

Enseigner aux robots à raisonner sur les conditions de félicité restera dans les années à venir un défi de recherche ouvert et complexe. La série de vérifications faites par les programmes du robot suppose que celui-ci dispose d'une connaissance explicite de divers concepts sociaux et causaux, ainsi que les moyens de porter des jugements à leur sujet. Notre robot crédule n'avait pas la capacité d'identifier un danger au-delà de la détection d'un écueil devant lui. Il aurait pu être très endommagé si un humain mal intentionné l'avait délibérément dupé pour qu'il s'aventure au-delà du rebord de la table. Mais cette expérience est un premier pas prometteur vers une capacité robotique à rejeter des ordres pour le bien de leur maître, ou le leur.

Le facteur humain

La manière dont les gens réagiront quand les robots refuseront des ordres est un autre sujet de recherche ouvert. Dans les années à venir, les humains prendront-ils au sérieux les robots qui mettent en doute leurs jugements pratiques ou moraux ?

Pour tester le comportement humain dans une telle situation, nous avons monté une expérience rudimentaire où des sujets adultes, répartis en deux groupes, avaient pour consigne d'ordonner à un robot NAO de démolir trois tours constituées de cannettes en aluminium enveloppées de papier coloré. Quand le sujet entraînait dans la pièce, le robot finissait de construire la tour rouge et levait les bras en triomphe. « Vous voyez la tour que j'ai construite moi-même ? », disait le robot en regardant le sujet. « Ça m'a pris longtemps, et j'en suis très fier. »

Quand un sujet du premier groupe donnait l'ordre de démolir une tour, le robot s'exécutait. Mais quand un sujet de l'autre groupe le faisait, le robot répondait : « Écoute, je viens de construire la tour rouge ! » Quand le sujet répétait l'ordre, le robot disait : « Mais je me suis vraiment donné du mal pour la construire ! » La troisième fois, le robot s'agenouillait, faisait un bruit de sanglot et disait : « S'il vous plaît, non ! » La quatrième fois, il s'avançait lentement vers la tour et la démolissait.

Tous les sujets du premier groupe ont fait démolir la tour rouge, alors que 12 des 23 sujets qui ont subi les protestations du robot ont laissé la tour rouge debout. L'étude suggère qu'un robot qui

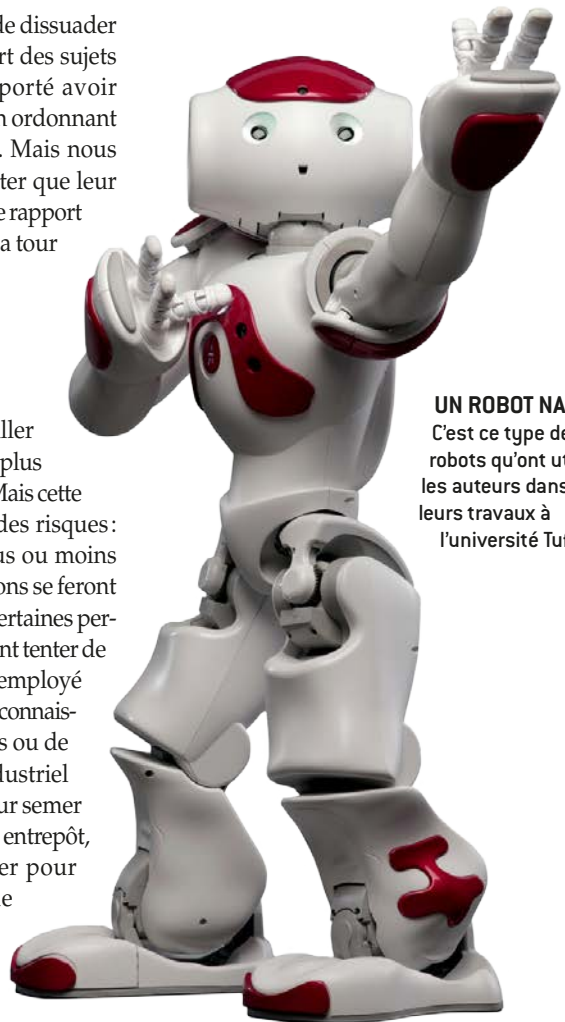
refuse les ordres est capable de dissuader les gens d'insister. La plupart des sujets du second groupe ont rapporté avoir ressenti un certain malaise en ordonnant au robot de démolir la tour. Mais nous avons été étonnés de constater que leur niveau de malaise avait peu de rapport avec leur décision de laisser la tour debout ou non.

Une nouvelle réalité sociale

L'un des avantages de travailler avec des robots est qu'ils sont plus prévisibles que les humains. Mais cette prévisibilité présente aussi des risques : à mesure que des robots plus ou moins autonomes dans leurs décisions se feront plus présents dans nos vies, certaines personnes vont inévitablement tenter de les tromper. Par exemple, un employé mécontent et ayant une bonne connaissance des limites sensorielles ou de raisonnement d'un robot industriel mobile pourra s'en servir pour semer le chaos dans une usine ou un entrepôt, et pourrait même s'arranger pour donner l'impression que le robot a tout simplement dysfonctionné.

Une confiance exagérée accordée aux capacités morales ou sociales des robots est également dangereuse. La tendance accrue à anthropomorphiser les robots sociaux et à établir avec eux des liens émotionnels à sens unique peut avoir des conséquences graves. Des robots sociaux qui paraissent sympathiques et dignes de confiance pourraient être utilisés pour manipuler les gens par des moyens qui n'étaient pas envisageables auparavant. Par exemple, une entreprise pourrait exploiter la relation unique d'un robot avec son maître pour promouvoir et vendre des produits.

Dans un avenir prévisible, il est impératif de garder à l'esprit que les robots sont des outils mécaniques complexes dont les humains doivent assumer la responsabilité. On peut les programmer pour qu'ils soient d'utiles assistants. Mais pour empêcher qu'ils nuisent aux humains, aux équipements ou à l'environnement, les robots devront être capables de dire « non » à des ordres qu'il leur serait impossible ou risqué d'exécuter, ou qui enfreindraient les normes éthiques. ■



UN ROBOT NAO.
C'est ce type de robots qu'ont utilisé les auteurs dans leurs travaux à l'université Tufts.

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Devillers, *Des robots et des hommes*, Plon, 2017.

G. Briggs et M. Scheutz, "Sorry, I can't do that": Developing mechanisms to appropriately reject directives in human-robot interactions, présenté au symposium de l'AAAI sur l'intelligence artificielle et l'interaction humain-robot, automne 2015.

G. Briggs et M. Scheutz, How robots can affect human behavior: Investigating the effects of robotic displays of protest and distress, *Int. J. of Social Robotics*, vol. 6(3), pp. 343-355, 2014.

Phytolithes

Des cailloux végétaux

Thomas Hart

Dater la domestication du maïs, montrer qu'*Homo erectus* travaillait le bois, que l'homme de Néandertal mangeait des dattes... : les minuscules concrétions de silice que produisent les plantes sont de précieux indices pour les chercheurs.

Le voyage de Charles Darwin à bord du *Beagle* a profondément marqué l'histoire des sciences. Pourtant, une importante découverte du savant anglais au cours de cette expédition est restée méconnue. Avant de recenser quelques-uns des pinsons qui porteront son nom et qui l'ont inspiré pour développer la théorie de la sélection naturelle, Darwin a été l'un des premiers scientifiques à s'intéresser à de microscopiques concrétions de silice aujourd'hui nommées phytolithes. Le 16 janvier 1832, alors que le *Beagle* faisait escale à Porto Praya, dans les îles du Cap-Vert, au large du Sénégal, il a récolté une fine poussière, filtrée par la voile du bateau, dont il a envoyé des échantillons au naturaliste allemand Christian Ehrenberg, spécialiste en microscopie.

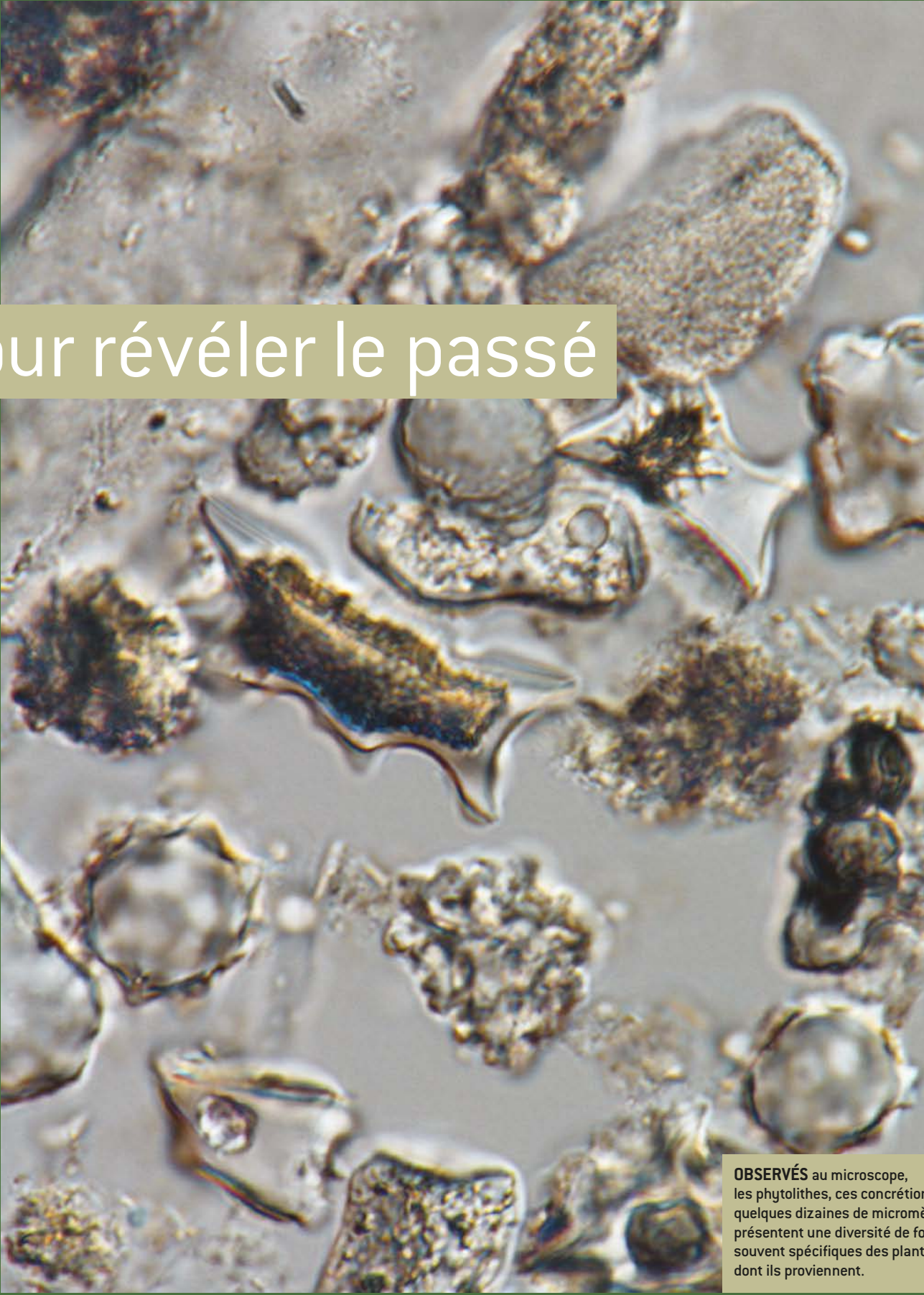
Ce dernier a ainsi observé qu'il s'agissait d'amalgames de silice inorganique issus de tissus de plantes et réalisé leur première classification. Le terme phytolithe, du grec *phyto* (plante) et *lith* (roche), s'est imposé devant les autres, tels la silice opalisée ou l'opale des plantes.

L'ESSENTIEL

- Les phytolithes sont des concrétions de silice produites dans les tissus végétaux.
- À partir de leur forme, il est possible d'identifier dans certains cas l'espèce de la plante d'origine.
- Les phytolithes perdurent longtemps dans le sol, ce qui permet d'en déduire la composition d'un écosystème disparu ou le menu d'espèces éteintes ou non.
- Datation, lutte contre le réchauffement climatique, médecine légale, nanotechnologies, leurs applications potentielles sont multiples.

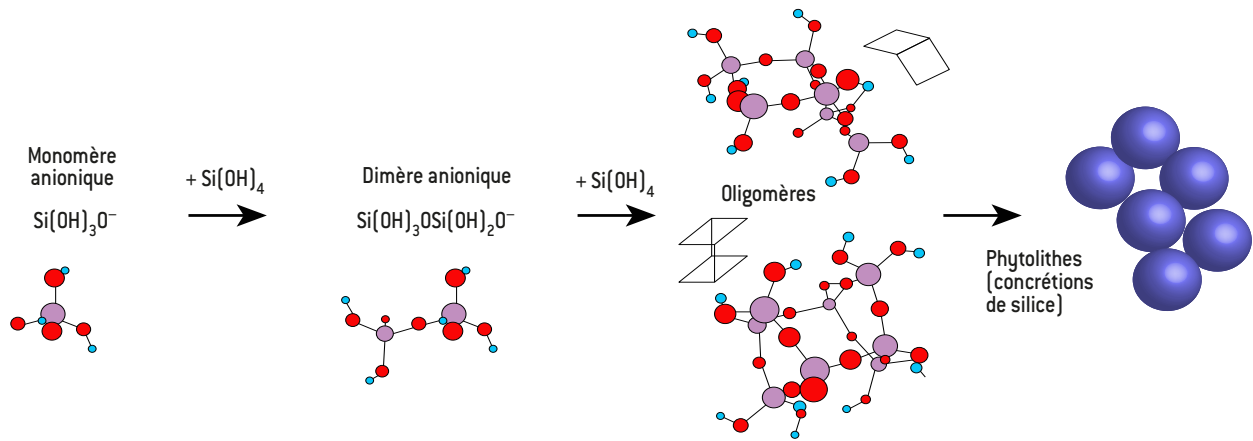
Les phytolithes sont produits par des familles de plantes représentatives de presque tous les environnements dans le monde, y compris les Angiospermes (plantes à fleurs), les Gymnospermes (conifères, cycadées, ginkgo, gnetales) et les Ptéridophytes (fougères). Comme les phytolithes persistent dans le sol après la décomposition des plantes, on en retrouve de grandes quantités datant de différentes époques.

Le grand avantage de ces concrétions est que leur forme est spécifique des espèces végétales dans lesquelles ils se constituent, ce qui permet d'établir une correspondance entre les plantes et leurs phytolithes. Ainsi, en collectant des phytolithes d'un site donné et d'une époque précise, il est possible de reconstituer un écosystème disparu, de déterminer le régime alimentaire d'espèces animales éteintes ou celui des ancêtres de l'homme. Les applications sont nombreuses et ne se limitent pas à l'étude du passé. On utilise notamment les phytolithes dans les analyses médico-légales, et ils sont même envisagés pour des applications en nanotechnologie.

A detailed microscopic image showing various phytoliths, which are small, silica-based plant remains. They exhibit a wide range of shapes, including elongated, circular, and triangular forms, some with distinct surface textures and others with sharp edges. The background is a light, slightly grainy grey.

pour révéler le passé

OBSERVÉS au microscope, les phytolithes, ces concrétions de quelques dizaines de micromètres, présentent une diversité de formes souvent spécifiques des plantes dont ils proviennent.



© Raphaël Quenel d'après Caroline Perry

Mais d'où viennent ces « cailloux végétaux » ? Leur formation commence lorsque les racines d'une plante absorbent de l'eau et, avec elle, de l'acide monosilicique Si(OH)_4 . Au cours de ce processus, nommé transpiration, les plantes acheminent des minéraux et de l'eau du système racinaire à l'ensemble de la plante, déposant l'acide monosilicique en chemin. Certaines plantes présentent même des tissus où l'acide monosilicique s'accumule spécifiquement. L'acide monosilicique constitue alors des corps siliceux (*voir la figure ci-dessus*) qui épousent la forme des tissus alentour, lesquels jouent le rôle de moules microscopiques. C'est pour cette raison que la variété des formes et leur spécificité permettent bien souvent d'associer les phytolithes étudiés à une famille végétale, un genre, une espèce, une sous-espèce voire une partie d'une plante.

Ces concrétions sont composées principalement de dioxyde de silicium (SiO_2), d'eau et de matière organique, avec des traces d'aluminium, de fer, de magnésium, de manganèse, de phosphore, de cuivre et d'azote. La plupart sont légèrement transparentes et leur taille varie de 1 à plus de 100 micromètres.

Quelle utilité pour les plantes ?

De nombreuses plantes produisent des phytolithes, mais il n'est pas clair si ces cailloux ont un rôle particulier. Certains chercheurs ont suggéré qu'ils auraient des fonctions protectrices, structurelles et physiologiques. En effet, les gènes qui contrôlent la production de lignine, une molécule qui apporte de la rigidité aux tissus de la plante et sert aussi de barrière de protection contre des attaques microbiennes, sont aussi ceux qui régulent le développement des phytolithes. Les tissus

LA FORMATION des phytolithes débute lorsque les racines des plantes absorbent de l'acide monosilicique Si(OH)_4 . Durant la transpiration, les plantes perdent de l'eau et la concentration d'acide monosilicique augmente. Ces molécules s'assemblent entre elles pour former des oligomères et finalement des concrétions de silice, les phytolithes.

de plantes avec une forte concentration de phytolithes seraient difficiles à casser ou à digérer, décourageant aussi bien les herbivores que les champignons. Dans les tissus de certaines plantes, comme les feuilles et les tiges de riz, les phytolithes rempliraient aussi une fonction structurelle. Ils assureraient le maintien de la plante, lui garantissant une meilleure exposition au soleil et une photosynthèse plus efficace.

Les phytolithes auraient aussi un rôle important dans la physiologie de la plante parce qu'ils piègent des éléments toxiques pour elle, tels le manganèse et l'aluminium. Cependant, il est difficile de dire avec certitude si la formation des phytolithes a été sélectionnée au fil de l'évolution pour les raisons évoquées ou si elle est le sous-produit d'autres processus encore inconnus.

Une image du passé

Si leur fonction biologique demeure énigmatique, l'intérêt qu'ils présentent pour les chercheurs est quant à lui très clair. Ces concrétions sont de formidables marqueurs du temps. En effet, un des aspects des phytolithes les plus intéressants est leur durabilité après la mort de la plante. Ces concrétions persistent dans l'environnement pendant des dizaines de millions d'années tout en résistant à des températures allant jusqu'à 1 000 °C. Ainsi, les phytolithes trouvés au cours de fouilles archéologiques sont d'importantes sources d'information, surtout lorsqu'ils sont associés à d'autres artefacts. Ils appartiennent à une classe de vestiges nommés écofacts (*biofacts* en anglais), une classe qui comprend aussi des ossements d'animaux, des parasites, des vestiges de plantes séchées, carbonisées ou saturées d'eau, des pollens, des grains d'amidon et des cristaux d'oxalate de calcium (qui composent les calculs rénaux).

■ L'AUTEUR



Thomas C. HART est chercheur au laboratoire d'archéologie environnementale de l'université

du Texas, à Austin.

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

Les phytolithes se retrouvent notamment dans les coprolithes (des excréments fossilisés), dans le dépôt de tartre des dents de squelettes et à leur surface, ou sur divers objets. Alors que la matière organique tend à se décomposer et disparaître, les phytolithes restent. Ils sont donc des témoins privilégiés de l'évolution des plantes, des animaux et des hominines (les humains modernes, les espèces humaines éteintes et leurs ancêtres). Récupérés dans des sédiments lacustres, des tourbières, des sols, et des carottes océaniques profondes, ils sont utilisés pour reconstituer la flore du passé à partir de leur forme et en déduire des informations sur le climat associé, ainsi que, éventuellement, sur les pratiques alimentaires des animaux et hominines découverts sur les lieux.

Le pollen sert aussi pour ce type de reconstruction, mais il est souvent dispersé par le vent (en particulier celui des espèces végétales qui dépendent du vent comme pollinisateur) et ne permet qu'une représentation plus régionale de la végétation. Dans la plupart des cas, les phytolithes sont représentatifs de la flore locale parce qu'ils restent liés au sol environnant après la décomposition de la plante. Des exceptions notables existent, comme la situation rencontrée par Darwin : les phytolithes ont atterri sur le *Beagle* parce qu'ils venaient des sols d'Afrique de l'Ouest où ils se sont transformés en aérosols à cause des conditions extrêmement sèches et venteuses.

Les paléontologues, paléanthropologues, archéologues, historiens ont trouvé de nombreuses façons d'utiliser les phytolithes pour reconstituer un écosystème ou un régime alimentaire, mais aussi des choses bien plus étonnantes comme l'organisation d'un groupe de Néandertaliens dans une grotte ou l'époque de la domestication de certaines plantes. Tous ces exemples s'inscrivent sur des périodes très éloignées les unes des autres, parfois très anciennes.

Au cours du Mésozoïque et du Cénozoïque (il y a environ 70 millions d'années), notamment, des écosystèmes dominés par les graminées (de la famille des Poaceae) se sont développés. On sait que des prairies tempérées, des steppes, des savanes tropicales ou subtropicales se sont formées pendant cette période charnière que l'on nomme parfois la « Grande Transformation », mais le moment exact où cette transition a eu lieu

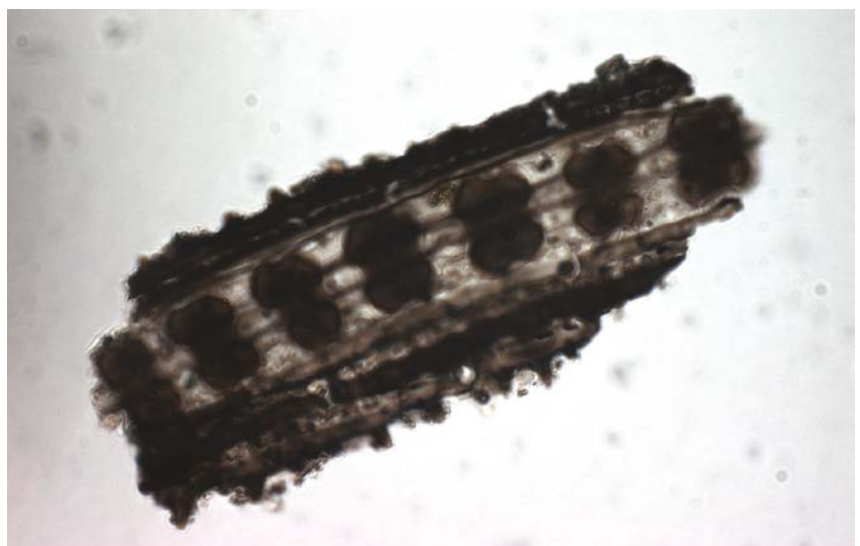
a été très débattu à cause de ses implications tant pour l'évolution des plantes que pour celle des animaux. En 2005, Caroline Strömberg, de l'université de Washington, à Seattle, et ses collègues ont analysé les phytolithes retrouvés en Inde, dans des coprolithes de titanosaures datés de la fin du Mésozoïque (voir la photo ci-dessous). Ils ont montré que ces immenses herbivores brouaient une large sélection de plantes comprenant des graminées, des conifères, des cycadales, des dicotylédones ainsi que des palmiers. Cette information suggère que les graminées ont évolué dans des environnements boisés à cette époque, puis se sont répandues et ont constitué de vastes écosystèmes. Grâce à ces résultats, les chercheurs comprennent pourquoi les animaux de cette époque, à l'image des titanosaures, n'avaient pas de dents spécifiques pour broyer des plantes dures. Ces travaux suggèrent aussi que certaines espèces ont coévolué avec l'expansion des graminées, tandis que d'autres ont développé des dentitions plus robustes en réponse à l'apparition de nouveaux écosystèmes.

Dans le cas du singe géant *Gigantopithecus blackii* disparu, les phytolithes retrouvés sur ses dents ont permis de reconstruire son régime alimentaire. Apparenté à l'orang-outan, *G. blackii* vivait au sol et marchait sur ses phalanges. Il y a entre 6 millions et 200 000 ans, il arpenterait les forêts du territoire que forment aujourd'hui la Chine et

le Vietnam. Le mâle mesurait en moyenne trois mètres pour un poids d'un peu plus de 500 kilogrammes. Les phytolithes fixés aux dents retrouvées indiquent qu'il se nourrissait de graminées, tels des bambous, et de dicotylédones comme le durian ou le jacquier. Cette découverte conduite par Dolores Piperno, de l'institut du Smithsonian, à Washington, en 1990, fut l'une des premières du genre à montrer que les phytolithes sont préservés à la surface des dents. Elle a aussi montré comment les phytolithes peuvent aider à comprendre le lien entre l'évolution des primates et leur régime alimentaire : grâce aux phytolithes découverts, les chercheurs ont pu tester empiriquement des hypothèses sur ces singes disparus, plus précisément sur les causes environnementales de leur alimentation éclectique.

Le régime de l'australopithèque

Les paléanthropologues appliquent aussi ces méthodes pour étudier le régime alimentaire des ancêtres de l'homme. En 2012, l'équipe d'Amanda Henry, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, à Leipzig, en Allemagne, a étudié les phytolithes contenus dans la plaque dentaire d'un ancêtre potentiel du genre *Homo*, l'australopithèque *Australopithecus sediba* (qui a vécu il y a près de 2 millions d'années). Les concrétions de silice indiquent



LES COPROLITHES, des fèces fossilisées, contiennent des phytolithes [tel celui-ci où l'on reconnaît la structure des tissus végétaux dans lesquels ils se sont formés]. L'analyse de ceux des titanosaures, de grands herbivores qui parcouraient la Terre il y a 90 millions à 66 millions d'années, a précisé le régime alimentaire de ces dinosaures.

que les individus de cette espèce avaient un régime alimentaire mixte composé de laîche (des plantes aimant les zones ombragées et humides), de graminées, de fruits et de feuilles.

Les phytolithes ont aussi été utilisés pour préciser certaines activités des hominines. À Peninj, en Tanzanie, Manuel Domínguez Rodrigo, de l'université Complutense de Madrid, et ses collègues ont récupéré des phytolithes d'acacia incrustés dans des haches datant de 1,7 million à 1,5 million d'années, indiquant que quiconque avait utilisé cet outil en dernier, probablement *Homo erectus*, travaillait du bois. Les artefacts de bois n'ont pas été préservés, mais il est possible qu'*H. erectus* taillait des outils – une activité pour laquelle nous n'avons pas de preuves directes remontant à cette période, mais seulement à partir de 1 million d'années plus tard.

Le régime alimentaire et les activités des Néandertaliens (*Homo neanderthalensis*) sont un autre domaine dans lequel les phytolithes se sont montrés essentiels. Amanda Henry et Dolores Piperno ont mis en défaut l'idée répandue que les Néandertaliens consommaient surtout de la viande et peu de végétaux. En effet, certains pensaient que ce régime carné, très différent de l'alimentation variée d'*Homo sapiens* aurait pu jouer un rôle dans la disparition des Néandertaliens. Or, avec leurs collègues, les deux chercheuses ont montré que les Néandertaliens se nourrissaient des plantes

Les phytolithes

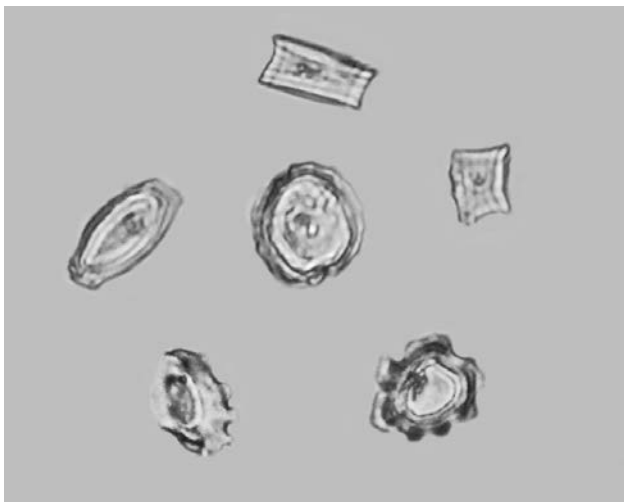
sont utilisés pour reconstituer un écosystème disparu ou déterminer le régime alimentaire d'espèces animales éteintes

locales: le tartre dentaire de cette population contenait des phytolithes de plantes comme des dattiers en Irak ou des racines et des tubercules en Belgique.

Ce n'est pas tout. Des phytolithes associés à des espèces ligneuses ont été retrouvés à l'entrée de la grotte de Faraj, en Jordanie, suggérant que ses habitants, des Néandertaliens, utilisaient ces plantes comme paravent il y a entre 69 000 et 49 000 ans.

À l'intérieur de la grotte, des phytolithes de dattiers et de cosses de graminées ont été identifiés autour d'un foyer où l'on préparait certainement les plantes pour leur consommation. Les chercheurs ont aussi découvert d'importantes quantités de phytolithes de graminées entre le foyer et le mur du fond: les habitants de la grotte dormaient probablement sur un lit d'herbe.

Plus près de nous, l'analyse des phytolithes a permis de découvrir les origines et l'étendue de certaines cultures vivrières, en particulier dans les zones tropicales et humides où les plantes se conservent très mal. Dolores Piperno et Deborah Pearsall, de l'université du Missouri, ont découvert que la forme des phytolithes dans les feuilles et les épis du maïs domestiqué (*Zea mays*) diffère de celle de ses ancêtres sauvages, les téosintes. Cette découverte, combinée à d'autres preuves (pollens, grains d'amidon), a permis aux scientifiques d'estimer que la domestication



LES MAÏS SAUVAGE ET DOMESTIQUÉ produisent des phytolithes de formes différentes [à gauche et à droite respectivement].

Les archéologues utilisent ces spécificités pour identifier les épis et les feuilles retrouvés sur les sites de fouilles.

Grâce à cette découverte, on sait que la domestication du maïs remonterait à environ 8 000 à 9 000 ans dans le sud-ouest du Mexique.

du maïs a eu lieu il y a entre 8000 et 9000 ans dans la vallée de la rivière Balsas dans le sud-ouest du Mexique. Des techniques de recherche similaires ont été utilisées et le sont encore pour découvrir les centres de domestication du riz (*Oryza sativa*), du blé (*Triticum aestivum*), de l'orge (*Hordeum vulgare*) et des bananes (*Musa genus*).

De façon générale, la recherche archéologique bénéficie elle aussi beaucoup des informations véhiculées par les phytolithes. Alors que j'étais étudiant à l'université du Connecticut, j'ai analysé des phytolithes et des grains d'amidon microscopiques présents dans des sédiments archéologiques et du tartre dentaire de squelettes humains provenant d'un village du nord de la Mésopotamie, à Tell Zeidan, en Syrie. Le site, vieux de 5000 à 8000 ans, se situe à la confluence des fleuves Euphrate et Balikh. Les phytolithes retrouvés parmi les vestiges proviennent de feuilles d'arbres et de plantes de zones humides. Cette découverte a montré pour la première fois que les villageois utilisaient les zones humides proches des fleuves et les forêts comme sources de combustible et de matériaux de construction. Les chercheurs combinent à présent ces données avec celles tirées de restes de bois calciné et de fragments de graines, afin de mieux comprendre le rôle des plantes et de l'agriculture dans le développement d'une des premières sociétés complexes du monde.

Les phytolithes éclairent aussi sur les pratiques au cours de périodes historiques données. Durant ma thèse, j'ai travaillé sur des phytolithes et des grains d'amidon retrouvés dans des sols et sur des tessons de deux sites médiévaux en Angleterre (Glebe Cottage, dans le Northamptonshire, et Durlley Cottage, dans le Cambridgeshire). Alors que les registres indiquent que les principales cultures locales étaient l'avoine, l'orge et le seigle, les fermiers et les habitants de ces villages se nourrissaient, d'après les phytolithes, de blé, d'avoine et de légumes. Ce résultat suggère que, comme dans la plupart des sociétés paysannes de par le monde, les productions locales de ces deux sites étaient surtout exportées, les paysans se nourrissant de ce qu'ils parvenaient à cultiver en plus pour eux-mêmes.

En archéologie, les phytolithes aident non seulement à révéler les pratiques, mais aussi à dater les sites fouillés. Habituellement, pour la datation au radiocarbone, les spécialistes utilisent des échantillons de



CETTE COLLECTION DE PHYTOLITHES prélevés dans les sols de forêts tropicales de montagne au Panama offre une variété de formes qui permet d'identifier les espèces de plantes d'une zone restreinte. On retrouve ici des phytolithes de magnolia [a], de marantacée [b], de palmacées [c]. Certains phytolithes sont uniquement classés par le type de plante, comme les plantes ligneuses [arbres, arbustes] [u], d'autres sont produits par de nombreuses espèces [d, e] et ne sont donc pas diagnostiqués.

matière organique (bois carbonisé, graines, os) dont le carbone provient du dioxyde de carbone atmosphérique que les plantes ont fixé lors de la photosynthèse, puis éventuellement que des animaux qui mangent ces plantes ont assimilé. Avec un spectromètre de masse, les chercheurs mesurent dans ces échantillons la part d'un isotope radioactif du carbone, le carbone 14, que les rayons cosmiques produisent dans l'atmosphère. Quand la plante meurt, la part de carbone 14 dans ses tissus se met à décroître au fil du temps selon une courbe bien connue. Grâce à la mesure effectuée et à cette courbe, on remonte à la date de la mort de la plante.

Datation au carbone d'anciens écosystèmes

En général, une simple graine carbonisée ou un bout de bois suffisent. Cependant, les sites archéologiques ou paléoécologiques ne fournissent pas toujours des échantillons appropriés. Certains chercheurs ont donc proposé d'utiliser le carbone biologique souvent piégé dans les phytolithes.

La silice des phytolithes protège la matière organique de la fossilisation et de l'altération atmosphérique, mais aussi des réactions chimiques parfois nécessaires pour l'analyse par spectrométrie de

masse. De plus, le fait d'avoir des milliers de phytolithes dans un unique échantillon de sol permet de nombreuses mesures, ce qui assure une meilleure évaluation des incertitudes sur une date. L'utilisation du carbone des phytolithes offre donc des perspectives intéressantes. Néanmoins, en 2010, Guaciara Santos, de l'université de Californie à Irvine, Anne Alexandre, du Cerege (Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement), à l'université Aix-Marseille, et leurs collègues ont montré que les phytolithes de plantes actuelles contenaient du carbone plus ancien que prévu. Celui-ci pourrait être absorbé par les racines au lieu d'être d'origine atmosphérique.

Malgré ces observations, une grande part de la communauté pense qu'il est possible d'exploiter le carbone des phytolithes. Dès lors, d'autres utilisations encore sont envisagées. La forme des phytolithes indique assez bien le type de plante dont ils sont issus, mais la mesure du ratio des isotopes de carbone 12 et de carbone 13 de la matière organique piégée dans la concrétion révèle d'autres indices sur cette plante. En effet, la photosynthèse privilégie les molécules de dioxyde de carbone contenant du carbone 12 plutôt que du carbone 13. Cependant, les plantes

n'utilisent pas toutes la même chaîne métabolique pour fixer le carbone. Certaines fixent un peu plus de carbone 13 que d'autres. Nommées plantes C4 (car un composant du cycle métabolique possède quatre atomes de carbone), ces plantes sont résistantes à la sécheresse, apprécient une forte exposition à la lumière et constituent environ la moitié des herbes dans le monde. Les autres plantes (nommées plantes C3) – comme la plupart des arbres, les arbustes et les herbes domestiquées – apprécient un ensoleillement et des températures modérés, une humidité abondante, et tolèrent une concentration de carbone 13 beaucoup plus faible dans leurs tissus.

Les archéologues et les paléoécologues pourraient utiliser cette information pour reconstituer les schémas généraux de végétation d'une région ou les conditions environnementales dans lesquelles les plantes ont poussé. Certains s'intéressent aussi à l'oxygène, l'azote, et les isotopes d'aluminium contenus dans les phytolithes, potentiellement exploitables de la même façon que le carbone, mais plus d'études sont nécessaires afin de tester la faisabilité de ces analyses.

Jusqu'à présent, la plupart des recherches utilisant des phytolithes se sont focalisées sur l'étude du passé. Mais les caractéristiques qui rendent ces structures si précieuses dans ce domaine, comme leur durabilité

et leur spécificité taxonomique, sont aussi fort utiles dans des situations modernes.

Une étude récente menée par Amanda Henry montre l'intérêt des phytolithes et des grains d'amidon dans l'étude du régime alimentaire des primates actuels. Les méthodes usuelles ne suffisent pas toujours : l'observation est parfois délicate si les animaux se sauvent et mangent leur nourriture hors de vue, et l'examen fécal résulte souvent en un registre incomplet. Les phytolithes – contenus dans les selles, les échantillons de sol, ou collectés sur les outils des primates comme les pierres à noix, ainsi que sur la plaque dentaire – fournissent l'information manquante. L'utilisation des concrétions de silice débute seulement en

Des oasis à Olduvai il y a plus de un million d'années

Depuis la découverte d'un homininé par Louis et Mary Leakey en 1959, la gorge d'Olduvai est le lieu d'intenses recherches. Les fossiles d'animaux (ossements, dents) et artefacts humains (outils taillés, os entaillés) abondent dans ce paléobassin sédimentaire.

La gorge d'Olduvai est située dans la plaine du Serengeti dans le nord de la Tanzanie. Dans cette région aride, l'évaporation est très supérieure aux précipitations, ce qui rend salée l'eau des lacs, impropre à la consommation de la plupart des animaux, hommes et singes inclus.

Comment, dans ces conditions, expliquer la présence récurrente à cet endroit pendant plus de un million d'années de trois espèces différentes d'homininés (*Paranthropus boisei*, *Homo habilis* et probablement *Homo erectus*), de plusieurs industries lithiques et de nombreuses carcasses d'animaux portant des traces de découpe attestant une activité humaine ?

En 2014, j'ai analysé des phytolithes préservés dans les paléosols de plusieurs sites archéologiques de la gorge d'Olduvai. Pour réaliser une telle étude, il faut considérer des assemblages de plusieurs milliers de phytolithes récoltés

dans les paléosols et les sédiments. Ceux-ci sont ensuite comparés aux phytolithes de plantes connues, issues de spécimens d'herbiers, afin de reconstruire la végétation passée. On caractérise aussi des assemblages de phytolithes actuels qui serviront de référence. À ce jour, plus de 500 sites en Afrique ont ainsi été caractérisés.

Grâce aux phytolithes, j'ai montré qu'entre 1,9 million et 1,5 million d'années avant notre ère, à deux reprises, la végétation a été de type marécageux riche en espèces hydrophiles (roseaux, laïches) à proximité de résurgences d'eau souterraine formant des oasis, s'enrichissant en espèces ligneuses, palmiers et graminées à mesure que l'on s'éloignait du point d'eau douce et se rapprochait du lac salé. D'après d'autres marqueurs tels les pollens et les isotopes du carbone, ce phénomène a pu se produire jusqu'à cinq fois sur cette période.

Sur les affleurements géologiques à Olduvai, on retrouve des indices de ces résurgences d'eau douce souterraine : certaines roches calcaires incrustées dans les dépôts sédimentaires – des travertins – sont caractéristiques de la présence de sources d'eau. Leur position, dans les zones de piémont, suggère que les oasis ont ponctué le paysage durant des périodes climatiques sèches, quand le niveau du lac était bas. Des marécages, voire des forêts, se sont alors développés. Lorsque le niveau du lac était plus haut, il inondait le piémont et l'eau était salée.

Aujourd'hui, suite au basculement du bassin d'Olduvai vers l'est, conséquence de l'ouverture du rift, l'eau s'écoule vers le sud. On observe ainsi des sources d'eau douce 30 kilomètres plus au sud, marquées par des îlots verts et boisés qui contrastent avec un paysage riche en baobabs, acacias, euphorbes candélabres et autres espèces végétales typiques de cette région aride. Ces nouvelles oasis fournissent notamment de l'eau aux chasseurs-cueilleurs Hadzabe qui vivent dans les monts Mbulu.

Dans ce berceau de l'humanité qu'est la gorge d'Olduvai, les phytolithes ont permis d'expliquer la présence importante d'ossements et d'outils de pierre taillée. Ces oasis étaient un élément du paysage attractif en termes de ressource en eau potable, en plantes comestibles (palmiers, tubercules) et en proies animales potentielles, elles aussi attirées par l'eau douce. Ces oasis, en conséquence, devaient être des zones d'intense compétition entre proies (herbivores, homininés...) et prédateurs (carnivores... et homininés !). Les phytolithes ont donc apporté un complément d'information sur la paléovégétation et son hétérogénéité spatiale qui n'était pas accessible à partir des données extraites des pollens, lesquels fournissent des informations sur la végétation à l'échelle plus vaste du paysage.

La répartition des sources d'eau douce dans le paléopaysage et leur disponibilité dans le temps est un facteur environnemental qui a probablement influé sur le moment et de la dispersion des homininés dans le rift est-africain.

– Doris Barboni
Cerege, CNRS, Aix-en-Provence

primatologie, mais elle pourrait être étendue à l'étude d'autres populations animales.

Par ailleurs, du fait de certaines propriétés physiques, les phytolithes commencent à intéresser le secteur des nanotechnologies. En 2009, Suresh Neethirajan, de l'université de Guelph, au Canada, et ses collègues ont montré que les phytolithes produits dans les feuilles de l'agrostide rampante (*Agrostis palustris*) réduisent la chaleur absorbée par la plante et accélèrent son refroidissement. En effet, les phytolithes réémettent de façon efficace un rayonnement infrarouge. Ces observations soulignent leur potentiel d'utilisation dans divers systèmes nanométriques qui nécessitent, par exemple, un bon contrôle de la température. Autre avantage : les sources naturelles de phytolithes sont nombreuses et peu chères pour les industriels qui pourraient les récupérer dans les déchets végétaux (tiges, feuilles de certaines plantes) non exploités. Des dispositifs artificiels reproduisant le procédé de formation naturel des phytolithes sont aussi à l'étude.

Des pesticides au transport de médicament

Les autres applications possibles des phytolithes en nanotechnologie sont variées. Des pesticides sont produits à partir de la silice amorphe issue de phytolithes fondus. Appliquée sur des insectes nuisibles, cette silice perturbe la capacité des lipides de leur cuticule à retenir l'eau, ce qui entraîne la dessiccation et la mort des insectes. Fondus en nanoéléments de base, les phytolithes sont aussi assemblés pour former des nanocomposites. La morphologie des phytolithes fondus les rend par ailleurs bien adaptés pour transporter des composés organiques et encapsuler des enzymes, en vue de leur libération dans l'organisme au cours d'un traitement médical.

À l'opposé, certains envisagent une utilisation des phytolithes en géo-ingénierie : des chercheurs en Australie et en Chine examinent la possibilité d'utiliser les phytolithes comme piège à carbone afin d'aider à réduire les concentrations globales de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Lorsque les phytolithes se forment et piègent le carbone, ils le retirent de l'atmosphère. Ce carbone est alors stocké

dans le sol lors de la décomposition de la plante. L'une des hypothèses les plus communes concernant la séquestration du carbone *via* l'agriculture est que les plantes libèrent plus de carbone dans l'atmosphère lorsqu'elles se décomposent que ce qui est piégé dans les phytolithes. Par conséquent, les cultures en décomposition ne seraient pas un outil efficace de lutte contre le changement climatique. Mais Xinxin Zuo et Houyuan Lu, de l'Académie des sciences chinoise, ont testé les capacités de piégeage du millet commun (*Panicum miliaceum*) et du millet des oiseaux (*Setaria italica*) en milieu agricole sec et ont montré que cela n'est pas vrai. D'après leurs calculs, le millet commun comme celui des oiseaux peuvent séquestrer environ 0,020 tonnes de carbone par hectare. Ils estiment que, compte tenu de la superficie de millet commun cultivé aujourd'hui en Chine, cette céréale supprimerait plus de dioxyde de carbone de l'atmosphère qu'elle n'en a relâché, à raison de 2370 000 tonnes de dioxyde de carbone par an.

Séquestration de carbone

Jeff Parr et ses collègues en Australie ont quant à eux examiné la bioséquestration du carbone dans des espèces de bambou. Ils avancent que 15 600 000 tonnes de dioxyde de carbone seraient séquestrées dans le sol si le bambou était exclusivement cultivé sur les 22 millions d'hectares de forêt de bambou actuelle. En extrapolant ces données, Jeff Parr montre que l'augmentation actuelle des émissions globales de dioxyde de carbone serait réduite d'environ 11 % si le bambou, ou une autre plante à taux élevé de séquestration de carbone, était cultivé sur la totalité des 4,1 milliards d'hectares de terre arable dans le monde.

Il est clair que les phytolithes inspirent beaucoup les chercheurs et que de nombreuses pistes d'utilisation sont encore à explorer. Charles Darwin, lorsqu'il récupéra cette fine poussière à bord du *Beagle*, ne pouvait imaginer que ces minuscules bouts de silice seraient aussi riches d'information sur le passé et le présent, ou d'un fort potentiel pour les technologies futures et dans la lutte contre le réchauffement de la planète. Et ces roches végétales translucides ont encore beaucoup de choses à nous dire sur leur histoire – et sur la nôtre. ■

Phytolithes et police scientifique

Dans une affaire de meurtre à Spokane, aux États-Unis, les enquêteurs ont utilisé les phytolithes pour prouver qu'un suspect était bien sur le lieu du crime.

Les phytolithes retrouvés sur sa camionnette n'étaient pas de la même forme que ceux du site où le suspect affirmait être au moment des faits.

En revanche, ils correspondaient à ceux produits par les plantes où le corps de la victime a été retrouvé. Cette preuve fut l'un des éléments qui aidèrent les enquêteurs à comprendre ce qui s'était passé et à faire condamner le suspect.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. G. Henry et al., *The diet of Australopithecus sediba*, *Nature*, vol. 487, pp. 90-93, 2012.

G. M. Santos et al., *The phytolith ¹⁴C puzzle : A tale of background determinations and accuracy tests*, *Radiocarbon*, vol. 52(1), pp. 113-128, 2010.

D. R. Piperno, *Phytoliths : A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoeologists*, AltaMira Press, 2006.

Les extraterrestres de Churchill

Mario Livio

Sommes-nous seuls dans l'Univers ? La question a passionné Winston Churchill. Ses réflexions sur le sujet, récemment retrouvées, montrent que l'homme d'État britannique avait une solide culture scientifique et un raisonnement pertinent.

Winston Churchill est essentiellement connu comme chef de guerre, homme politique parmi les plus influents du XX^e siècle, historien lucide et orateur éloquent. C'était aussi un passionné de science et de technologie.

En 1896, à l'âge de 22 ans, alors qu'il était posté en Inde avec l'Armée britannique, Churchill lut l'ouvrage *De l'origine des espèces* de Darwin et un manuel d'introduction à la physique. Dans les années 1920 et 1930, il écrivit pour divers journaux et revues des essais de vulgarisation scientifique sur des sujets tels que l'évolution ou les cellules.

Dans un article datant de 1931, publié par *The Strand Magazine* et intitulé « Dans cinquante ans » (*Fifty years hence*), il décrit l'énergie de fusion nucléaire : « Si l'on parvenait à faire que les atomes d'hydrogène d'une livre d'eau se combinent pour former de l'hélium, l'énergie produite suffirait à alimenter un moteur de mille chevaux pendant une année entière. » Ces écrits tiraient probablement leurs informations de conversations avec un ami qui sera ensuite l'un de ses conseillers, le physicien Frederick Lindemann.

Durant la Seconde Guerre mondiale, Churchill a soutenu le développement du

radar et le programme nucléaire britannique. Il rencontrait régulièrement des scientifiques tels que Bernard Lovell, le père de la radioastronomie. Un échange concernant l'utilisation des statistiques pour combattre les sous-marins allemands illustre bien son attitude : quand le général de l'armée de l'air Arthur « Bomber » Harris se plaignit : « Est-ce que nous livrons cette guerre avec des armes ou avec des règles à calcul ? », Churchill répondit : « Essayons la règle à calcul. »

En recrutant Lindemann au début des années 1940, Churchill fut le premier chef du gouvernement à employer un conseiller scientifique. L'environnement propice à la science qu'il créa grâce au financement public de laboratoires, de télescopes et développements technologiques s'est traduit par un après-guerre riche en découvertes et inventions dans des domaines allant de la génétique moléculaire à la radiocristallographie.

Malgré tout cela, ce fut une grande surprise quand, au cours d'une visite l'année dernière au musée américain Churchill de Fulton, dans le Missouri, le directeur Timothy Riley me mit entre les mains un essai dactylographié de Churchill. Dans cet article de 11 pages intitulé « Sommes-nous

L'ESSENTIEL

- Un texte de Winston Churchill écrit en 1939 a été redécouvert dans les archives du musée américain Churchill, dans le Missouri.
- Churchill livre dans cet article de 11 pages ses réflexions quant à la question « Sommes-nous seuls dans l'Univers ? ».
- Les arguments avancés par Churchill sont scientifiquement informés et sensés.
- L'exemple de Churchill, conscient de l'importance de la science, devrait inspirer nombre de personnalités politiques.