



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. ■