

Venons-en aux instruments, en quoi consiste le capteur de flux de chaleur ?

Conçu par l'agence spatiale allemande et l'Institut de recherche planétaire, à Berlin, le capteur repose sur un principe simple. Un percuteur percera un trou dans le sol jusqu'à cinq mètres de profondeur. Des capteurs de température, placés le long de ce forage, mesureront des variations de température en fonction du temps mais surtout en fonction de la profondeur. L'instrument chauffera d'abord le sol et mesurera la diffusion de cette énergie. Nous en déduirons la conductivité thermique de la roche. Et ensuite, nous déterminerons le flux de chaleur s'échappant de la planète qui se refroidit.

Le forage n'ira pas au-delà de cinq mètres ; est-ce suffisant pour mesurer le flux ?

Oui, nous aurons une précision suffisante pour calculer le flux... sauf surprise. En effet, si Mars a connu, par exemple, une période de fort refroidissement dans le passé, le sol, en profondeur, pourrait avoir enregistré ces températures. Nous serons alors incapables de mesurer le flux, mais cette information sur le passé de Mars est aussi intéressante en soi.

Mais pourquoi cette limite de cinq mètres ?

La raison paraît surprenante, mais nous sommes confrontés à une exigence liée à des réglementations très strictes, pour la protection planétaire. On pense qu'entre 5 et 20 mètres sous la surface de Mars, on peut avoir des habitats compatibles avec la survie de bactéries. Pour ne pas contaminer ces zones avec des microorganismes de la Terre, il aurait fallu obéir à des critères de stérilisation drastiques qui auraient considérablement augmenté le budget de la mission *InSight*.

L'instrument principal d'*InSight* est le sismomètre. Quels défis a-t-il représentés ?

La complexité de sa fabrication, supervisée par le Cnes, a nécessité une coopération internationale qui a impliqué notamment l'Institut de physique du globe, l'École polytechnique fédérale de Zurich, l'Imperial College de Londres, le Jet Propulsion Laboratory, l'Institut Max-Planck, avec la participation de l'entreprise Sodern. Cette équipe de plus de 200 ingénieurs et techniciens peut être fière du résultat.

Depuis les sondes *Viking*, la technique a nettement progressé. Le sismomètre est maintenant beaucoup plus sensible. L'un des plus gros défis était de l'isoler des perturbations extérieures. Une double cloche le protège des variations de température (qui sont d'environ 60 °C entre le jour et la nuit sur Mars) et du vent. Le système de protection limite ainsi les variations de température à un maximum de 20 °C en été. Et une jupe empêche le vent de s'engouffrer sous la cloche.

C'est aussi la première fois qu'une mission robotisée installera un instrument au sol grâce à un bras articulé. Jusqu'à présent, les robots approchaient un appareil de mesure de la cible ou prélevaient un échantillon pour le déposer dans l'instrument de mesure à bord de la sonde. D'où l'importance du choix du site d'atterrissage, sur un sol pas trop caillouteux et pas trop

Pour forer au-delà de 5 mètres, les règles de protection planétaire sont plus strictes

dur pour que le percuteur puisse réaliser le forage du capteur de flux de chaleur. Au sol, nous utiliserons des caméras pour sélectionner l'endroit le plus judicieux pour installer le sismomètre et le capteur de flux de chaleur.

Le lancement prévu en 2016 a été reporté à 2018 à cause du sismomètre. Que s'est-il passé ?

Un problème d'étanchéité... Le sismomètre est placé dans une enceinte sous vide pour gagner en sensibilité. Or la fuite, bien que très faible, compromettait la précision de mesure de l'instrument. Il a fallu repenser toute l'enceinte, ce qui a pris du temps. Cela fait partie des aléas du développement de nouvelles techniques dans des conditions extrêmes.

Aujourd'hui, quel est le calendrier de la mission ?

La mission a décollé le 5 mai 2018 de la base de Vandenberg, en Californie [ndlr : lorsque l'entretien a été réalisé, la sonde avait effectué plus de 80% de son voyage]. Elle doit se poser sur Mars le 26 novembre, après sept mois de voyage. Le déploiement des instruments s'effectuera en décembre et en janvier. La phase de mesures scientifiques durera près de deux ans. Point remarquable, elle se fera en partenariat avec des instruments en orbite. Par exemple, les mesures de champ magnétique au sol se feront avec celles de la sonde *Maven*. La moisson de données promet d'être riche en découvertes, de quoi occuper les géologues et les planétologues pendant des années. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR SEAN BAILLY

BIBLIOGRAPHIE

P. Lognonné et al., **Planetary seismology**, dans *Extraterrestrial Seismology*, Cambridge University Press, 2015.

P. Lognonné et al., **Impact seismology on terrestrial and giant planets**, dans *Extraterrestrial Seismology*, Cambridge University Press, 2015.

P. Lognonné et al., **Mars et ça repart !**, Dossier *Pour la Science*, n° 84, juillet 2014.

D. Baratoux, **Quatre milliards d'années d'histoire**, Dossier *Pour la Science*, n° 84, juillet 2014.

F. Forget et al., **La planète Mars, histoire d'un autre monde**, Belin-Pour la Science, 2006.



Que mangeaient nos ancêtres il y a plusieurs dizaines de milliers d'années ? L'examen des traces microscopiques d'usure à la surface des dents fossiles apporte des réponses qui bousculent les idées reçues.

Le vrai régime paléo

L'AUTEUR



PETER S. UNGAR
paléontologue à l'université
d'Arkansas, aux États-Unis.
Son livre le plus récent :
Evolution's Bite (Princeton
University Press, 2017)

L'ESSENTIEL

> Les paléontologues ont longtemps pensé que la taille et la forme des dents des animaux dictaient leur régime alimentaire. Mais la disponibilité des aliments, qui change au fil des saisons et à de grandes échelles de temps, se révèle être un facteur plus important.

> L'analyse des traces microscopiques d'usure que portent les dents

fossiles permet d'obtenir des informations sur ce que nos ancêtres mangeaient réellement.

> La comparaison des régimes avec les données paléo-environnementales apporte de nouveaux éléments sur le rôle qu'ont joué les fluctuations climatiques dans l'évolution humaine.



© Jon Foster

Le moment est resté gravé dans ma mémoire. C'était un soir de 1990. Je me trouvais à la station de recherche de Ketambe, dans le parc national de Gunung Leuser, en Indonésie. Je retranscrivais mes notes dans ma hutte, sur les bords de la rivière Alas, mais quelque chose me tracassait.

Dans le cadre de ma thèse de doctorat, je recueillais des données sur le comportement alimentaire des singes, afin de les relier à leur denture. Selon une idée bien ancrée dans la communauté scientifique, la forme et la taille des dents des animaux – l'homme compris – sont en effet adaptées au type de nourriture qu'ils consomment. Mais les macaques à longue queue (*Macaca fascicularis*) que j'observais depuis quatre jours échappaient à cette règle. Les grandes incisives et les molaires émoussées de ces singes semblaient faites pour mastiquer les fruits. Or ces individus ne mangeaient que de jeunes feuilles.

Il fallait me rendre à l'évidence: la relation entre denture et alimentation est bien plus complexe qu'on ne le pense. Un constat riche de conséquences, puisqu'il allait me permettre d'envisager l'évolution des espèces animales et des humains sous un angle nouveau.

Je suis paléontologue et je gagne ma vie en reconstituant le comportement d'espèces disparues à partir de l'examen de leurs restes fossiles. Plus précisément, mon objectif est de retrouver les stratégies alimentaires des animaux du passé et de voir comment ils se sont adaptés aux modifications de leur environnement. Et ce séjour à Ketambe a forgé ma façon de penser et ma démarche. Je me suis mis à voir la biosphère (l'ensemble des organismes vivants de notre planète et leurs milieux) sous la forme d'un gigantesque buffet en libre-service où les espèces viennent se servir des mets disponibles en un lieu et à un instant donnés. La façon dont chacune d'elles compose son menu, les choix qu'elle fait, détermine sa place dans la nature.

Les dents jouent évidemment un rôle dans les habitudes alimentaires: on a besoin des bons ustensiles! Mais j'ai appris à Ketambe que la disponibilité des ressources est plus importante encore. Si les macaques mangeaient des feuilles, c'est parce que le «buffet biosphérique» les leur offrait à cet endroit et à cette époque de l'année. De fait, leur régime évolue au fil des saisons, à mesure que les feuilles se déploient, que les fleurs s'ouvrent et que les fruits mûrissent. Ils ne peuvent manger ce qui n'est pas disponible... L'idée s'est alors peu à peu imposée à moi que des changements environnementaux avaient pu, par le passé, modifier la composition du buffet biosphérique et la disponibilité naturelle des ressources et, *in fine*,

le régime alimentaire des différentes espèces animales.

La plupart des paléontologues ne raisonnent pas de cette façon sur les formes de vie du passé. La démarche traditionnelle consiste à déduire la fonction de la forme en supposant que la nature a sélectionné au fil du temps les meilleurs outils pour chaque tâche à effectuer. Cependant, si la forme découlait uniquement de la fonction, les macaques ne mangeraient pas de feuilles. Mais comment retrouver les habitudes alimentaires à partir des seuls enregistrements fossiles?

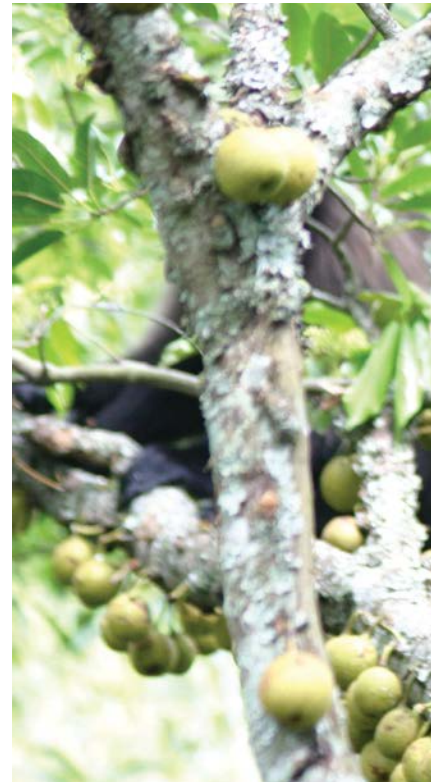
L'examen des traces microscopiques d'usure présentes à la surface des dents se révèle de ce point de vue très pertinent. Cela fait plusieurs décennies que j'étudie ces indices chez les primates, notamment certains des ancêtres de l'homme. L'analyse de la signature chimique laissée dans les dents par les aliments consommés est une autre voie d'investigation. Ces traces physiques et chimiques dépendent du régime alimentaire et se révèlent bien plus précises que la seule forme des dents. Nous allons voir qu'elles sont également riches d'enseignements chez les espèces éteintes.

Confrontées aux marqueurs paléoenvironnementaux, ces empreintes nous permettent en outre de tester des hypothèses relatives à l'impact des changements climatiques sur l'évolution humaine. Surtout, elles jettent une lumière nouvelle sur une question ancienne: pourquoi *Homo sapiens* est-elle la seule espèce d'homininés à avoir survécu?

LE PARADOXE DE LIEM...

L'observation des animaux vivants montre que beaucoup d'entre eux se nourrissent d'aliments autres que ceux pour lesquels ils semblent faits. Lorsque j'étais à Ketambe, Melissa Remis, aujourd'hui en poste à l'université Purdue, étudiait le régime alimentaire des gorilles de Bai Hokou, une forêt humide de basse altitude située dans le parc national Dzanga-Ndoki, au sud-ouest de la République centrafricaine. À cette époque, la plupart des chercheurs pensaient que ces grands singes mangeaient les tiges, les feuilles et la moelle de plantes non ligneuses, comme le céleri sauvage. Ils se fondaient en particulier sur les observations faites auparavant par la célèbre primatologue Diane Fossey dans les forêts brumeuses des montagnes des Virunga, à cheval sur l'Ouganda et le Rwanda.

Cela semblait logique au vu des dents et des appareils digestifs des gorilles. Leurs molaires très aiguisées sont de fait bien adaptées au broyage des parties végétales dures et coriaces. Et leur côlon est suffisamment gros pour accueillir les microorganismes indispensables à la dégradation de la cellulose végétale. Mais ces gorilles des Virunga sont loin d'être





Les molaires plates des mangabeys à joues grises et leur émail épais semblent faits pour broyer des aliments durs. En réalité, ces singes ne consomment qu'exceptionnellement ces mets lorsque les tendres fruits et feuilles qu'ils affectionnent sont disponibles.

représentatifs. Ils forment une population marginale de quelques centaines d'individus seulement et, surtout, ils n'ont pas grand-chose d'autre à se mettre sous la dent dans ces forêts d'altitude.

Melissa Remis a montré que les quelque 200 000 gorilles qui vivent à environ 1 600 kilomètres de là, dans la forêt humide de Bai Hokou, ont des goûts bien différents. Ces singes sont en effet capables de parcourir plusieurs centaines de mètres pour se procurer de savoureux fruits, tendres et sucrés. Ils ne se tournent vers les tiges et les feuilles des plantes que si leurs mets favoris sont indisponibles. Les gorilles des plaines étant plus craintifs que leurs cousins des montagnes, les observations restent toutefois peu nombreuses. Si bien que certains chercheurs doutent toujours de la réalité d'un tel régime frugivore.

Une vieille plaisanterie circule dans notre communauté : « Que donner à manger à un gorille de plus de 180 kilogrammes ? Tout ce qu'il veut. » Mais comment savoir ce qu'un tel colosse désire réellement ? Une fois revenue aux États-Unis, Melissa Remis est allée chercher la réponse au zoo de San Francisco. Elle a présenté aux gorilles en captivité une grande variété de mets : des mangues bien sucrées, des fruits charnus, d'autres durs, des aliments fibreux, etc. Résultat : les singes ont nettement préféré les fruits sucrés et charnus, et dédaigné les aliments auxquels les prédisposaient pourtant leurs dents et leurs intestins ! Les gorilles de Virunga se nourrissent donc d'aliments durs

et fibreux tout au long de l'année non par goût, mais par nécessité, en raison du peu d'options qu'offre le buffet biosphérique à ces altitudes élevées. Ceux qui vivent non loin de là, mais à des altitudes inférieures, choisissent les fruits lorsqu'ils sont disponibles.

Le cas de ces grands singes est loin d'être unique. De nombreuses autres espèces animales ont une nourriture autre que celle à laquelle la morphologie dentaire semble les destiner. Ce comportement a même un nom : le « paradoxe de Liem », en référence au biologiste américain Karel Liem qui, dans les années 1980, l'observa pour la première fois chez *Herichthys minckleyi*.

Ce poisson d'eau douce endémique de la vallée de Cuatro Ciénegas, dans le nord du Mexique, existe sous différentes formes. L'une d'elles a des dents pharyngiennes plates aux allures de caillou, *a priori* idéales pour écraser les coquilles d'escargots. Un mets que les membres de ce groupe ignorent pourtant lorsque de la nourriture moins dure est disponible. Tant que la présence de telles dents n'empêche pas la consommation d'aliments tendres, cette adaptation offre finalement plus de possibilités. Le paradoxe n'est donc pas tant que les poissons évitent les aliments pour lesquels ils sont adaptés, mais qu'une adaptation anatomique puisse conduire à un régime plus diversifié.

... EST FRÉQUENT CHEZ LES PRIMATES

Le paradoxe de Liem est fréquent chez les primates. Ainsi, les mangabeys à joues grises (*Lophocebus albigena*) du parc national de Kibale, en Ouganda, ont des molaires plates recouvertes d'un émail épais, donc bien adaptées au broyage d'aliments durs et cassants. Toutefois, les longues observations réalisées par Joanna Lambert, de l'université du Colorado à Boulder, ont montré que ces singes mangent de tendres fruits charnus et de jeunes feuilles – tout comme les cercopithèques ascagnes (*Cercopithecus ascanius*) avec lesquels ils cohabitent et qui, eux, ont pourtant des dents plus fines.

Mais au cours de l'été 1997, la situation changea brusquement. En raison d'un épisode El Niño, une sécheresse particulièrement sévère sévissait dans la forêt. Les fruits étaient rares, les feuilles flétries. Affamés, les mangabeys se mirent à manger davantage d'écorces et de graines dures. Leurs dents et leurs mâchoires leur permettaient de revenir à des nourritures plus difficiles sur le plan mécanique. Les cercopithèques, moins bien équipés, ne purent en faire autant. Même si ces adaptations ne sont utiles qu'une ou deux fois par génération, elles se révèlent ainsi vitales en période de disette.

> Il arrive aussi que l'anatomie soit en adéquation avec le comportement alimentaire réel des animaux. Ainsi, les mâchoires robustes des mangabeyns enfumés (*Cercocebus atys*) du parc national de Taï, en Côte d'Ivoire, et leurs dents recouvertes d'une épaisse couche d'émail conviennent parfaitement aux nourritures dures qu'ils affectionnent. Ces singes passent d'ailleurs le plus clair de leur temps à fouiller le sol de la forêt à la recherche des graines de bidou (l'arbre *Sacoglottis gabonensis*), dont la coque ressemble à un noyau de pêche. D'après Scott McGraw, de l'université de l'État de l'Ohio, à Columbus, cette pratique leur permet de ne pas être en compétition avec les dix autres espèces de primates présentes sur les lieux. Tout comme les gorilles, les mangabeyns enfumés incorporent plus ou moins souvent des aliments mécaniquement exigeants à leur régime: certains mangabeyns en font leur quotidien, tandis que d'autres les mangent seulement en de rares occasions.

De tels exemples montrent que les choix alimentaires des primates sont complexes et ne dépendent pas seulement de la morphologie des dents. La disponibilité des ressources, la compétition entre espèces et les préférences de l'individu entrent aussi en ligne de compte. Si l'on peut déterminer assez facilement ces paramètres chez les espèces vivantes, la tâche est autrement plus ardue chez celles qui sont éteintes depuis longtemps. La forme des dents fossiles peut nous renseigner sur ce que l'animal était capable de manger de plus difficile. Mais pour obtenir un aperçu des choix alimentaires faits parmi les options offertes par le buffet biosphérique, il faut des empreintes.

Les plus couramment utilisées sont les traces microscopiques d'usure (stries, rayures, trous, etc.) présentes à la surface des dents. Leur forme, leur taille, leur orientation et leur densité dépendent du type d'aliments ingérés. Chez les animaux qui cisailent ou découpent des nourritures coriaces, comme les antilopes brouteuses d'herbe ou les guépards carnassiers, les dents opposées glissent les unes sur les autres. Ce mouvement abrase les surfaces et y laisse de longues stries parallèles. Les espèces qui consomment des objets durs, comme les mangabeyns de Taï, mangeurs de noix, ou les hyènes, croqueuses d'os, ont quant à elles des surfaces dentaires constellées de petites fosses de tailles et de formes variées.

Tout au long de la vie, de nouvelles microtraces apparaissent et font disparaître les plus anciennes en quelques jours. Elles constituent donc de précieux indices sur la nature, voire les proportions, des différents aliments ingérés par un individu à une période et à un endroit donnés. Nous avons pu ainsi montrer que les délicates rayures et les petits trous que présente l'émail des dents de la plupart des mangabeyns

de Kibale sont comparables aux traces observées chez les amateurs de fruits tendres. À l'opposé, les surfaces dentaires des mangabeyns de Taï sont en moyenne beaucoup plus cratérisées. Ainsi, même si les deux espèces ont des morphologies dentaires comparables, les microtraces d'usure témoignent de régimes alimentaires différents, ce qui conforte les observations réalisées sur le terrain.

DES MICROTRACES DENTAIRES AUX MENUS D'AUTREFOIS

La cartographie des microtraces d'usure dentaire chez les animaux actuels et l'observation de leur régime alimentaire sont de précieux guides pour déterminer ce que mangeaient au quotidien les espèces disparues, et en particulier les lointains ancêtres de l'homme. Les travaux que mes collègues et moi avons menés ces dernières années nous ont réservé quelques belles surprises.

L'arbre généalogique des humains actuels est buissonnant. Il n'y a pas si longtemps, plusieurs espèces du genre *Homo* et de genres voisins cohabitaient. Tous ces hominins ont disparu, sauf notre espèce, *Homo sapiens*. Les scientifiques s'interrogent depuis plusieurs décennies sur les raisons qui ont permis à notre lignée de réussir là où les autres ont échoué. Je me suis moi-même penché sur la question lorsque j'ai voulu étudier le régime alimentaire de différents spécimens appartenant au genre *Paranthropus*.

Ces hominins, qui vivaient dans l'est et le sud de l'Afrique durant le Pléistocène, il y a 2,7 à 1,2 millions d'années, constituent une lignée séparée, qui a évolué parallèlement à la nôtre. De robustes mâchoires, d'énormes molaires et prémolaires plates couvertes d'un émail très épais, l'existence d'une crête osseuse sur le haut du crâne permettant une meilleure attache des muscles masticateurs: tous ces traits témoignent d'une grande puissance masticatrice et de spécialisations alimentaires qui font de ces espèces les candidats idéaux pour l'étude des microtraces dentaires.

Le paléanthropologue sud-africain John Robinson fut le premier, dès 1954, à s'intéresser au régime des *Paranthropus*. Selon ce chercheur, la morphologie des molaires et prémolaires de *Paranthropus robustus*, découvert en Afrique du Sud, était adaptée au broyage des parties les plus coriaces des plantes (tiges et feuilles, baies et fruits sauvages). Quant aux ébréchures, elles témoigneraient d'une consommation de racines et de bulbes riches en particules minérales.

Sa conclusion a été contestée dans les années 1960 par Phillip Tobias, de l'université de Witwatersrand, à Johannesburg. Lui voyait dans ces ébréchures le signe d'une consommation de mets très durs, comme des fruits à

EMPREINTES ALIMENTAIRES

Toutes les dents portent à leur surface des traces microscopiques d'usure qui diffèrent d'une espèce à l'autre, et qui dépendent du type d'aliments consommés. Leur examen chez les animaux actuels montre par exemple que la mastication d'herbes tendres et coriaces laisse de longues rayures parallèles les unes aux autres. La consommation de mets durs et cassants, telles les noix qui nécessitent d'être broyées, se traduit par la présence de petits cratères. L'analyse fine de ces empreintes mécaniques permet aux paléontologues de déduire le régime alimentaire d'hominins aujourd'hui disparus, tels que *Paranthropus robustus* et *Paranthropus boisei*.