

Paléontologie

Les sauropodes,

Les sauropodes ont été les plus grands animaux terrestres de l'histoire de la vie. À partir de leurs fossiles et de leurs traces, les paléontologues reconstituent leur biologie.

Jean-Paul Billon-Bruyat,
Daniel Marty et Damien Becker



1. SUR UNE PLAINÉE CÔTIÈRE INSULAIRE, il y a 152 millions d'années, à l'emplacement du Nord-Ouest de la Suisse, des dinosaures ont laissé des empreintes (ci-dessus). La plupart, rondes (pattes arrière) ou en demi-lune (pattes avant), signent le passage de sauropodes de type *Diplodocus*, se déplaçant à la recherche de nourriture. Ils étaient suivis de près par de petits théropodes de type *Compsognathus* (à gauche) et par un grand théropode type *Allosaurus*, à l'affût peut-être d'un bébé sauropode isolé. Dans les airs, un ptérosaure du genre *Rhamphorhynchus* survole les déplacements des dinosauriens.

S, géants agiles



Le vertébré terrestre le plus massif connu est *Argentinosaurus*. Ce titanosaure sud-américain du Crétacé supérieur mesurait près de 30 mètres de long et pesait près de 90 tonnes. *Brachiosaurus* (voir la figure 2), un dinosaure du Jurassique supérieur, qui vivait en Amérique du Nord et en Afrique, observait le monde du haut de ses 12 mètres. Ces deux dinosaures ont en commun d'être des sauropodes, c'est-à-dire des représentants d'un groupe de gigantesques dinosaures quadrupèdes et herbivores.

Apparus à la fin du Trias – il y a environ 210 millions d'années –, les sauropodes ont eu un grand succès évolutif, puisqu'il a duré tout le Jurassique (entre 200 et 145 millions d'années), puis jusqu'à l'extinction des dinosaures à la fin du Crétacé (il y a 65 millions d'années), soit près de 150 millions d'années. Ces herbivores géants, mais dynamiques, étaient bâtis pour exploiter les ressources végétales de leur époque. Comme ils n'ont ni descendants ni équivalents actuels, même si l'on peut tenter de les comparer avec les grands herbivores d'aujourd'hui, leur biologie pose de nombreux problèmes. Nous allons montrer ici comment les nouvelles découvertes paléontologiques et l'évolution des techniques d'analyse des fossiles font progresser leur résolution.

L'ESSENTIEL

✓ **Herbivores géants, les dinosaures sauropodes ont colonisé la planète durant 150 millions d'années.**

✓ **Ils ratissaient les conifères et les autres végétaux de leur époque grâce à leur long cou prolongé d'une tête comportant deux maxillaires en forme de râteau.**

✓ **Probablement à sang « chaud », ils étaient dotés d'un métabolisme élevé qui les rendait dynamiques et capables de croître très vite.**

✓ **Ils étaient équipés d'un système respiratoire performant, de type avien.**

Depuis leur découverte au XIX^e siècle, on pensait que les sauropodes, des géants à petit crâne, au long cou, aux membres massifs et à longue queue, étaient trop embarrassés par leur poids pour être vraiment terrestres. On les supposait même obligés, la plupart du temps, de vivre dans l'eau pour le supporter... Il a fallu attendre les années 1970 et les travaux du paléontologue américain Robert Bakker pour que la biologie comparée révèle leurs aptitudes réelles (voir la figure 3). Les sauropodes étaient enfin définitivement « sortis des eaux » !

Des géants terrestres

À côté des sauropodes, les grands vertébrés actuels font figure de nains. Un seul d'entre eux se compare par le poids aux plus grands sauropodes : la baleine. Toutefois, elle vit dans l'eau, et la poussée d'Archimède réduit les contraintes que supporte son squelette. Sur terre, les plus grands mammifères sont l'éléphant (cinq à sept tonnes) et le rhinocéros blanc (2,5 tonnes). Un *Argentinosaurus* pesait donc une quinzaine d'éléphants et quelque 35 rhinocéros. Le célèbre *Diplodocus* du Jurassique supérieur des États-Unis était moins géant, avec tout de même 26 mètres de long et un poids de 15 tonnes – un poids équivalent à celui des plus grands mammifères terrestres fossiles, les indricothères (de lointains cousins des rhinocéros), des herbivores qui vivaient en Asie durant l'Oligocène (entre 34 et 23 millions d'années). Que dire alors d'*Europasaurus* (voir la figure 4), un sauropode étonnamment petit, récemment découvert à Oker en Basse-Saxe, dans des terrains du Jurassique supérieur ? Martin Sander, de l'Université de Bonn, et ses collègues ont montré à partir de ses os qu'il s'agit bien d'un adulte (et non d'une forme juvénile d'une grande espèce) atteignant seulement six mètres de long.

La petite taille d'*Europasaurus* résulte d'une diminution du taux de croissance d'un ancêtre de plus grande taille, un nanisme probablement lié à un isolement en milieu insulaire. Les tailles des sauropodes étaient donc diverses, mais la plupart d'entre eux étaient grands. Les découvertes des plus anciens spécimens en Thaïlande par Eric Buffetaut du CNRS et ses collègues montrent que le gigantisme, véritable « marque de fabrique » des sauropodes, s'est mis en place très tôt dans l'histoire du groupe.



Musée d'histoire naturelle de Berlin

2. BRACHIOSAURUS BRANCAI est un exemple de grand sauropode au long cou trouvé dans les roches du Jurassique supérieur de Tanzanie. Sa tête était à 12 mètres de haut, de sorte qu'il pouvait atteindre la cime des conifères – inaccessibles aux autres dinosaures herbivores – et arracher des branchages à l'aide de ses dents spatulées. Par ailleurs, la différence très importante de hauteur entre sa tête et son cœur (jusqu'à huit mètres) indique que la pression artérielle de *Brachiosaurus* était très élevée, afin d'irriguer son cerveau malgré les contraintes de la gravité.

Ces colosses étaient-ils condamnés à vivre dans l'eau, incapables de se déplacer sur la terre ferme sans être écrasés sous leur poids ? Un faisceau d'indices montre au contraire qu'ils étaient bien adaptés au milieu terrestre.

Manifestement aptes à exploiter les niches écologiques des mégaherbivores de leur temps, les sauropodes étaient construits pour s'y déplacer activement, et non pour s'y traîner péniblement. R. McNeill Alexander, de l'Université de Leeds, a confirmé que leurs énormes pattes verticales soutenaient leur corps nettement au-dessus du sol. Robustes et larges, leurs humérus et fémurs pouvaient supporter des efforts autrement plus importants que le simple poids de leur propriétaire. C'est donc plutôt à la locomotion efficace des éléphants qu'à celle, difficile, des crocodiles à terre qu'il faut comparer la locomotion des sauropodes. Comme ces anciens herbivores géants, les éléphants ont des membres verticaux, qui, à longueur de vie, supportent un poids de plusieurs tonnes. Cela n'empêche nullement les éléphants de se déplacer assez vite (25 kilomètres par heure), même s'ils ne galopent pas, et de se dresser sur leurs pattes arrière pour atteindre un rameau tendre ou pour s'accoupler... Les sauropodes faisaient-ils de même ?

Les nombreuses pistes de sauropodes découvertes sont des indices précieux sur leur locomotion. Julia Day, de l'Université de Cambridge, et ses collègues ont reconstitué les deux grands types de locomotion des sauropodes. Au sein d'un même gisement du Jurassique moyen de l'Oxfordshire, en Grande-Bretagne, ils ont mis au jour des pistes à voie étroite où les traces de « pieds » et de « mains » sont proches de l'axe du corps, et, à l'inverse, des pistes à voie large. Ces pistes révèlent une différence de posture au sein des sauropodes, entre les diplodocidés (famille du Jurassique supérieur d'Amérique du Nord et d'Afrique), par exemple, et des formes plus évoluées comme les titanosaures (un groupe cosmopolite au Crétacé) dont les pattes étaient plus écartées. Les pistes montrent aussi que les sauropodes ne laissaient pas traîner leur longue queue (comptant parfois plus de 80 vertèbres), ce qui contredit les anciennes reconstitutions. Le célèbre squelette de *Diplodocus* qui trône depuis 1908 dans la galerie de paléontologie du Muséum national d'histoire naturelle à

Paris a par exemple été monté avec la queue par terre...

En fait, l'articulation des vertèbres caudales indique que les sauropodes maintenaient leur queue à l'horizontale, pour contrebalancer le cou (voir la figure 3). Cette posture érigée et la queue à l'horizontale impliquent une locomotion plus consommatrice d'énergie que celle des crocodiles, lézards et autres reptiles, dont les membres restent en position latérale et qui traînent leur queue. Pourquoi l'adopter, sinon pour rendre possibles agilité, vitesse et endurance ?

UNE GRANDE TAILLE constituait-elle une meilleure défense face aux prédateurs ?

Il existe un autre argument en faveur de l'efficacité de la locomotion des sauropodes : ces géants pouvaient progresser sur des sols mous. Notre équipe vient ainsi de découvrir des empreintes de pieds de plus de un mètre de diamètre dans le Jura suisse (voir la figure 5), dans un environnement proche de celui des Bahamas, mais daté du Jurassique supérieur. Ces empreintes illustrent que des sauropodes gigantesques (avec plus de six mètres de hauteur à la hanche) s'aventuraient sur des plaines côtières. Par ailleurs, Joshua Smith, de l'Université de Pennsylvanie, et ses collègues ont mis au jour dans une ancienne

mangrove du Crétacé supérieur égyptien les restes d'un très grand titanosaure, *Paralititan stromeri*. Bien qu'avoisinant la taille d'*Argentinosaurus*, *Paralititan* aurait vécu dans ce littoral à la végétation luxuriante. Il s'agissait donc d'animaux disposant d'une locomotion efficace, condition indispensable pour se déplacer à la recherche de nourriture, comme tant d'herbivores. Force est donc de constater que les sauropodes ont été de très grands herbivores assez mobiles et habiles pour exploiter divers biotopes terrestres.

Ce fait admis, on s'interroge : quels avantages sélectifs ont favorisé, dans les environnements jurassiques et crétacés, les lignées de sauropodes de grande taille ?

Une grande taille constituait-elle une meilleure défense face aux prédateurs, comme chez les éléphants actuels ? On peut le penser, mais il n'existe pas *a priori* de prédateurs capables de s'attaquer à un sauropode adulte. En outre, les pistes de sauropodes montrent qu'ils pouvaient se déplacer en troupeaux (voir la figure 1), composés de différentes classes d'âge. Comme chez les éléphants, ce comportement grégaire devait protéger les plus jeunes contre les carnivores. Enfin, l'extrémité de la longue queue de certains sauropodes, tel *Diplodocus*, servait peut-être de fouet.

Plus convaincante est l'affirmation selon laquelle un sauropode gagnait à être géant pour exploiter les ressources végétales



Sauriermuseum Aathal

3. CETTE RECONSTITUTION DE CAMARASAURUS, un sauropode typique du Jurassique supérieur des États-Unis, illustre la façon dont a évolué la perception des sauropodes. Alors qu'avant les années 1970, on représentait toujours ces animaux dans une attitude apathique, le montage de ce squelette suggère au contraire beaucoup de dynamisme : le cou redressé, les membres verticaux et la queue bien au-dessus du sol sont ceux d'un animal en mouvement. Ce squelette de *Camarasaurus*, de près de dix mètres de long, a été découvert dans le Wyoming par l'équipe de Hans-Jakob Siber du Musée des sauriens d'Aathal, en Suisse.

LES AUTEURS



Jean-Paul BILLON-BRUYAT,
Daniel MARTY et Damien BECKER
sont paléontologues à la Section
d'archéologie et paléontologie
du Canton du Jura, en Suisse.

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. Hummel *et al.*, *In vitro digestibility of fern and gymnosperm foliage: implications for sauropod feeding ecology and diet selection*, Proceedings of the Royal Society B, vol. 275, pp. 1015-1021, 2008.

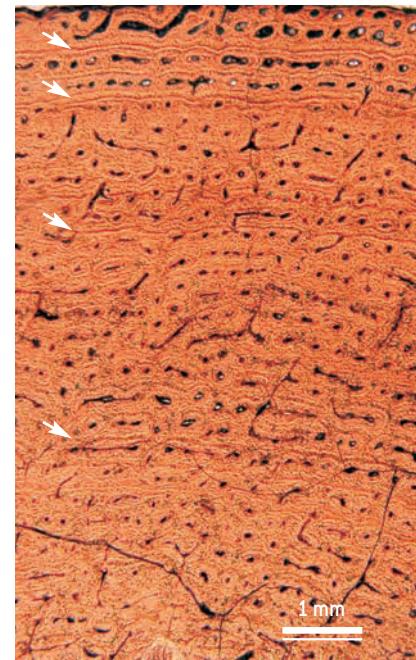
J. Horner, K. Padian et A. de Ricqlès, *Dinosaures : les secrets de leur taille*, Pour la Science, n° 334, août 2005.

D. Marty *et al.*, *Late Jurassic dinosaur tracksites of the Transjurane highway (Canton Jura, Switzerland) : overview and measures for their protection and valorisation*, Bulletin for Applied Geology, vol. 12, pp. 75-89, 2007.

D. Schwarz et G. Fritsch, *Pneumatic structures in the cervical vertebrae of the Late Jurassic Tendaguru sauropods Brachiosaurus brancai and Dicraeosaurus*, Eclogae Geologicae Helvetiae, vol. 99, pp. 65-78, 2006.



4. EUROPASAURUS HOLGERI est un sauro-pode « nain » de six mètres de long découvert dans le Jurassique supérieur de Oker, en Basse-Saxe [Allemagne]. La reconstitution de son crâne (*ci-dessus*) tient dans les mains, ce qui est rare chez les sauro-podes. L'observation au microscope d'une coupe de son tibia (*ci-contre*) montre que le tissu osseux est très riche en canaux vasculaires et présente des cernes de croissance (*flèches*), indiquant une croissance rapide.



des parties hautes des arbres, inaccessibles aux autres dinosaures herbivores (comme les stégosaures et les ornithopodes). Les sauro-podes du Jurassique se nourrissaient dans des environnements dominés par des conifères, par exemple des *Araucaria*. Jürgen Hummel, de l'Université de Bonn, et ses collègues ont récemment analysé la qualité nutritive de végétaux actuels qui étaient disponibles pour les sauro-podes au Jurassique. Il apparaît que les sauro-podes devaient avoir un régime alimentaire sélectif. Ils favorisaient probablement la consommation de certains conifères (*Araucaria*), de ginkgoales (tel le *Ginkgo*), de certaines fougères (telle *Angiopteris*) et de prêles (*Equisetum*), dont les valeurs énergétiques étaient supérieures à celles des cycadales (de type *Cycas*), des fougères arborescentes et d'autres conifères.

Au Crétacé, les sauro-podes ont pu encore diversifier leur nourriture avec l'apparition des plantes à fleurs, tels les magnolias, et goûter aux fruits. Si une partie considérable de la biomasse disponible pour les herbivores se trouvait en hauteur, la grande taille des sauro-podes était un avantage crucial. Remarquons que de très nombreuses pistes de sauro-podes ont été retrouvées à proximité d'anciens rivages marins. Se nourrissaient-ils de plantes situées près du rivage, voire d'algues, qui poussaient sur les parties plus élevées des terres émergées ? La question reste ouverte, mais la présence de très grands sauro-podes dans ces milieux

côtiers montre que les ressources végétales y étaient plus importantes que ne le suggèrent les rares fossiles de flore qui y ont été mis au jour.

Pour se sustenter, un sauro-pode devait sélectionner, ingurgiter et broyer une quantité considérable de végétaux. Un éléphant passe l'essentiel de son temps à chercher sa nourriture ; chaque jour, il consomme environ 200 kilogrammes de végétaux, soit quatre pour cent de son poids, et boit environ 100 litres d'eau. Ces végétaux transitent le long de 40 mètres d'intestins où seulement la moitié de la nourriture est assimilée, un système bien moins efficace que celui des ruminants actuels (telle la vache).

Des pierres pour digérer

Que devait donc consommer un sauro-pode pesant dix éléphants : deux tonnes de végétaux, un mètre cube d'eau ? Nous l'ignorons, mais parmi les inconvénients apparents du gigantisme, l'augmentation des besoins en nourriture et en eau est de règle. Les mâchoires des sauro-podes leur servaient avant tout à saisir et à arracher des branchages et des feuillages. Leurs dents pouvaient être spatulées (en forme de cuiller), comme chez les camarasauridés et les brachiosauridés (*voir la figure 2*) ou encore cylindriques, comme chez les diplodocidés et les titanosaures, mais il est évident qu'elles ne servaient pas à mâcher,

contrairement aux dents des grands mammifères herbivores.

Comment digéraient-ils ? Les tissus mous n'étant pratiquement jamais fossilisés, nous ne connaissons pas le système digestif des sauropodes. Toutefois, des gastrolithes (pierres polies) trouvées au sein de la cage thoracique de certains squelettes (240 sur un *Seismosaurus* de la fin du Jurassique, voir l'encadré page 40) suggèrent que les sauropodes avaient des pierres pour faciliter leur digestion. Ces « pierres de gésier » broyaient les végétaux par frottement au rythme des contractions du gésier (la partie postérieure et musculaire de l'estomac), comme chez les oiseaux herbivores et granivores actuels. Ainsi broyés, les végétaux fermentaient à l'intérieur de très longs intestins, à l'aide d'un cocktail de bactéries et de sucs gastriques. J. Hummel et ses collègues ont montré que l'assimilation des végétaux les plus énergétiques à disposition des sauropodes, tels le conifère *Araucaria* et les prêles (riches en silice), était très lente. Le bol alimentaire fermentait donc lentement dans l'abdomen des sauropodes, dégageant de la chaleur et une grande quantité de gaz intestinaux. Or la fermentation est favorisée par la chaleur, et plus la masse qui fermente est importante, plus la chaleur produite est intense...

À ce propos, le grand corps massif des sauropodes les faisait bénéficier de l'« homéothermie de masse », une déperdition de chaleur moins importante due au faible rapport entre la surface du corps (par où fuit la chaleur) et son volume. James Gillooly, de l'Université de Floride, et ses collègues ont modélisé les températures corporelles de certains dinosaures. Ils concluent que pour le diplodocidé *Apatosaurus* (jusqu'à 30 tonnes), la température passe de 25 °C pour un bébé de 12 kilogrammes à environ 41 °C pour un adulte de 13 000 kilogrammes. Avec leur aptitude à conserver la chaleur corporelle, les sauropodes devaient être insensibles aux variations de la température journalière, voire en surchauffe. Si l'on admet que la fermentation jouait un rôle central dans la digestion des sauropodes, les avantages d'une grande taille deviennent plus évidents : une grande « cuve » rend les bactéries plus efficaces et la chaleur produite y est mieux conservée, grâce à l'homéothermie de masse.

Ainsi se dégage l'impression que, pour exploiter au mieux les ressources végétales de leur environnement, les sauropodes

sont devenus de grandes « cuves à fermentation » sur pattes, alimentées en permanence par un « robot maniable » (leur long cou) portant un « outil de découpe » (leurs mâchoires aux dents coupantes), un système qui gagnait en efficacité en grossissant.

Les tailles gigantesques des sauropodes posent des problèmes biologiques et biomécaniques ardus. Quel était leur

« lamellaire zonaire », ce qui indique une croissance lente. Ainsi, on peut tabler sur les rythmes de croissance des os fibrolamellaires pour estimer le temps de croissance des dinosaures. Le sauropode *Apatosaurus* aurait atteint sa taille adulte en huit à dix ans, ce qui correspond à une prise de masse d'environ 5,5 tonnes par an ! Bien qu'au sortir de l'œuf, les bébés sauropodes ne pesaient que quelques kilogrammes – car issus d'œufs d'une faible contenance (trois à cinq litres) –, ils atteignaient rapidement une taille respectable.

Toutefois, une croissance et une prise de poids rapide posent le problème de la résistance des os, qui soutiennent le corps. Rappelons que si un objet change de taille, son volume et donc son poids augmentent comme le cube de sa taille. En théorie, le poids d'un sauropode atteignant cinq mètres de haut était 1 000 fois plus important que celui du même animal quand il ne mesurait que 50 centimètres. Et chaque centimètre carré de section du fémur d'un sauropode de cinq mètres de haut devait supporter dix fois plus de pression qu'un centimètre carré du même fémur quand l'animal mesurait seulement 0,5 mètre de haut.

Le squelette des sauropodes, bien ancré sur des membres massifs et des ceintures scapulaires (les épaules) et pelviennes

LES TAILLES GIGANTESQUES

des sauropodes posent d'ardus problèmes biomécaniques.

mode de croissance ? Comment supportaient-ils leur poids ?

Depuis 30 ans, l'analyse des tissus osseux de dinosaures par Armand de Ricqlès, de l'Université Paris VII, montre que leur croissance était rapide. Il apparaît que les dinosaures et les ptérosaures (leurs cousins volants) formaient principalement de l'os de type « fibrolamellaire » (voir la figure 4), le type de tissu osseux que développent les mammifères et les oiseaux, reflet d'une vitesse de croissance élevée. À l'inverse, les crocodiliens et autres reptiles forment principalement de l'os de type



5. MESURE D'UNE EMPREINTE DE PIED DE SAUROPODE de plus d'un mètre de diamètre découverte par l'équipe des auteurs à Courtedoux, dans les couches géologiques du Jurassique supérieur du Jura suisse. Avec plus de six mètres de hauteur à la hanche, ces très grands sauropodes n'hésitaient pas à s'aventurer sur les « plages ». La trace du « pied » est de forme circulaire, ce qui montre que ce très grand sauropode était plantigrade pour les pattes postérieures. En revanche, la trace de la « main » (*au premier plan*) est en forme de demi-lune, ce qui indique que l'animal était davantage digitigrade pour les pattes antérieures. À l'avant des empreintes, des bourrelets se sont formés par expulsion de la boue carbonatée de l'époque qui s'est transformée en calcaire.

(le bassin) robustes, présentait-il des allégements ? Un exemple est donné par leur long cou, constitué de vertèbres pourvues d'un système complexe de cavités. Dès les premières découvertes de squelettes de sauropodes, les paléontologues ont pensé qu'elles avaient évolué pour alléger la longue colonne vertébrale. Récemment, Daniela Schwarz, du Muséum d'histoire naturelle de Berlin, a utilisé la tomographie X pour quantifier l'important rôle biomécanique joué par ces cavités dans l'allégement de certains sauropodes (*voir la figure 6*). Le gain de poids obtenu pour le cou est estimé à 25 pour cent chez *Brachiosaurus*, mais seulement à 6 pour cent chez *Dicraeosaurus*, un sauropode atteignant 20 mètres de long, qui vivait au Jurassique supérieur dans ce qui est aujourd'hui la Tanzanie.

Bien que les vertèbres des sauropodes soient massives, leurs structures sont comparables à celles des oiseaux en ceci qu'elles sont pleines de vide. Chez les oiseaux, les cavités vertébrales logent des sacs d'air connectés aux poumons par des canaux. L'air est d'abord inspiré dans les sacs aériens, puis dans les poumons, ce qui constitue un système très efficace pour extraire l'oxygène et rejeter le dioxyde de carbone.

Les sauropodes possédaient ce type de système pulmonaire à forte capacité, ce qui, sans doute, était précieux pour oxygénier leur grand corps. Pour autant, l'allégement de la colonne vertébrale et ce système respiratoire de type avien étaient-ils propres aux sauropodes ? Non, on les rencontre aussi chez les prosauropodes (dinosaures herbivores du Trias et du Jurassique inférieur, apparentés aux sauropodes), les théropodes et les ptérosaures ; mais ils sont absents chez les autres reptiles.

Le cou des sauropodes avait donc des vertèbres allégées, mais il était aussi démesuré, si long qu'il en paraît aberrant, jusqu'à quatre fois la longueur du tronc. C'est le cas chez *Mamenchisaurus*, par exemple, une extraordinaire forme du Jurassique de Chine dont le cou mesurait dix mètres de long. Comment les sauropodes ont-ils développé de si longs cous ? Comment la circulation du sang contraint les effets de la gravité pour irriguer le cerveau ? Ce cou était-il flexible ?

Nous avons vu que ce long cou leur était nécessaire pour « ratisser » efficacement leur environnement. Étant donné la longueur, la posture et la souplesse de leurs cous, on déduit les caractéristiques principales des niches écologiques qu'occupaient les sauropodes. Pour tester la position et la flexibilité biomécanique des cous, Kent Stevens, de l'Université d'Oregon, et son collègue Michael Parrish ont construit des modèles informatiques de l'anatomie des sauro-

podes. Selon leurs simulations, le cou de *Brachiosaurus* aurait été quasiment à l'horizontale, contrairement aux reconstitutions classiques où il est redressé comme chez la girafe ; toutefois, cette nouvelle conception est loin de faire l'unanimité. Quoi qu'il en soit, la grande taille de *Brachiosaurus* et ses membres antérieurs, plus longs que les postérieurs, lui permettaient de saisir des branches situées à plus de six mètres de haut. L'articulation des vertèbres cervicales de *Diplodocus* montre que son très long cou était peu flexible vers le haut ; en revanche, il pouvait aisément le baisser pour manger à même le sol. Ainsi, *Diplodocus* pouvait saisir des feuillages à quatre mètres de haut, mais aussi brouter des fougères et des prêles, avec l'élégance d'un bovin... *Brachytrachelopan*, un sauropode de moins de dix mètres de long du Jurassique supérieur d'Argentine, n'avait qu'un petit cou peu flexible dorsalement. Sans doute se nourrissait-il de plantes ne dépassant pas deux mètres au-dessus du sol.

Le long cou des sauropodes

Comment le cou des sauropodes s'est-il allongé au fil du temps ? Cette évolution s'est produite par deux voies : un allongement de la longueur des vertèbres cervicales (atteignant parfois plus d'un mètre) ou une augmentation de leur nombre (jusqu'à 19), voire les deux simultanément. Le très long cou de *Brachiosaurus*, par exemple, résulte d'un allongement de ses cervicales (13 vertèbres dont certaines atteignent 75 centimètres). Notons que chez les mammifères, le nombre de vertèbres cervicales (sept) est constant, quelle que soit la longueur du cou des animaux, homme ou girafe. Comment des vertèbres supplémentaires se sont-elles mises en place dans le cou des sauropodes ? Elles se sont ajoutées par conversion de vertèbres dorsales en cervicales. Mais il est possible que dans certaines branches du groupe des sauropodes, le cou ait eu tendance à se raccourcir. C'est ce que suggère Olivier Rauhut, de la Collection paléontologique de l'État bavarois, pour la famille des dicraeosauridés, à partir du « petit » sauropode argentin *Brachytrachelopan* dont la longueur du cou ne représentait que 75 pour cent de celle du tronc.

À l'extrémité du cou des sauropodes se trouvait un crâne minuscule, en proportion avec le corps : 70 centimètres de long pour un *Diplodocus* de 26 mètres ! Les mâchoires des sauropodes ne servaient pas à mastiquer, mais seulement à la prise de nourriture, leur crâne a pu rester petit, prérequis nécessaire au développement d'un long cou. De fait, les sauropodes avaient le plus faible quotient d'encéphalisation de tous les dinosaures, c'est-à-dire le plus faible rapport masse cérébrale / masse corporelle. Insistons sur le fait que le quotient d'encéphalisation ne reflète pas les capacités cognitives (*Homo sapiens*, par exemple, a un cerveau légèrement moins volumineux que celui d'un Néandertalien...). C'est donc à tort que l'on s'est servi de la faible valeur du quotient d'encéphalisation des

GASTROLITHES

✓ Ensemble de gastrolithes ou « pierres de gésiers » découverts dans le squelette d'un *Seismosaurus* dans le Jurassique supérieur des États-Unis. Ces pierres étaient ingurgitées par les sauropodes afin de faciliter le broyage des végétaux dans leur estomac et par là leur digestion.



Columbia University Press

DÉCOUVREZ LES MYSTÈRES DE LA VIE



COMMENT LA VIE A COMMENCÉ

Les trois génèses du vivant

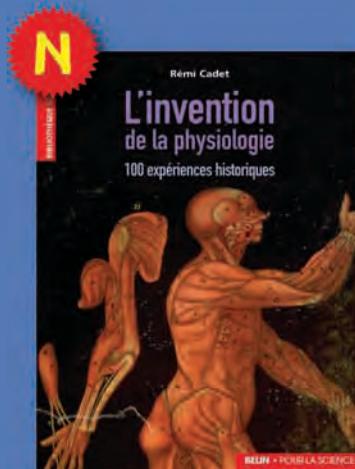
Alexandre Meinesz

D'où vient la vie ? Comment a-t-elle évolué au fil du temps ? L'auteur raconte dans ce livre les grandes étapes de l'histoire de la vie et les événements créatifs et destructeurs qui l'ont façonnée. Biogiste écologue, il agrémente son récit de ses expériences d'homme de terrain curieux et amoureux de la nature.

004694 **19,50 €**

Frais de port offerts
pour toute commande
de 2 exemplaires ou plus*

*Gratuit pour la France métropolitaine
et de 7 euros pour les DOM-TOM et étranger.



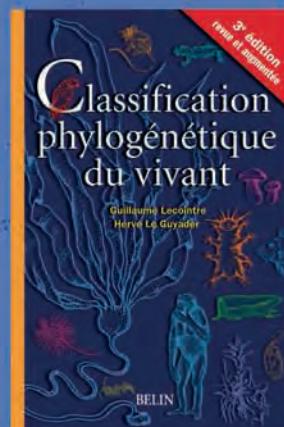
L'INVENTION DE LA PHYSIOLOGIE

100 expériences historiques

Rémi Cadet

Avec quelles expériences les biologistes sont-ils parvenus à comprendre des processus tels que la digestion, la respiration, la circulation sanguine, la reproduction, la communication ou la défense de l'organisme ? À partir de documents originaux, l'auteur nous propose une plongée dans 100 expériences qui ont posé les bases de la physiologie animale, tout en rappelant l'essentiel des connaissances actuelles concernant chaque question abordée.

004550 **25,00 €**



CLASSIFICATION PHYLOGÉNÉTIQUE DU VIVANT

3^e édition revue et augmentée

Guillaume Lecointre, Hervé Le Guyader

Savez-vous que vous êtes plus proches d'un bolet que d'une pâquerette ? Que les crocodiles tiennent davantage des oiseaux que des lézards ? C'est là le résultat des bouleversements de la classification, dont les méthodes ont été totalement repensées au cours de ces trente dernières années. Ce livre est une incursion exceptionnelle dans l'arbre de la vie.

004273 **39,90 €**



BON DE COMMANDE

À retourner à : Éditions Belin – BP 2 – 28410 Saint-Lubin-de-la-Haye

Titre	Code	Offre spéciale	Prix unitaire	Pages	Qté	Prix total
Comment la vie a commencé	004694	19,50 €	18,50 €	240 pages	----	----- €
L'invention de la physiologie	004550	25,00 €	23,75 €	256 pages	----	----- €
Classification phylogénétique du vivant	004273	39,90 €	37,90 €	560 pages	----	----- €
Participation aux frais de port et d'emballage :						
				France métropolitaine		+ 4,00 €
				DOM-TOM et étranger		+ 11,00 €
				TOTAL COMMANDE		----- €

Vous trouverez ci-joint mon règlement

- Par chèque à l'ordre des Éditions Belin
- Par mandat administratif
- Par carte bancaire:

Numéro ----- Date de validité -----

Cryptogramme visuel -----

Adresse de réception

Nom ----- Prénom -----

Adresse -----

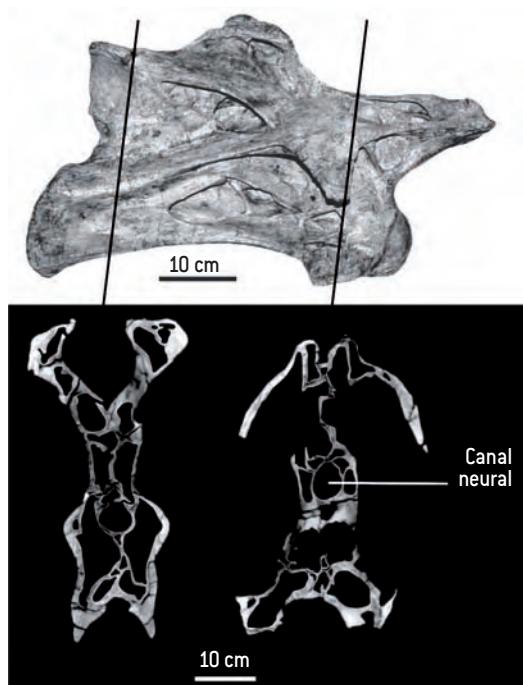
Code postal ----- Ville -----

Pays ----- Téléphone ----- Mobile -----

Email ----- @ -----

Je souhaite être informé(e) des parutions des Éditions Belin

Signature obligatoire



6. CES COUPES TRANSVERSALES d'une vertèbre cervicale (en haut) du *Brachiosaurus brancai*, du Jurassique supérieur de Tanzanie, ont été obtenues par tomographie informatisée. Grâce à cette technique non destructive, on parvient à quantifier les cavités de la vertèbre (image ci-dessus). Les trous et des indentations présentes dans sa structure interne l'allègent sans pour autant trop compromettre sa solidité, même si elle réduit l'os à de fines cloisons par endroits. Le « canal neural » indique le passage de la moelle épinière.

sauropodes pour les présenter comme particulièrement limités. L'étaient-ils ? Nous l'ignorons.

Le quotient d'encéphalisation et l'anatomie des sauropodes posent la question de l'irrigation d'un cerveau situé à l'extrémité d'un si long cou. Examinons le cas de la girafe, dont le cerveau est à environ deux mètres au-dessus du cœur, un cœur de 11 kilogrammes qui pompe 60 litres de sang par minute. Pour obtenir une pression artérielle suffisante au niveau de la tête, c'est-à-dire 100 millimètres de mercure, la pression artérielle au niveau du cœur atteint 260 millimètres de mercure, ce qui est très élevé. C'est pourquoi les parois artérielles des girafes, qui doivent résister à ces pressions, sont très épaisses et pourvues de muscles annulaires au niveau du cou pour aider à propulser le sang jusqu'au cerveau. En revanche, lorsque la girafe s'abreuve, sa tête se trouve à deux mètres sous le cœur. Les valvules, véritables soupapes des veines jugulaires – les plus longues jugulaires du monde animal actuel –, orientent alors le sang vers le cœur pour l'empêcher d'« inonder » le cerveau.

Afin de contrer les effets de la gravité étant donné leur anatomie, les sauropodes ont dû, comme la girafe, développer une pompe cardiaque puissante et des vaisseaux sanguins renforcés et équipés de valves de sécurité. La pression artérielle de *Brachiosaurus*, dont la tête s'élevait jusqu'à 12 mètres au-

dessus du sol et à huit mètres au-dessus de son cœur, devait ainsi être très élevée. On a estimé la différence de pression entre sa tête et son cœur à 600 millimètres de mercure ! Les tissus mous cardiaques n'ayant pas été fossilisés, nous n'avons pas de preuves directes, mais nous pouvons noter que la partie antérieure de la cage thoracique des sauropodes était suffisamment large et profonde pour loger un cœur de plusieurs centaines de kilogrammes.

Des quadrupèdes herbivores dynamiques

Cette circulation sanguine particulière a-t-elle pu se développer au cours de l'évolution d'animaux à « sang froid » ? Les puissants muscles nécessaires pour animer un énorme corps suggèrent que le métabolisme des sauropodes était élevé, pareil à celui des animaux homéothermes (à température constante) et endothermes (production de chaleur interne), que l'on rencontre chez les mammifères et les oiseaux. On sait en effet que les reptiles actuels (serpents, lézards, tortues, crocodiliens), qui sont poikilothermes (température variable) et ectothermes (énergie calorifique puisée dans le milieu extérieur), peinent à réguler leur température corporelle. Si leurs muscles leur donnent une grande force à court terme, ils n'ont que peu d'endurance.

De telles caractéristiques pouvaient-elles suffire aux sauropodes, qui, comme les éléphants aujourd'hui, devaient se déplacer pour trouver suffisamment de nourriture ? Vraisemblablement pas, ce qui suggère que les sauropodes étaient à « sang chaud ». Cela est corroboré par une étude géochimique de l'équipe de Christophe Lécuyer, de l'Université Lyon I, établissant que les dinosaures avaient une physiologie thermique plus proche de celle des mammifères que de celle des reptiles contemporains. Ces chercheurs ont rassemblé des dents de dinosaures, dont certaines de sauropodes, des dents de crocodiliens ainsi que des plaques dermiques de crocodiliens et de tortues issues de gisements crétacés, dont celui de Cherves-de-Cognac en Charente. Puis ils ont mesuré les rapports isotopiques de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) des phosphates préservés dans les fossiles. Comme ce rapport dépend de la température au moment de la synthèse des phosphates, il apparaît qu'au cours de la croissance des animaux, la température corporelle des dinosaures était plus élevée que celle des reptiles.

Ainsi, les plus grands vertébrés terrestres ayant jamais vécu, les sauropodes, étaient des quadrupèdes herbivores dynamiques, construits pour optimiser leur quête de nourriture et leur digestion. Leur biologie, caractérisée par un métabolisme élevé, était bien plus proche de celle des oiseaux et des mammifères que de celle des autres reptiles. Ce résultat est conforté par la classification des espèces puisque, sur la branche des dinosaures, les sauropodes sont proches des théropodes, dont descendent les oiseaux.

Astérix

LA GRANDE COLLECTION DU RIRE EN GRAND FORMAT !

2 NOUVEAUX TITRES
DÉJÀ DISPONIBLES DANS TOUTE LA GAULE

R. GOSCINNY - A. UDERZO

Astérix

LE GRAND
FOSSE

Texte et dessins d'Albert UDERZO
- UDERZO -

Astérix LA GRANDE COLLECTION

LES ÉDITIONS
ALBERT
RÉNÉ

R. GOSCINNY - A. UDERZO

Astérix

L'ODYSSEÉ
D'Astérix

Texte et dessins d'Albert UDERZO

Astérix LA GRANDE COLLECTION

LES ÉDITIONS
ALBERT
RÉNÉ

GRAND FORMAT - NOUVELLE COLORISATION

DÉJÀ PARUS :

ASTÉRIX LE GAULOIS / LA SERPE D'OR / ASTÉRIX ET LES GOTHS
ASTÉRIX GLADIATEUR / LE TOUR DE GAULE D'ASTÉRIX
ASTÉRIX ET CLÉOPÂTRE / ASTÉRIX AUX JEUX OLYMPIQUES
LE FILS D'ASTÉRIX / ASTÉRIX CHEZ RAHÂZADE
LA ROSE ET LE GLAIVE / LA GALÈRE D'OBÉLIX
ASTÉRIX ET LATRAVIATA / ASTÉRIX ET LA RENTRÉE GAULOISE

HACHETTE

LES ÉDITIONS
ALBERT
RÉNÉ