

POUR LA
SCIENCE

Plus de 25% de réduction



TROUVEZ LA BONNE FORMULE

...ABONNEZ-VOUS! 1 an • 12 n^{os} • **56 €** au lieu de 24,90 €

BULLETIN D'ABONNEMENT

À découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science • Service Abonnements • Libre réponse 90 382 • 75 281 Paris cedex 06

Oui, je m'abonne au magazine *Pour la Science* :

☐ 1 an • 12 numéros • **56 €** au lieu de 24,90 €

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 12 € – autres pays 25 €.

☐ 2 ans • 24 numéros • **106 €** au lieu de 149,80 €

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 25 € – autres pays 51 €.

Pour 20 € de plus, découvrez *Dossier Pour la Science* tous les trimestres !

Je préfère m'abonner à *Pour la Science* (12 n^{os}/an) + *Dossier Pour la Science* (4 n^{os}/an)

☐ 1 an • 16 numéros • **76 €** au lieu de 102,70 €

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16 € – autres pays 35 €.

☐ 2 ans • 32 numéros • **143 €** au lieu de 205,40 €

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 34 € – autres pays 72 €.

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____ Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscule).

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ☐

PLS425 • Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31.03.2013

Kristina Curry Rogers et Michael D'Emic

Les sauropodes, ces dinosaures géants au long cou et aux pieds éléphanterques, passaient pour inadaptés. Ils ont pourtant vécu et se sont diversifiés partout sur la planète pendant plus de 150 millions d'années. Un succès évolutif titanesque...

LE TRIOMPHE DES

L'ESSENTIEL

- Long cou, poids énorme, petits cerveaux : les sauropodes étaient considérés comme des animaux mal adaptés, condamnés à vivre à moitié immergés dans l'eau...
- Les découvertes des 20 dernières années rendent cette vision obsolète. Elles révèlent que ce groupe de dinosaures a prospéré partout pendant 150 millions d'années.
- Le succès des sauropodes semble tenir à un mélange unique de caractères reptiliens, aviens et mammaliens, que les paléontologues révèlent peu à peu.



Carnegie Museum of Natural History

TITANS



1. L'APATOSAURE, nommé autrefois brontosauure, est un sauropode typique. Sa colonne vertébrale, très longue et effilée aux deux extrémités, est surmontée d'un petit crâne. Massif, le corps repose sur quatre membres semblables à des piliers. Au cours de leur longue présence sur Terre, les sauropodes ont eu des tailles, des dentitions et des modes de vie divers, mais toujours le même schéma corporel.

Il y a 170 ans, des ossements de géants à long cou sont découverts en Angleterre. D'emblée, ces sauropodes, comme on les nommera plus tard, troublent les naturalistes. En 1842, quand le grand anatomiste anglais Richard Owen définit enfin les dinosaures comme un groupe distinct des reptiles, il en exclut les fossiles de géants d'Angleterre. Pour lui, il s'agit de quelque type de crocodile aquatique, à qui il donne le nom de *Cetiosaurus*, soit « lézard-baleine ».

Toutefois, quand, en 1871, le géologue John Phillips, de l'Université d'Oxford, annonce la découverte d'un fossile plus complet du même type d'animal, il devient clair que loin d'être un crocodile aquatique, *Cetiosaurus* passe au moins une partie de sa vie sur la terre ferme. Pendant des dizaines d'années, les paléontologues sont restés perplexes, car ils n'arrivaient pas à comprendre comment des animaux aussi massifs ont pu supporter leur propre poids. Il semblait tout simplement impossible qu'ils aient pu exister... Nous allons voir que non seulement ils ont persisté pendant toute l'ère des dinosaures, mais qu'ils représentent en fait l'un des plus grands succès évolutifs jamais constatés.

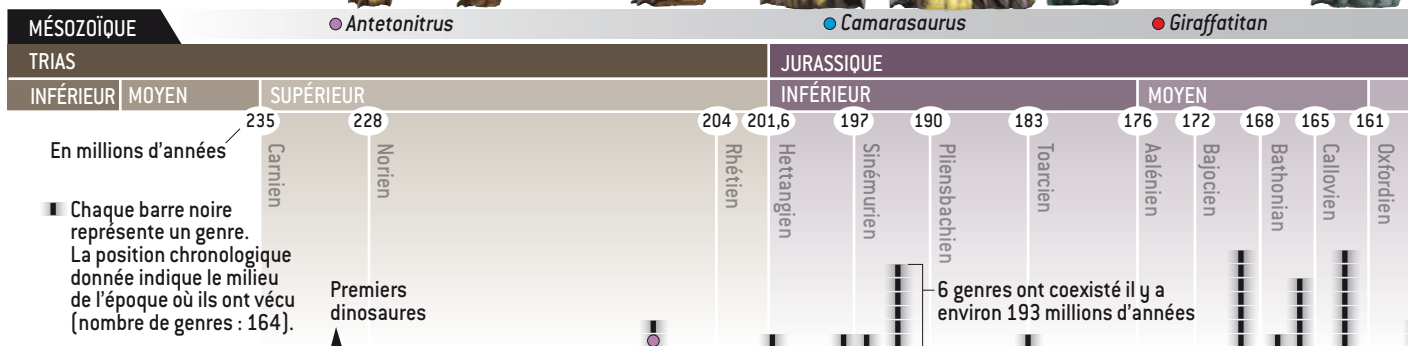
Et pourtant, ils ont existé...

Au XIX^e siècle, on voyait les sauropodes comme des animaux sans habitat possible, inadaptés tant à la vie marine qu'à la vie terrestre. On a donc fini par les considérer comme d'archaïques herbivores voués à l'extinction ou, du moins, à la marginalisation. Cette première impression perdurera : en 1991, les paléontologues considéraient encore que les sauropodes étaient loin de représenter un optimum d'adaptation, de sorte qu'ils n'ont pu prospérer, pensaient-ils, qu'en l'absence d'herbivores plus spécialisés. Selon cette logique, ces géants du Jurassique (il y a 201 à 145 millions d'années) auraient cédé du terrain pendant le Crétacé (de 145 à 65 millions d'années) à des herbivores plus adaptés, car dotés de cerveaux plus gros, tels les hadrosaures (dinosaures à becs de canard) ou les cératopsiens (dinosaures à cornes). Seule une poignée de « traînants de l'évolution » relégués dans l'hémisphère Sud aurait survécu jusqu'à la fin de l'ère des dinosaures.

Cette vision s'est révélée fautive : les découvertes récentes montrent au contraire que ces animaux massifs étaient très résilients. En dix ans, plus de 60 nouvelles espèces ont été découvertes partout dans le monde. Avec l'appui des nouvelles techniques d'analyse (telle la tomographie), elles ont livré aux paléontologues les grandes lignes de l'histoire évolutive des sauropodes, ainsi que des renseignements sur leur mode de vie et la façon dont ils se sont adaptés à de profonds changements environnementaux. Il est ainsi apparu que les sauropodes ont persisté pendant quelque 150 millions d'années, alors que – chose stupéfiante pour un paléontologue – leur taille atteignait souvent le maximum biologiquement possible pour des vertébrés terrestres.

UN SUCCÈS ÉVOLUTIF... AUSSI GRAND QU'EUX

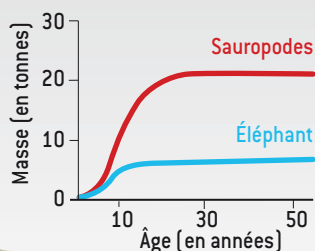
On a longtemps considéré que les sauropodes avaient décliné rapidement à la fin du Jurassique, soit il y a environ 145 millions d'années, face à la concurrence de nouvelles espèces herbivores mieux adaptées. Les découvertes des 20 dernières années montrent en fait que, loin de disparaître, les sauropodes ont encore prospéré pendant 80 millions d'années supplémentaires, c'est-à-dire pendant tout le Crétacé et jusqu'à la grande extinction qui a marqué la fin de l'ère des dinosaures. Les sauropodes se sont maintenus, même lorsqu'ils sont entrés en compétition avec les dinosaures à bec de canard et les dinosaures à cornes pour une nouvelle source de nourriture apparue au Crétacé : les plantes à fleurs.



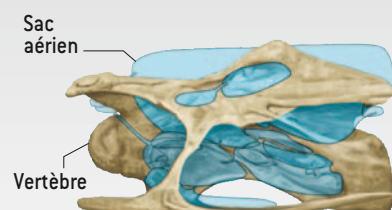
Comment ils ont survécu aussi longtemps

Les sauropodes ont vécu dans de nombreux milieux et sous des conditions diverses grâce à de nombreuses adaptations. Ils ont ainsi pu atteindre des tailles jamais égalées depuis par d'autres animaux terrestres.

Contrairement à la plupart des reptiles, un sauropode grandissait extrêmement vite, atteignant sans doute sa taille adulte en quelques dizaines d'années seulement.

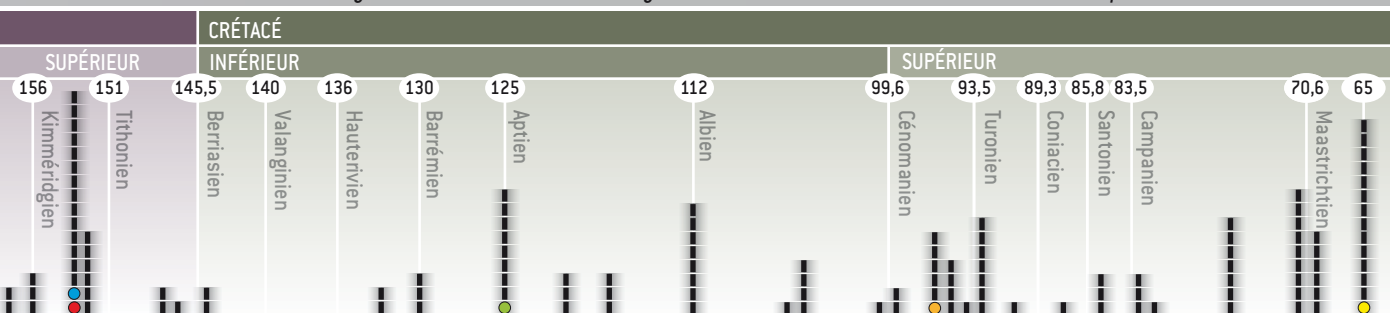
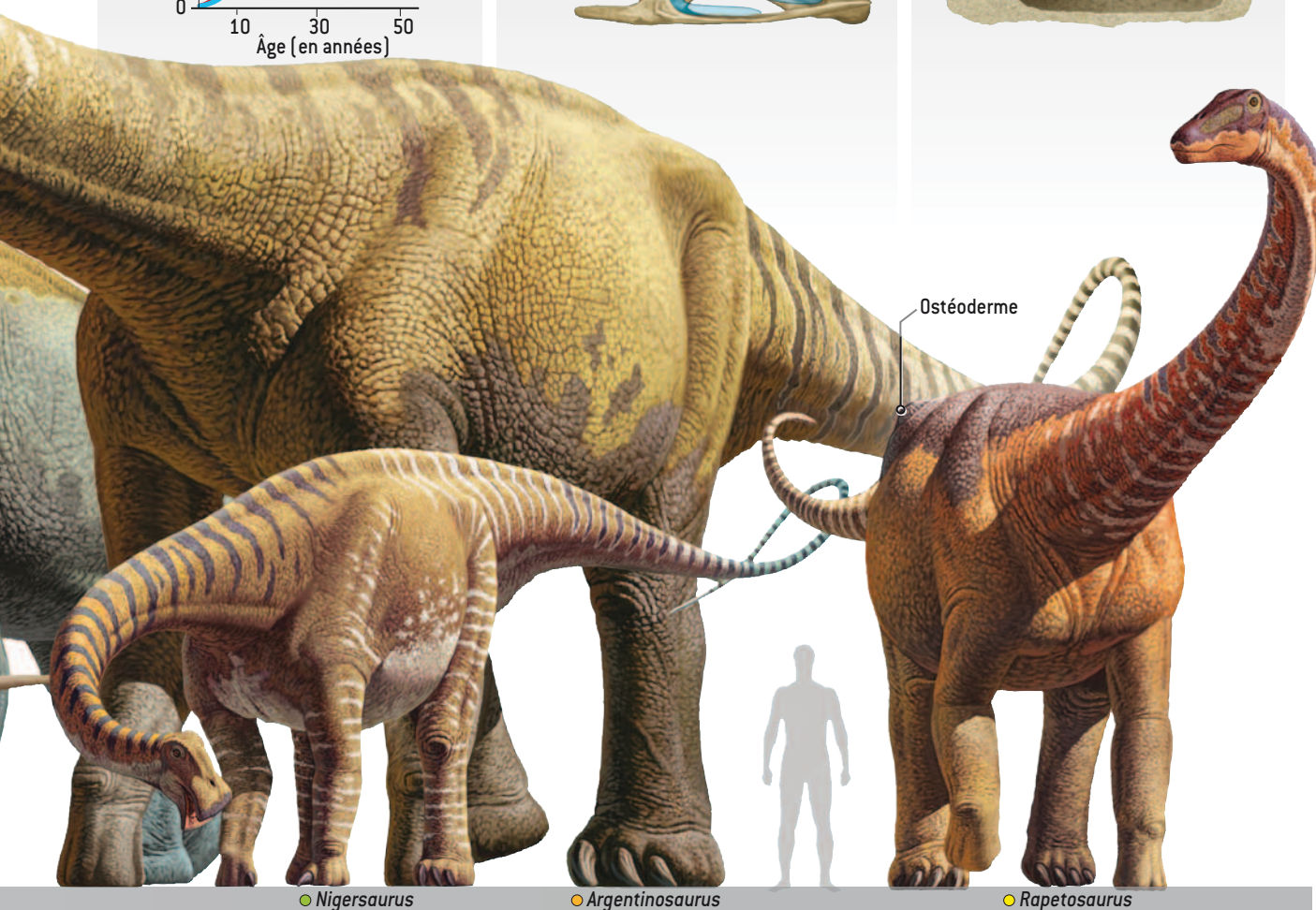
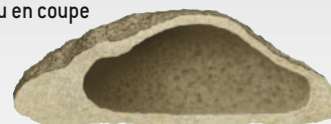


Des vertèbres creuses allégeaient la colonne vertébrale ; elles ont peut-être accueilli des sacs aériens comparables à ceux des oiseaux, pour absorber plus d'oxygène à chaque inspiration.

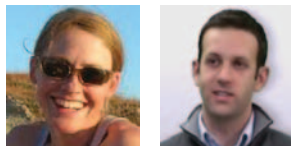


Plaques osseuses enchâssées dans la peau, les ostéodermes auraient servi de réserves de calcium et d'autres minéraux. Les ostéodermes des sauropodes se creusaient en effet avec l'âge, probablement afin de fournir du calcium au sang.

Ostéoderme vu en coupe



■ LES AUTEURS



Kristina CURRY ROGERS, paléontologue et spécialiste des sauropodes, travaille au Macalester College à Minneapolis, aux États-Unis.

Michael D'EMIC, paléontologue et spécialiste des vertébrés terrestres du Crétacé, travaille à l'Université de Géorgie du Sud, aux États-Unis.

■ BIBLIOGRAPHIE

J. A. Whitlock, *Inferences of Diplodocoid (Sauropoda : Dinosauria) feeding behavior from snout shape and microwear analyses*, *PLoS ONE*, vol. 6(4), e18304, 2011.

K. Curry Rogers et al., *Sauropod dinosaur osteoderms from the late Cretaceous of Madagascar*, *Nature Communications*, vol. 2, 564, publié en ligne le 29 novembre 2011.

J.-P. Billon-Bruyat et al., *Les sauropodes, géants agiles*, *Pour la Science*, n° 374, 2008.

K. Curry Rogers et J. Wilson, *The Sauropods : Evolution and Paleobiology*, University of California Press, 2005.

Comme tout un chacun, c'est dans un musée que nous avons été confrontés pour la première fois à ces géants. Dans de tels endroits, ils dominent tous les autres dinosaures. La plupart des sauropodes connus, tels le *Diplodocus*, le *Camarasaurus* (voir la figure 4) ou l'*Apatosaurus* ont commencé leur carrière muséale dans les années 1880. Au tournant du XX^e siècle, tous les muséums dignes de ce nom se devaient d'en exhiber les squelettes. Le *Diplodocus* du Muséum de Paris, par exemple, est une réplique dévoilée en 1908 du dinosaure trouvé dans le Wyoming par le milliardaire américain Andrew Carnegie (il est présenté avec la queue traînant au sol, selon la vision erronée de l'époque). Il n'est donc pas étonnant que les muséums du monde entier possèdent de riches collections d'ossements fossiles de sauropodes jurassiques, qui souvent attendent encore dans des plâtres que l'on vienne les étudier...

Toutefois, ces sauropodes célèbres ne représentent qu'une partie minime de la diversité de leur groupe. La longue histoire des sauropodes commence en même temps que celle des autres dinosaures, il y a 210 millions d'années, à la fin du Trias (-252 à -201 millions d'années). Une extinction massive qui reste mal expliquée, mais qui coïncide avec l'éclatement du supercontinent qu'était la Pangée, entraîne à cette époque la disparition de la plupart des thérapside (reptiles mammaliens). La plupart des niches écologiques sont alors libérées. Les plus anciens dinosaures connus, qui vont les occuper, ont été découverts dans des sédiments formés il y a quelque 230 millions d'années dans l'hémisphère Sud. Ce sont ces animaux bipèdes et de petite taille qui ont ensuite évolué vers les théropodes (dont fait partie le tyrannosaure) et les sauropodes.

Les plus anciens indices fossiles de sauropodes proviennent de formes telles que *Isanosaurus* (Thaïlande), *Gongxiansaurus* (Chine) et *Vulcanodon* (Zimbabwe). Ces anciennes espèces portent les marques distinctives des sauropodes, c'est-à-dire que ce sont déjà des « épines dorsales ambulantes » dotées de cous et de queues longs et fuselés, de crânes minuscules et de pattes en forme de piliers à l'image de celles des éléphants. Les paléontologues ont retrouvé les empreintes de troupeaux de sauropodes tant en Europe (voir la figure 2) qu'aux Amériques, où elles datent d'environ 225 millions d'années. Cette architecture corporelle typique persistera pendant toute la durée

de l'évolution des sauropodes, et fait d'eux des dinosaures facilement reconnaissables.

Cela ne signifie pas que les sauropodes n'ont pas évolué : l'éclatement progressif de la Pangée en a placé sur tous les continents, où ils se sont adaptés à différents milieux. C'est pourquoi leur diversité a connu des hauts et des bas tout au long de leur histoire, et ce jusqu'à la fin des dinosaures. Nous observons en effet l'existence de groupes de sauropodes importants, tels les titanosaures trapus ou encore les rebbachisauridés à tête plate, jusqu'à la fin du Crétacé. Même juste avant la disparition de la plupart des dinosaures (leurs descendants oiseaux sont restés), les sauropodes étaient encore nombreux et diversifiés.

L'évaluation de la taille des sauropodes

Il est clair, dès lors, que les sauropodes constituent un grand succès évolutif. Comment s'explique-t-il ? Il semble que ce soit grâce à l'association d'un mélange unique de caractères reptiliens et mammaliens qu'ils ont toujours pu s'adapter.

Les sauropodes, comme tous les dinosaures, sont ovipares. Mis au jour par Luis Chiappe, du Muséum d'histoire naturelle de Los Angeles et des collègues à Auca Mahuevo, dans la fameuse province argentine fossilifère de Neuquén, les premiers nids de sauropodes identifiés (ceux de titanosaures) contiennent des milliers d'œufs ; à l'intérieur, les chercheurs ont découvert des embryons, avec parfois de la peau et des membranes d'œufs fossilisés. Les femelles titanosaures ont déposé ces œufs sphériques de 13 à 15 centimètres de diamètre par groupes de 20 à 40 au fond de dépressions qu'elles avaient aménagées au préalable. L'abondance de nids dans les mêmes couches sédimentaires suggère que des troupeaux importants de titanosaures ont nidifié dans la même zone au moins six fois de suite. Rien n'indique toutefois qu'ils aient couvé et pris soin de leurs petits après l'éclosion des œufs.

De fait, la densité des nids suggère que les titanosaures n'élevaient pas leurs petits. Contrairement aux grands vertébrés comme les éléphants ou les baleines, qui s'investissent beaucoup dans les soins à l'unique petit de chaque portée, les sauropodes suivent la même stratégie reproductive que les reptiles : ils produisent de nombreux petits, qu'ils laissent ensuite



DCC-SAP

2. DES TRACES DE SAUROPODES ont été découvertes à Porrentruy dans le Jura suisse, où le passage d'un troupeau a marqué une plage fossile jurassique [~152 millions d'années]. Ci-dessus, des traces tri-dactyles (en pied de poule) d'un grand théropode, c'est-à-dire d'un di-

nosaure prédateur, se mêlent à celles du troupeau... Que mangeaient ces herbivores géants se déplaçant aisément en milieu côtier ? Probablement des conifères, des prêles, voire des algues, dans un monde encore dépourvu de plantes à fleurs.

affronter seuls les nombreux aléas de la vie (voir la figure 3).

Pour autant, les chances de survie des petits sauropodes semblent avoir été augmentées par leur vitesse de croissance stupéfiante. Un bébé sauropode mesurait moins de 50 centimètres de long pour un poids de moins de dix kilogrammes; adulte, il pouvait atteindre 30 mètres de long et 40 tonnes, voire davantage. En comparaison, un éléphant pèse environ 120 kilogrammes à sa naissance et fera, adulte, entre deux et six tonnes. Si, comme le pensaient les chercheurs, les vitesses de croissance des dinosaures avaient été les mêmes que celles des reptiles, un sauropode aurait eu besoin de 60 ans pour atteindre son premier palier de croissance et de plus d'un siècle pour atteindre sa taille adulte. Dès lors, aucune reproduction ne lui serait possible avant l'âge de 60 ans, ce qui aurait gravement diminué les chances de survie de l'espèce.

Une vision plus réaliste de la façon dont se développait le corps des jeunes sauropodes a commencé à émerger dans les années 1960, quand Armand de Ricqlès, du Collège de France à Paris, a étudié l'histologie (la structure tissulaire) des os de sauropodes. Les modes de minéralisation osseuse, la densité et l'architecture des cavités laissées par les vaisseaux sanguins ainsi que le degré de remodelage osseux

sont en effet enregistrés dans les os fossiles. Ces caractères montrent que les vitesses de croissance des sauropodes restaient très élevées pendant la plus grande partie de leur vie, et qu'elles étaient en tout cas bien plus élevées que celles des reptiles, et sans doute comparables à celles de certains grands mammifères (éléphants, cachalots...), qui parviennent à maturité au bout de quelques décennies. Il est clair que les sauropodes n'avaient pas besoin de plusieurs siècles pour devenir géants.

Un appétit prodigieux

Tout cela implique que ces animaux devaient avoir un appétit prodigieux. Comment parvenaient-ils à se nourrir assez ? C'est l'une des questions centrales de la biologie des sauropodes. Les recherches sur leur alimentation se sont en général concentrées sur la forme de leurs dents, les marques d'usure de celles-ci, la reconstitution des muscles masticateurs et autres analyses biomécaniques de l'ouverture et de la fermeture de la mâchoire. Ces études ont révélé que les sauropodes brouaient de plusieurs façons : certains sectionnaient des végétaux fibreux avec des dents adaptées, d'autres ne pouvaient consommer que des végétaux mous.

Les auteurs de ces recherches sont assez unanimement parvenus à la conclusion

que les sauropodes ne mastiquaient guère. Il s'ensuit que ces non-ruminants avaient besoin d'un puissant système digestif pour transformer la matière végétale en énergie utilisable. Le processus le plus souvent cité fait appel à la présence dans l'estomac des sauropodes de gastrolithes, c'est-à-dire de pierres ingérées afin que les végétaux soient broyés entre elles. De fait, des pierres polies ressemblant à des galets ayant été souvent remarquées dans les strates géologiques à sauropodes, du moins en Amérique du Nord, les chercheurs en sont venus à leur supposer une fonction analogue à celles des gastrolithes de certains vertébrés actuels, certains oiseaux par exemple.

En 2007, cependant, Oliver Wings, du Muséum d'histoire naturelle de Berlin, et Martin Sander, de l'Université de Bonn, en Allemagne, ont évalué cette hypothèse en examinant de près la façon dont les pierres avalées par les oiseaux sont transformées et dégradées au sein de leur gésier. Ils ont conclu que les prétendus gastrolithes de sauropodes n'ont pas l'aspect de surface attendu. En outre, les gastrolithes supposés, que l'on a découverts là où se sont décomposés des sauropodes, sont rares et donc difficiles à interpréter. Nos confrères allemands estiment que les sauropodes, comme les grands herbivores actuels tels que les rhinocéros, extraient de l'énergie

des végétaux qu'ils ingèrent grâce à la fermentation microbienne au sein de tubes digestifs très longs.

Dès lors, une autre caractéristique des sauropodes – leur long cou – exige une explication. Selon une opinion répandue, il leur permettait d'atteindre la cime des arbres hors de portée des autres herbivores, mais de nouvelles recherches ont relativisé cette idée. John Whitlock, de l'Université de Colombie-Britannique, a reconstitué les stratégies alimentaires des diplodocidés, groupe de dinosaures incluant les sauropodes *Apatosaurus* et *Diplodocus* du Jurassique et du Crétacé. Les variations de forme du museau et les marques microscopiques d'usure de leurs dents suggèrent que certains sauropodes s'étaient spécialisés dans un type particulier de végétaux, tandis que d'autres étaient généralistes ; les uns broutaient au ras du sol, d'autres exploitaient les arbres.

D'autres chercheurs sont parvenus à des conclusions similaires à partir de l'analyse des postures possibles du cou des sauropodes, ce qui a mis en lumière que l'alimentation d'un tel dinosaure dépendait de la souplesse de son cou. La diversité de leurs habitudes alimentaires aide à comprendre

comment autant de géants végétariens ont pu se partager les mêmes écosystèmes.

Lorsque, au Crétacé, les plantes à fleurs se sont répandues partout sur la planète, le groupe des sauropodes a réagi en se spécialisant. On croyait autrefois que les véritables tapis roulants de dents vite usées et vite remplacées des dinosaures à bec de canard et des dinosaures à cornes les avaient avantagés au point de leur permettre de remplacer les sauropodes au Crétacé. On sait

LA PNEUMATISATION DES VERTÈBRES des sauropodes a probablement permis de diminuer fortement la masse de l'animal.

aujourd'hui que ces derniers, loin d'avoir décliné, se sont au contraire diversifiés et ont développé des moyens d'exploiter une plus grande variété de végétaux.

Par exemple, *Nigersaurus*, découvert au Niger dans le milieu des années 1990, avait lui aussi des batteries de dents à croissance rapide. Cette espèce datant d'il y a quelque 115 millions d'années était capable de mettre une nouvelle dent en chaque position tous les mois, soit deux fois plus vite que chez les dinosaures à bec de canard et à cornes. Il disposait ainsi en permanence de dents

acérées capables de couper efficacement les fibres végétales. L'orientation des canaux semi-circulaires de l'oreille interne de *Nigersaurus*, c'est-à-dire son organe de l'équilibre, suggère que cet animal maintenait en général son museau incliné vers le bas de 70 degrés par rapport à la position horizontale habituelle chez les autres sauropodes : autrement dit, il s'était spécialisé dans des végétaux poussant près du sol.

À mesure que le Crétacé avançait et que les plantes à fleurs se diversifiaient, de plus en plus de voies évolutives se sont ouvertes aux lignées de sauropodes. L'analyse de coprolithes (excréments fossilisés) de titanosaures a révélé des phytolithes (fragments de tissus végétaux fossilisés) d'au moins cinq types différents d'herbes ainsi que de plantes à fleurs, de conifères et de palmiers.

Rapportée par Vandana Prasad et des collègues de l'Institut Birbal Sahni de Paléobotanique à Lucknow en Inde, cette découverte montre que les herbes actuelles sont apparues au moins 30 millions d'années plus tôt qu'on ne le pensait et confirme que certains sauropodes se nourrissaient de tout ce qui était à leur portée. En tant qu'animaux à croissance rapide, les sauropodes ne pouvaient faire les difficiles, de sorte que, loin d'être exclus des écosystèmes qui ont émergé au Crétacé, ils semblent en avoir tiré au contraire tout le parti possible, en se nourrissant de tout ce qui se poussait, du sol à la cime des arbres.

La très forte consommation d'oxygène des sauropodes a par ailleurs pu aider leur croissance. Chez les oiseaux actuels, des sacs aériens, sortes de poches d'air reliées aux poumons, occupent l'intérieur des vertèbres, ce qui leur donne une grande capacité respiratoire. Alors que chez les mammifères, le flux d'air inspiré est bidirectionnel (il y a mélange entre l'air inspiré et expiré), ce n'est pas le cas chez les oiseaux, ce qui augmente la quantité d'oxygène extraite à chaque respiration. Or les vertèbres des sauropodes ressemblent à celles des oiseaux actuels, qui ont des cavités internes et de nombreuses fosses externes. Cette « pneumatisation », qui concerne surtout les vertèbres du cou et du tronc, peut s'étendre chez certains sauropodes jusqu'à la queue.

Le principal effet de la pneumatisation est de réduire le poids de la colonne vertébrale. On a estimé qu'elle a permis de diminuer notablement la masse corporelle



3. EN 2010, JEFFREY WILSON, DE L'UNIVERSITÉ DU MICHIGAN, et ses collègues ont trouvé en Inde un nid de sauropodes où un serpent de quatre mètres a été fossilisé autour d'un œuf qu'il écrasait, et dont était sorti un minuscule sauropode qui a lui aussi été figé (ici, une reconstitution de la scène). Les sauropodes nouveaux-nés ont sans doute été au menu de plus d'un prédateur. Un sauropode adulte était probablement intouchable, mais un embryon encore dans l'œuf ou un petit devait être très vulnérable. Cela peut expliquer que les lignées de sauropodes sélectionnées par l'évolution avaient une croissance rapide.

des sauropodes. Le cou de *Sauroposeidon*, par exemple, un immense sauropode nord-américain, aurait été constitué de plus de 75 pour cent d'air... Il est également possible que, comme chez les oiseaux, les vertèbres pneumatisées des sauropodes aient renfermé un système de sacs aériens permettant de ventiler les poumons et augmenter l'efficacité de la respiration, afin d'assurer un métabolisme élevé et stable, nécessaire à une croissance rapide et, plus généralement, à la physiologie d'un animal de masse importante.

Comme c'est le cas pour les animaux géants d'aujourd'hui, tels que les grandes baleines ou les éléphants, la taille des sauropodes les avantageait réellement. Bien avant l'âge adulte, de nombreux sauropodes dépassaient la taille d'un éléphant, animal qui, à part l'homme, n'a pratiquement pas de prédateur. Il semble dès lors que les sauropodes adultes n'avaient pas grand-chose à craindre, même des plus grands prédateurs, tel *Allosaurus*.

Indestructibles... ou presque

Certes, leur grande taille les rendait très vulnérables en cas de pénurie de nourriture et d'eau. Cependant, certains auraient développé des solutions à ce problème aussi. Certaines espèces, par exemple *Stegosaurus*, portent sur leur peau des ostéodermes, d'étranges plaques osseuses dotées de piquants, qui constituent le même genre d'armure osseuse que celles couvrant les crocodiliens, certains lézards ou encore les tatous. Cependant, comme il n'a guère été possible de déterminer les endroits où se situaient les ostéodermes sur le corps de ces dinosaures, il est difficile d'être certain de leur fonction.

La solution de ce problème pourrait être proche : nous avons récemment décrit deux ostéodermes découverts à Madagascar dans un squelette juvénile et un squelette adulte de *Rapetosaurus*, une espèce de titanosaure. D'une longueur de 57 centimètres, d'une épaisseur de plus de 27 centimètres et de volume supérieur à dix litres, le spécimen adulte est l'ostéoderme le plus massif jamais découvert chez un animal vertébré. Des tomodensitométries par rayons X et des carottages indiquent que les ostéodermes de *Rapetosaurus* se sont creusés au cours de la vie de cet animal, et qu'à des tailles très grandes, environ cinq litres d'os interne



4. CE FOSSILE DE CAMARASAURUS trouvé au Wyoming (États-Unis) est celui d'une espèce typique du Jurassique supérieur américain. La façon dynamique dont il a été disposé au musée d'Aathal, en Suisse, illustre l'évolution de la représentation des sauropodes : on a cessé de disposer les fossiles de sauropodes dans des positions évoquant l'immobilisme.

ont été remplacés, probablement par du tissu mou. Contrairement au revêtement en « pavés » des ostéodermes que l'on trouve chez les animaux actuels, *Rapetosaurus* (et probablement certains autres titanosaures) ne possédait que quelques grandes plaques.

Les caractéristiques des ostéodermes de *Rapetosaurus* nous ont permis d'écarter plusieurs hypothèses concurrentes sur la fonction des ostéodermes chez les titanosaures. De tels éléments creux n'avaient pas une grande efficacité de blindage, car ils pouvaient se briser sous la force des mâchoires d'un prédateur. De même, le faible rapport surface sur volume de ces éléments et leur répartition clairsemée dans la peau devaient les rendre inutiles pour la thermorégulation.

Nous pensons plutôt que les ostéodermes des titanosaures servaient de réserve minérale afin de leur permettre de maintenir les vitesses de croissance et leur capacité de ponte même pendant les temps les plus durs, tout comme ils le font chez certains animaux actuels, telles les femelles de crocodiles. Chez tous les vertébrés vivants, y compris les humains, les minéraux de l'os sont « sacrifiés » afin de maintenir les niveaux de calcium dans le sang. Ce remodelage s'accroît souvent de façon saisonnière, quand les ressources sont rares, au cours de la ponte des œufs, et avec le vieillissement – ce qui chez l'homme conduit à l'ostéoporose.

Les ostéodermes étaient manifestement très irrigués par des vaisseaux sanguins

qui conduisaient probablement les cellules effectuant le remodelage nécessaire à la libération de minéraux, à commencer par le calcium. Cette hypothèse a du sens s'agissant d'un énorme sauropode vivant à Madagascar à la fin du Crétacé, époque à laquelle de très fortes sécheresses affectaient l'île, au point que certains carnivores, tel *Majungasaurus*, dévoraient les membres de leur propre espèce. Ce manque d'eau a conduit à l'extinction de très nombreuses espèces, depuis les grenouilles et les oiseaux jusqu'aux sauropodes. Les ostéodermes qu'avaient certains d'entre eux pourraient toutefois leur avoir permis de survivre plus facilement aux variations de l'environnement, notamment à des sécheresses prononcées et fréquentes.

Pendant des dizaines de millions d'années, les sauropodes ont non seulement occupé presque tous les recoins de la Terre, mais ils sont aussi allés aux limites des lois biologiques. Leurs vitesses de croissance et les tailles qu'ils atteignaient sont extraordinaires dans le règne animal, mais ces étonnants attributs n'impliquent en rien qu'ils étaient mal adaptés. Du reste, si les sauropodes ont disparu, ce n'est pas à cause de leur prétendue inadaptation, mais à cause d'une crise biotique majeure, durant laquelle la chute d'une grande météorite sur Terre a joué un rôle essentiel. Que des sauropodes aient vécu et se soient diversifiés sur la planète pendant 150 millions d'années représente un énorme succès évolutif, et leur disparition n'y change rien. ■

HISTOIRE DES SCIENCES

Les coniques selon Dürer

Dans sa quête des secrets de la beauté, l'artiste de la Renaissance Albrecht Dürer s'est intéressé à la géométrie des Grecs anciens. Sa méthode de construction des sections coniques a été source d'inspiration tant dans les arts que dans les sciences.

Daniel SILVER

Peintre et graveur de la Renaissance allemande, Albrecht Dürer (1471-1528) ne s'est jamais considéré comme un mathématicien. Néanmoins, il a utilisé la géométrie pour découvrir les secrets de la beauté. Dürer s'est notamment intéressé aux coniques, ces courbes obtenues lorsque l'on coupe un cône par un plan, et à leur représentation. S'il a commis quelques erreurs d'interprétation, il a contribué à diffuser la géométrie des Grecs anciens et, par d'ingénieuses analyses et méthodes de construction, a influencé nombre de savants de son temps, parmi lesquels l'astronome allemand Johannes Kepler. D'où lui est venu cet intérêt pour la géométrie ? En quoi consistait sa méthode pour tracer les coniques et comment l'a-t-il élaborée ? C'est ce que nous allons voir ici.

On loue Léonard de Vinci et d'autres figures de la Renaissance pour avoir embrassé l'art et la science comme un tout. Mais pour des artistes comme de Vinci et Dürer, il y avait peu de science à embrasser. Dessiner et peindre à partir de la nature nécessitait une compréhension de la physiologie et de l'optique plus fine que celle offerte par l'œuvre la plus fiable de l'époque, de l'Arabe Alhazen, diffusée en Occident au XIII^e siècle par le Polonais Witelo. Si Dürer et les artistes de son temps ont entrepris des recherches scientifiques, c'est autant par nécessité que par curiosité.

L'intérêt de Dürer pour les jeunes artistes l'a incité à écrire un manuel ambitieux destiné à donner de bonnes bases mathématiques à tous les artistes débutants. Imprimé à Nuremberg en 1525, trois ans avant la mort de l'artiste, ce manuel intitulé *Instructions*

pour la mesure, à la règle et au compas, des lignes, plans et corps solides a été le premier ouvrage de mathématiques consacré rédigé en allemand.

Dürer commence son manuel par un clin d'œil à la légende concernant l'inscription qui, à l'entrée de l'Académie de Platon, avertissait « Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre » : « Le très perspicace Euclide a rassemblé les fondations de la géométrie. Celui qui les entend bien n'a guère besoin de ce qui suit, car ces choses s'adressent uniquement aux jeunes et à ceux qui n'ont personne pour fidèlement les instruire. »

Un manuel de géométrie pour jeunes artistes

Réparti en quatre livres, le manuel s'ouvre sur la définition d'une droite et se conclut par une discussion de dispositifs mécaniques complexes conçus pour faciliter le dessin de perspectives précises. Entre les deux, on trouve des descriptions de spirales, conchoïdes et autres courbes « exotiques ». Les constructions des polygones réguliers sont données, de même que des modèles de polyèdres « ouverts » (des patrons pour les fabriquer en papier). Une partie importante est consacrée à la typographie, avec une construction modulaire de l'alphabet gothique. Un artiste qui souhaite dessiner une crosse d'évêque apprend comment le faire avec un compas et une règle...

Si Dürer a écrit son ouvrage dans sa langue maternelle, c'est certes pour le rendre accessible à tous, même à ceux qui ont eu une éducation limitée, mais aussi parce que sa

connaissance du latin — utilisé dans les livres savants — était rudimentaire. Fils d'orfèvre, il aurait pu ne jamais aller à l'école si son père, ayant remarqué son intelligence, ne l'avait envoyé apprendre à lire et à écrire dans une école voisine. L'imprimerie n'avait été inventée que 40 ans auparavant. Les livres étaient encore un luxe et l'apprentissage, un long processus oral à partir d'ardoises ou de tablettes d'écriture en cire.

À 13 ans révolus, Dürer dut quitter l'école et apprendre le métier de son père. Un autoportrait dessiné à l'époque témoigne déjà de son talent artistique. Pourquoi ce fils de commerçant a-t-il alors commencé à étudier les travaux d'anciens géomètres grecs tels qu'Euclide et Apollonius ? Une partie de la réponse réside dans l'atmosphère intellectuelle de Nuremberg à cette époque. En 1470, Anton Koberger avait fondé la première imprimerie de la ville. Un an plus tard, il était devenu le parrain de Dürer. Les sciences et les techniques étaient si appréciées à Nuremberg que l'astronome Johannes Müller — aussi nommé Regiomontanus — s'était établi dans la ville et y avait installé un observatoire dans sa maison.

Le reste de la réponse est apporté par la dédicace des *Instructions pour la mesure* : « À mon très cher maître et ami, Monsieur Wilbolden Pirckheimer je souhaite moi, Albrecht Dürer, salut et prospérité. » Descendant de l'une des familles les plus riches et puissantes de Nuremberg, Pirckheimer était un humaniste cultivé et possédait une bibliothèque inestimable. Sa maison était un lieu de réunions pour les esprits brillants de Nuremberg. Malgré leur différence de rang social, Dürer