

> différences d'énergie entre molécules seront moindres. Peu à peu, des couches de plus en plus profondes du matériau froid s'échaufferont, mais le profil de température sera de plus en plus doux et le flux d'énergie depuis la source chaude de plus en plus réduit: l'évolution en température sera ainsi de plus en plus lente.

On prédit ainsi qu'au voisinage d'une surface de contact plane, la profondeur atteinte par la variation de la température en surface croît comme la racine carrée du double du produit du temps écoulé par la «diffusivité thermique» (rapport entre la conductivité thermique du matériau et sa capacité calorifique par unité de volume).

Le scénario qui précède est certes simplifié, mais il traduit bien ce qui se passe dans les matériaux où les mouvements d'ensemble des molécules ou les écoulements sont très limités. C'est le cas des aliments, au moins en première approximation, malgré la forte présence d'eau.

Pour obtenir des estimations raisonnables, il faut pouvoir prédire l'évolution de la température au cœur de l'aliment et la mettre en relation avec la ou les températures de transformation.

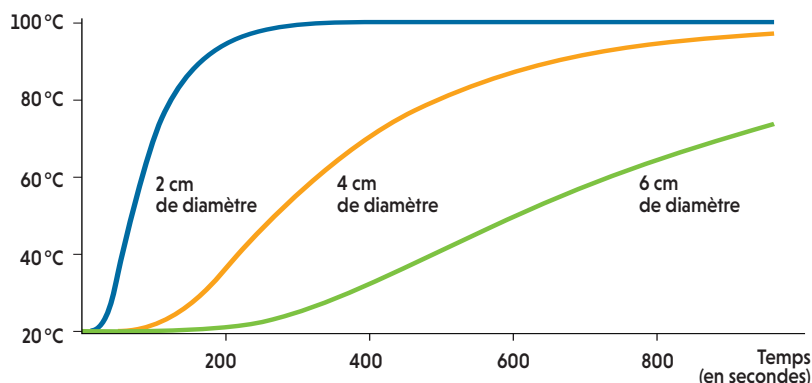
Pour une pomme de terre, la diffusivité mesurée est d'environ $1,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. À partir de cette valeur, on peut calculer l'évolution de la température au cours du temps dans la patate en fonction de sa taille (voir les deux encadrés). On constate, comme attendu, que l'avancée du front de température au début de la cuisson est lente. Mais ce front progresse bien plus rapidement lorsqu'il atteint les couches plus profondes, car il y a de moins en moins de matière à chauffer à mesure que le front se rapproche du centre.

On comprend aussi aisément le problème posé par les grosses pommes de terre: à partir d'une certaine taille, la durée nécessaire pour que le centre atteigne la bonne température et se mette à cuire dépasse 16 minutes; or au bout de ces 16 minutes, la couche externe du tubercule commence à se désagréger, c'est-à-dire à être trop cuite! Les simulations permettent de déterminer la taille limite des morceaux: elle est de l'ordre de 3 centimètres. À vos couteaux, donc, si vous voulez réussir vos patates à l'eau!

Dans le même registre, on peut mentionner la cuisson des rôtis de viande, pour laquelle une prescription du genre «un quart d'heure par livre» est, au mieux, très approximative. L'expérience montre que, pour un même poids ou volume, la cuisson des rôtis longs et de faible diamètre est plus rapide que pour des pièces de viande plus

AU CENTRE DE LA POMME DE TERRE

Ces courbes représentent, en fonction du temps, la température au centre d'une pomme de terre sphérique, de température initiale 20 °C et plongée dans de l'eau bouillante, pour trois valeurs différentes du diamètre. On constate que pour une pomme de terre assez grosse, la hausse de la température au centre démarre tardivement. À cet endroit, pour une pomme de terre de 6 centimètres de diamètre, la température minimale de cuisson (65 °C) n'est ainsi atteinte qu'au bout d'environ 800 secondes, soit plus de 13 minutes. Quand le cœur de cette pomme de terre sera cuit, sa couche externe le sera trop...



compactes. En effet, plus le diamètre est petit, plus la durée requise pour que le cœur de l'aliment atteigne la bonne température est courte. En revanche, le temps de cuisson d'un rôti plus long, mais de même diamètre, ne change pas beaucoup.

Et pour les œufs d'autruche? *A priori*, pas besoin de longs calculs, puisqu'on connaît déjà la durée de cuisson pour un œuf de poule et que l'on peut utiliser ce que les physiciens nomment une loi d'échelle. La durée de cuisson d'un œuf à la coque est déterminée par le temps nécessaire pour que tout le blanc ait atteint la bonne température, jusqu'à la frontière avec le jaune. Les œufs ayant tous à peu près la même forme, ce temps reste proportionnel au carré de leur taille.

UN TEMPS PROPORTIONNEL AU CARRÉ DE LA TAILLE

On peut vérifier cette loi par exemple avec le temps de cuisson de l'œuf de caille (30 secondes pour un œuf large d'environ 2 centimètres). Si on l'applique à l'œuf d'autruche, 3 fois plus large que l'œuf de poule, on s'attend à une durée de cuisson multipliée par $3^2=9$, soit de l'ordre de 30 minutes, pas si loin de la valeur recommandée. Mais l'estimation est un peu basse. Pourquoi? Est-ce dû aux différences de composition des deux types d'œuf? Ou à l'effet d'un œuf d'autruche (1,5 kilogramme!) sur la température de l'eau de cuisson ou son homogénéisation dans le récipient? Nous laissons cette question à la sagacité de nos lecteurs! ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Roura et al., **How long does it take to boil an egg? A simple approach to the energy transfer equation**, *European Journal of Physics*, vol. 21, pp. 95-100, 2000.

P. M. Derbyshire et I. Owen, **Transient heat transfer in a boiled potato: A study related to food process engineering**, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 9(2), pp. 254-256, 1988.

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



COMPLÉTEZ VOTRE
 COLLECTION SUR
boutique.pourlascience.fr



L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne Université,
à Paris

UN PARESSEUX GÉANT AU FOND DES MERS

Durant 4 millions d'années, un groupe de paresseux géants s'est peu à peu adapté à une vie semi-aquatique. Un exemple remarquablement documenté d'évolution graduelle.

Hormis les girafes et certains singes, tous les mammifères sont capables de nager. En revanche, rares sont ceux réellement adaptés à la vie aquatique. La plupart, notamment, ne savent que pagayer de leurs quatre membres. C'est le cas des paresseux actuels, mammifères arboricoles d'Amérique du Sud, qu'ils aient deux doigts (unauis) ou trois (aïs). Bien que bons nageurs, capables de traverser un bras de mer à l'appel d'une femelle, ils descendent rarement de leurs arbres, où ils se nourrissent de feuilles, de fruits et d'insectes. Pourtant, des fossiles découverts au Pérou en 1995 ont récemment révélé que d'anciens cousins géants des paresseux vivaient principalement au fond de l'eau, où ils broutaient comme des lamantins – les «vaches des mers» – et s'y déplaçaient... en marchant.

Ces travaux auraient enthousiasmé Charles Darwin. C'est en effet un fossile de paresseux géant qui l'a mis sur le chemin

de la biologie évolutive. Durant l'automne 1832, lors de son voyage à bord du *Beagle*, Darwin découvrit un étonnant gisement de fossiles géants à Punta Alta, près de Buenos Aires. Il crut reconnaître notamment, dans une mâchoire avec une dent, les restes d'un *Megatherium*, un genre de paresseux géant éteint du début du Pliocène (il y a environ 5,3 millions d'années) décrit quelques dizaines d'années plus tôt par le naturaliste français Georges Cuvier. Et il rapporta nombre d'ossements fossilisés. Au retour du *Beagle* en Grande-Bretagne, l'anatomiste britannique Richard Owen y reconnut des vestiges non seulement de *Megatherium*, mais de divers paresseux géants d'espèces cousines.

Darwin se mit alors à méditer sur la répartition spatiotemporelle des paresseux actuels et fossiles. Les paresseux actuels sont de petits animaux arboricoles; les fossiles, des restes d'animaux terrestres et géants. Les premiers vivant sur le même continent que les seconds, mais pas au même moment, il était vraisemblable que les paresseux actuels soient

La queue était musculeuse, comme en témoigne la largeur des vertèbres. Elle ne servait pas à la nage, mais à la stabilisation de l'animal.



Le fémur a acquis une plus grande mobilité, ce qui permet une nage «petit chien» et une locomotion plantigrade sur les fonds marins.

L'animal se nourrissait d'herbes et d'algues marines.

EN CHIFFRES

6

mètres de long, 4 tonnes, des griffes de 30 centimètres, telles étaient les caractéristiques de *Megatherium americanum*, l'espèce de paresseux géant terrestre que décrivit Georges Cuvier à la fin du XVIII^e siècle.

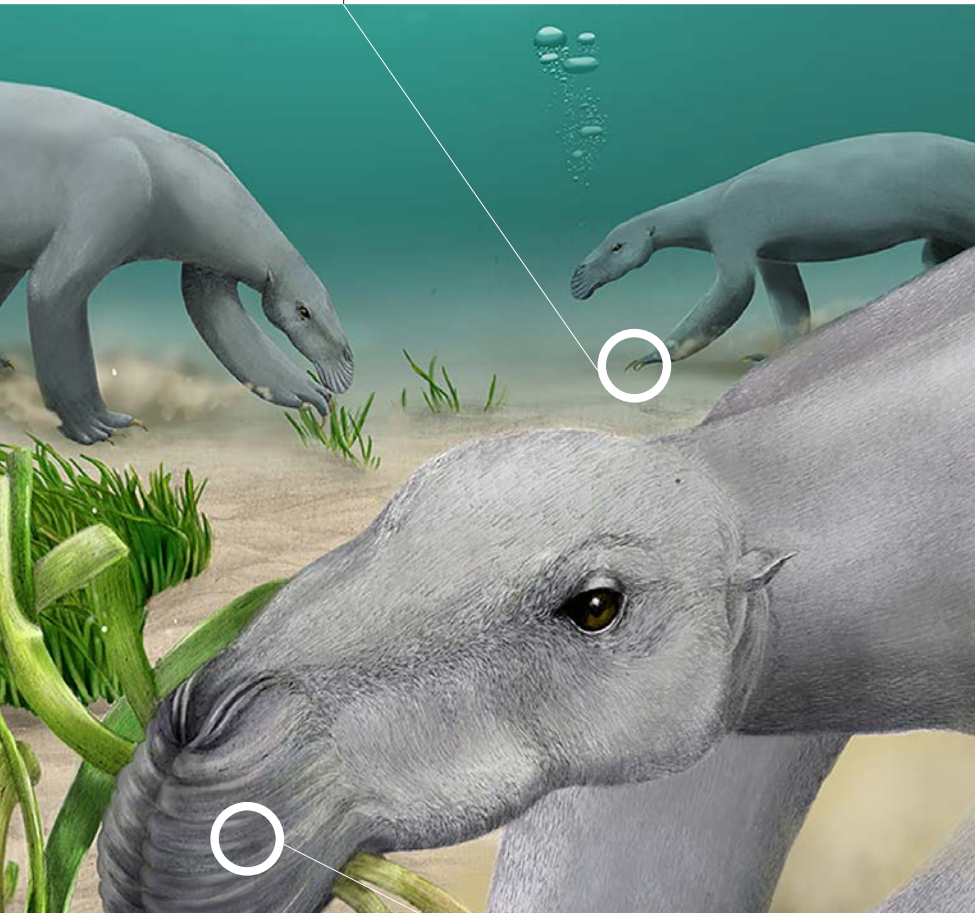
80

centimètres de long pour 6 kilogrammes : le paresseux à gorge brune (*Bradypus variegatus*), le cousin actuel à trois doigts des *Megatherium* et des *Thalassocnus* (eux aussi tridactyles) ne dépasse pas... leur queue.

2,5

mètres, dont 85 centimètres de queue. Avec une telle longueur, *Thalassocnus natans* paraissait légèrement plus petit que son cousin plus récent, *T. yaucensis*, long d'environ 3 mètres.

Ses trois doigts munis de longues griffes l'aidaient à s'agripper au sol sous-marin et à déterrer les plantes aquatiques.



Une mâchoire supérieure allongée et élargie en spatule, une lèvre supérieure probablement puissante comme celle des lamantins et des narines en hauteur : autant de caractéristiques utiles pour brouter sous l'eau.



Thalassocnus yaucensis
Longueur : 3 mètres environ

apparentés aux animaux fossiles. Pourtant, ils présentaient bien des différences, ce qui signifiait qu'au cours du temps, des modifications héréditaires s'étaient produites. Darwin nomma cette hypothèse la « descendance avec modification ». Elle devint un des piliers de sa théorie de l'évolution. Il ne se doutait pas, cependant, que l'histoire des paresseux n'était pas terminée, et qu'un nouveau genre de paresseux, mis au jour en 1995, illustrerait à merveille son hypothèse.

Cette année-là, Christian de Muizon, alors à l'Institut français d'études andines, à Lima, et Gregory McDonald, du Hagerman Fossil Beds National Monument, aux États-Unis, publient la découverte d'un

« paresseux aquatique » (*Thalassocnus natans*) au Pérou. La nouvelle fait sensation. Le groupe des paresseux est alors bien décrit : on sait que l'ancêtre commun aurait vécu il y a environ 40 millions d'années et aurait évolué en deux, puis cinq familles : trois de paresseux géants terrestres aujourd'hui disparus et deux de paresseux plus petits et arboricoles – ceux que nous connaissons. L'animal découvert est certes un paresseux, mais pourquoi aquatique ?

PARMI PHOQUES ET DAUPHINS

Les premiers indices avancés sont indirects, mais convaincants. Le gisement – des sédiments remontant au Pliocène – correspond à une plage fossile, avec des vertébrés marins en grande abondance : poissons, oiseaux, crocodiles... Le seul mammifère pouvant être considéré terrestre est justement *T. natans*. Ses squelettes sont plus nombreux que ceux des phoques ou des dauphins, de l'ordre de ceux des manchots. Or, depuis le milieu du Miocène, l'époque géologique qui a précédé le Pliocène, la côte péruvienne est un désert. Ces animaux végétariens se nourrissaient donc très probablement en mer ou à proximité, dans un habitat au moins semi-aquatique. Par ailleurs, leur squelette présente des similarités avec ceux de mammifères semi-aquatiques comme les lamantins, les otaries et les castors (voir l'encadré page 94). *T. natans* devait donc brouter des herbes ou des algues marines, le corps immergé.

Depuis, l'équipe de Christian de Muizon (désormais au Muséum national >

> d'histoire naturelle, à Paris) a trouvé quatre autres espèces de paresseux marins, classées dans le même genre, mais avec des différences anatomiques significatives. L'analyse phylogénétique les situe dans un même taxon, proche des *Megatherium*. De plus, les cinq espèces de *Thalassocnus* se hiérarchisent de manière temporelle du Miocène au Pliocène, avec deux espèces anciennes, *T. antiquus* et *T. natans*, et deux bien plus récentes, *T. yaucensis* et *T. carolomartini*. Cela permet de suivre l'évolution de certains caractères adaptatifs précis qui étaient les premières déductions sur l'écologie de *T. natans*.

OS DENSES ET GROS POUMONS

Les vertébrés tétrapodes retournés à la vie aquatique – tortues, cétacés, pinnipèdes (phoques, otaries...), siréniens (lamantins, dugongs)... – présentent tous, à un degré plus ou moins fort, un squelette très dense, façonné par la pachyostose et l'ostéosclérose. La pachyostose est une augmentation du dépôt du périoste, le tissu à la périphérie des os; le volume des os s'accroît, ce qui altère parfois leur morphologie. L'ostéosclérose a pour moteur l'inhibition du renouvellement osseux, entraînant le remplissage de la cavité centrale des os. Le squelette acquiert ainsi une compacité qui devient avantageuse pour les animaux marins.

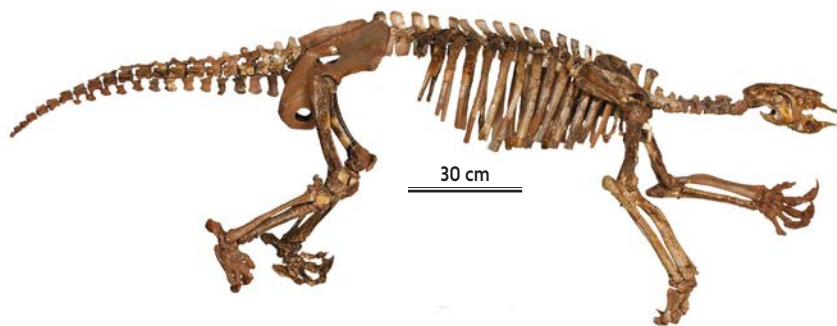
La plupart des vertébrés terrestres doivent dépenser de l'énergie pour s'enfoncer sous la surface de l'eau. La densification du squelette permet aux animaux aquatiques d'y parvenir sans effort. Étant des animaux à respiration aérienne, ils acquièrent des poumons à volume important, ce qui augmente leur temps de plongée. Or l'augmentation du poids de la cage thoracique autorise et contrebalance celle du volume des poumons. La densification des côtes régule aussi la position hydrostatique de l'animal, qui a tendance à être oblique, la tête vers le haut. Une telle densification s'observe surtout chez les animaux vivant en eaux peu profondes, car elle leur permet d'y rester stationnaires.

Les cinq espèces de *Thalassocnus* qui se succèdent temporellement illustrent cette spécialisation graduelle du squelette: l'ostéosclérose et la pachyostose s'accroissent au cours des temps géologiques, avec une adaptation à la vie aquatique qui se perfectionne sur un intervalle de temps court, de l'ordre de 4 millions d'années.

Avec les fourmiliers et les tatous, les paresseux constituent le superordre des xénarthres. Or la densification osseuse de ces animaux à habitat terrestre, surtout

UN BROUTEUR DES MERS

Plusieurs indices suggèrent que *Thalassocnus natans* broutait des herbes sous-marines. Son crâne, comparé à celui des autres paresseux, présente des différences qui prennent sens dans ce contexte: le prémaxillaire (partie antérieure de la mâchoire supérieure) est allongé, avec une extrémité spatulée et une structure spongieuse, signe d'une riche irrigation, comme dans la lèvre supérieure puissante des siréniens (lamantins, dugongs). La proportion fémur/tibia et l'insertion du fémur sur le bassin confèrent une plus grande mobilité à la patte postérieure, ce qui autorisait une nage « petit chien » et une marche sur le fond marin. Enfin, l'anatomie des vertèbres caudales, larges et laissant passer des vaisseaux sanguins de grand diamètre, prouve que la queue était très musculeuse. Elle ne servait pas au déplacement, mais contribuait à la stabilisation de l'animal lors de la nage ou de la marche.



les paresseux et les fourmiliers, est bien supérieure à celle des autres mammifères. Pourtant, l'os, plus cassant, semble un désavantage en milieu aérien. On assiste donc ici à un phénomène d'exaptation, au sens que le paléontologue américain Stephen Jay Gould lui a donné: «Un caractère [ici la densification osseuse] coopté pour un nouvel usage [faciliter la vie subaquatique].»

Les différences les plus spectaculaires entre les espèces les plus récentes de *Thalassocnus* et les autres sont l'allongement des prémaxillaires et l'élargissement de l'extrémité du crâne en une spatule, avec de puissantes lèvres facilitant le broutage. Le radius s'aplatit aussi, ressemblant à celui des phoques et otaries. Un indice, subtil mais convaincant, concerne les rayures des dents, dues aux grains de sable que l'animal ingère avec sa nourriture. Or elles sont plus nombreuses chez les espèces anciennes. Celles-ci devaient brouter sur la plage ou en eau peu profonde et agitée, tandis que les espèces récentes devaient, comme les lamantins, plonger plus profond et atteindre des eaux plus calmes.

Ces animaux ont disparu au cours du Pliocène, sans doute sous l'effet du refroidissement des eaux de la côte Pacifique sud-américaine. Pour qu'ils survivent, il aurait fallu qu'ils acquièrent, comme les cétacés, une épaisse couche de lard sous-cutanée jouant le rôle d'isolant thermique. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Amson *et al.*, **Osteology and functional morphology of the axial postcranium of the marine sloth *Thalassocnus* (Mammalia, Tardigrada) with paleobiological implications**, *J. Mammal. Evol.*, vol. 22, pp. 473-518, 2015.

E. Amson *et al.*, **Gradual adaptation of bone structure to aquatic lifestyle in extinct sloths from Peru**, *Proc. R. Soc. B*, vol. 281, n° 20140192, 2014.

C. de Muizon *et al.*, **The evolution of feeding adaptations of the aquatic sloth *Thalassocnus***, *J. Vertebr. Paleontol.*, vol. 24(2), pp. 398-410, 2004.

C. de Muizon et H. G. McDonald, **An aquatic sloth from the Pliocene of Peru**, *Nature*, vol. 375, pp. 224-227, 1995.