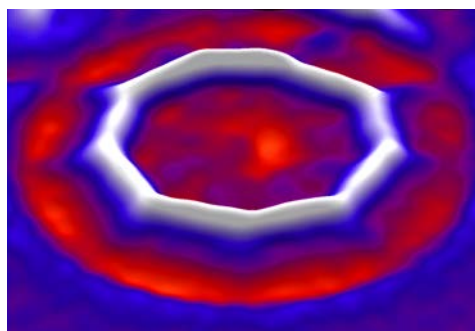
J. Braga et al., *Scientific Reports*, vol. 9, article 10889, 2019

CHIMIE

UN CYCLE EN PUR CARBONE

Diamant, graphène, nanotubes et fullérènes ont en commun de ne contenir que des atomes de carbone. Dans le premier de cette liste, chaque atome est lié à quatre voisins; dans les suivants, chaque atome est lié à trois autres atomes de carbone. Mais est-il possible de fabriquer des cycles de carbone où chacun est lié à seulement deux voisins? Parmi d'autres, le Prix Nobel de chimie Roald Hoffmann avait imaginé cette configuration dès 1966, mais toute tentative de la réaliser avait échoué. Katharina Kaiser, du laboratoire de recherche d'IBM à Zurich, et ses collègues ont réussi ce tour de force en produisant un cycle stable, formé de 18 atomes de carbone.

Pour ce faire, ils sont partis d'une molécule cyclique ($C_{24}O_6$) d'atomes de carbone contenant des groupes CO. En manipulant au



Une molécule cyclique formée uniquement d'atomes de carbone a été synthétisée pour la première fois.

microscope à force atomique la molécule à très basse température (5 kelvins), les chercheurs ont éliminé les CO excédentaires. Le résultat est un cycle où alternent des liaisons C-C triples et simples. Ce qui devrait conférer des propriétés semi-conductrices à ces molécules. ■

S. B.

K. Kaiser et al., *Science*, eaay1914, en ligne le 15 août 2019