



JPEG



JPEG 2000



> annuler les plus petits coefficients dans la décomposition du signal en ondelettes. La théorie statistique qui justifie et développe cela a été mise au point par David Donoho (lauréat du prix Gauss en 2018), de l'université Stanford, et ses collègues.

De façon générale, les développements de l'analyse de Fourier sont au cœur de l'actualité scientifique et technique. Ils interviennent partout dans le traitement de données vocales ou musicales, où la séparation des sources et leur caractérisation s'appuient sur l'identification de motifs spectraux et de leurs occurrences au fil du temps.

En ingénierie biomédicale, la détection de signatures temps-fréquence caractéristiques dans des enregistrements de signaux ou d'images dans différentes modalités (électroencéphalographie, électrocardiographie, magnétoencéphalographie...) peut être associée à diverses pathologies.

UNE APPROCHE QUI NE CESSE DE SE RENOUVELER

Plus fondamentalement, l'une des techniques d'apprentissage profond les plus récentes, la «transformée de scattering», développée par Stéphane Mallat et ses collègues, peut être interprétée comme une variante des

La norme JPEG de compression d'images, créée en 1992 par le collectif d'experts nommé Joint Photographic Experts Group, est d'un usage très répandu. Elle utilise une représentation des images à base de fonctions cosinus (DCT, pour *Discrete Cosine Transform*). En 2000, a été proposée la norme JPEG 2000, qui utilise une compression à base d'ondelettes. Comme le montrent ces images (décompressées), la compression JPEG 2000 offre une qualité bien meilleure que la norme JPEG initiale, pour une même taille de fichier.

techniques des réseaux de neurones profonds, où l'on calcule des itérées de la transformée en ondelettes. Elle et ses variantes ouvrent la voie à de nouveaux algorithmes de classification de sons ou d'images.

On peut noter enfin que la théorie récente de l'«acquisition comprimée», ou *compressed sensing* en anglais, introduite par Emmanuel Candès, Justin Romberg, Terence Tao et David Donoho, parvient à exploiter le fait qu'un signal ayant une représentation parcimonieuse dans une base bien choisie (ce qui est le cas avec les ondelettes pour la plupart des données naturelles) peut être acquis au moyen d'un très petit nombre d'échantillons. Cette théorie trouve actuellement des applications importantes en imagerie médicale: on a ainsi pu réduire de façon spectaculaire le temps nécessaire pour effectuer une IRM.

Ainsi, l'approche proposée par Fourier ne cesse de se renouveler sans rien perdre de ses principes fondateurs. Deux siècles plus tard, elle reste d'une étonnante actualité. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Chassande-Mottin et al., **Des ondelettes pour détecter les ondes gravitationnelles**, *Gazette des Mathématiciens*, n° 148, pp. 61-64, mars 2016.

T. Butz, **Fourier Transformation for Pedestrians**, Springer, 2^e édition, 2015.

B. B. Hubbard, **Ondes et ondelettes - La saga d'un outil mathématique**, *Pour la Science*, 1995.

Y. Meyer et al., **L'analyse par ondelettes**, *Pour la Science*, septembre 1987, pp. 28-37.

tables rondes

16, 23 et 30 janvier 2019 à 19h

Que peuvent nous apporter la recherche et l'innovation technologique en chimie dans trois domaines de la vie quotidienne : l'alimentation, le bien-être et les médicaments ?

Avec

Mathilde Touver, Inserm ; Nadine Vallet, Institut supérieur international du parfum ; Françoise Weber, Agence nationale de sécurité sanitaire ; Laurence Coiffard, université de Nantes ; Patricia Pineau, revue *L'Actualité chimique* ; Patrice Revillard, parfumeur indépendant chez Maelstrom ; Jacques Vaillant, Société française des parfumeurs ; Ali Al-Mourabit, Institut de chimie/CNRS ; Arnaud Bedin, Sanofi-Aventis ; Hélène Budzinski, CNRS, université Bordeaux-I ; François Chast, hôpitaux universitaires Paris-centre ; Christelle Ratignier-Carbonneil, Agence du médicament.

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE



naturellement chimiques...

tables rondes accès gratuit

— les mercredis à 19h



©Agetafoto

nuits des idées : face au présent

événement mondial accès gratuit

jeudi 31 janvier
— de 19h à 23h



©Jeffrey Hamilton

tables rondes

À l'occasion de la Nuit des idées 2019, le Palais de la découverte propose une série de débats. Des mutations technologiques, sociales, environnementales, géopolitiques, que l'on pensait relever d'un avenir lointain, font désormais partie de notre quotidien et appellent de nouvelles adaptations. Quels en sont les enjeux et comment les tenir ?

Venez en discuter avec des scientifiques et philosophes.

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE



Le triomphe improbable des dinosaures

L'histoire était entendue : à leur apparition, les dinosaures avaient vite surpassé les autres vertébrés. Faux, indiquent de nouveaux fossiles. Rien ne prédestinait les terribles lézards à devenir les maîtres du Mésozoïque.

Dromomeron, un précurseur des dinosaures, s'approche prudemment de l'eau pour boire, il y a 212 millions d'années, dans une oasis de l'actuel Nouveau-Mexique. *Koskinonodon*, un amphibien géant, est à l'affût. La vie n'était pas simple à l'époque pour les ancêtres des dinosaures...



L'ESSENTIEL

> Selon la vision classique en paléontologie, les dinosaures étaient dotés dès leur origine d'une vitesse, d'une agilité, d'un métabolisme et d'une intelligence tels qu'ils ont vite dominé tous leurs compétiteurs et colonisé l'intégralité du globe.

> De nouvelles découvertes et analyses de fossiles contredisent ce scénario. En réalité, les dinosaures ont peu évolué à leurs débuts. Il a fallu des dizaines de millions d'années pour qu'ils surpassent leurs rivaux et conquièrent la planète.

L'AUTEUR



STEPHEN BRUSATTE
paléontologue à l'université
d'Édimbourg, en Écosse

Quand j'étais adolescent, au tournant du millénaire, à peu près au même moment où la passion des fossiles a commencé à me dévorer, le musée Field d'histoire naturelle, à Chicago, a démantelé son brachiosaure et installé à la place un *Tyrannosaurus rex*. En somme, l'établissement échangeait un dinosaure iconique pour un autre. Adieu le colosse herbivore pesant le poids de plus de dix éléphants, dont le cou s'élevait gracieusement bien au-delà de la galerie du deuxième étage. Désormais les spectateurs frissonneraient devant le prédateur le plus grand et le plus féroce de tous les temps : une brute de la taille d'un bus avec des rangées de dents en pointe capables de briser les os de ses proies.

Ces deux monstres ont enflammé mon imagination. Comme j'habitais à 120 kilomètres de Chicago par la route, au milieu d'une plaine du Midwest couverte de champs de maïs et de haricots, je leur rendais visite aussi souvent que j'arrivais à convaincre mes parents de faire le trajet. Leurs squelettes m'hypnotisaient : tout était différent chez eux par rapport aux animaux modernes, leur taille, leur puissance, leur corps... Presque des extraterrestres à mes yeux. Pas étonnant que la lignée des dinosaures ait gouverné la Terre pendant plus de 150 millions d'années. Ils étaient majestueux.

Mais comment les dinosaures étaient-ils apparus ? Par quel chemin de l'évolution ? Je m'attardais rarement sur cette question pendant ces années d'obsession. De même qu'il m'était difficile d'imaginer que mes parents avaient eu un jour mon âge, j'avais juste supposé que les dinosaures s'étaient matérialisés dans un lointain passé sous la forme de géants au long cou et aux dents acérées. Je l'ignorais à l'époque, mais cette vision naïve n'était pas si éloignée du consensus scientifique régnant à la fin du xx^e siècle. Les paléontologues s'entendaient sur le fait que la vitesse, l'agilité et le métabolisme des dinosaures étaient si

exceptionnels qu'ils avaient dû facilement surpasser leurs premiers rivaux et se rendre maîtres de toute la planète.

Cependant, au cours des quinze dernières années, de nouveaux éléments ont ébranlé ce scénario. Une profusion de fossiles, ajoutés à une meilleure connaissance du monde physique des premiers dinosaures et des filiations entre espèces, mais aussi de nouvelles méthodes d'analyse des tendances évolutives ont revisité cette théorie et nous racontent une autre histoire : l'apparition des dinosaures a été graduelle et, pendant leurs trente premiers millions d'années, ces animaux n'ont vécu que dans quelques coins du monde, dépassés par d'autres espèces. C'est seulement grâce à quelques coups de chance qu'ils ont pu coloniser davantage d'espace et devenir les maîtres de la planète.

DES TRACES ÉTRANGES EN POLOGNE

Comme de nombreuses espèces au cours de l'évolution, les dinosaures sont nés d'une catastrophe. Il y a 252 millions d'années, à la toute fin de la période géologique du Permien, une poche de magma a commencé à gronder sous la Sibérie. Les animaux vivant en surface – une ménagerie exotique formée de grands amphibiens, de reptiles à la peau bosselée et de carnivores précurseurs des mammifères – n'avaient aucune idée du cataclysme en préparation. Des coulées de roche liquide se sont frayé un chemin à travers le manteau terrestre puis la croûte, avant de s'écouler en surface par des fissures de dimension kilométrique. Pendant des centaines de milliers, voire des millions d'années, les éruptions ont continué, crachant de la chaleur, de la poussière, des gaz nocifs et assez de lave pour ennoyer plusieurs millions de kilomètres carrés du paysage asiatique. L'élévation des températures, l'acidification des océans et l'effondrement des écosystèmes comptèrent parmi les conséquences. Jusqu'à 95% des espèces du Permien périrent. Ce fut la plus effroyable extinction

d'espèces de l'histoire de la Terre (l'événement marqua l'entrée dans le Trias, la période géologique qui a succédé au Permien).

Mais une poignée de survivants s'en étaient sortis. Lorsque les volcans se calmèrent et les écosystèmes se stabilisèrent, ces animaux miraculés se retrouvèrent dans un monde en grande partie vide. Parmi eux figuraient divers petits amphibiens et reptiles, qui se diversifièrent à mesure que la Terre reprenait vie et qui, plus tard, engendreraient les grenouilles, salamandres, tortues, lézards et les mammifères que nous connaissons.

Les traces de ces animaux ne sont pas des fossiles proprement dits, mais des empreintes de pattes découvertes dans les monts Sainte-Croix, en Pologne, dans des couches de sédiments fluviaux et lacustres. Pendant plus de vingt ans, Grzegorz Niedźwiedzki, qui a grandi dans ces collines et est aujourd'hui paléontologue à l'université d'Uppsala, en Suède, a méticuleusement collecté les traces, parfois avec moi. En 2005, alors qu'il prospectait près du village de Stryczowice, le long d'un ruisseau étroit entrecoupé de ronces, Grzegorz Niedźwiedzki mit au jour un type inhabituel de traces qui ne semblaient correspondre à aucun reptile ou amphibien commun. De la taille de pattes de chat et alignées en pistes étroites, les empreintes montraient les sillons de trois orteils centraux flanqués d'un bourgeon d'orteil de chaque côté. Ces caractéristiques les classaient parmi les *Prorotodactylus*, un genre décrit en 2000, lui aussi sur la seule base d'empreintes.

Les traces de *Prorotodactylus* dataient d'environ 250 millions d'années, soit 1 ou 2 millions d'années après les éruptions volcaniques qui ont mis fin au Permien. D'emblée, d'après le faible écart séparant les empreintes gauches et droites, il était clair qu'elles se rattachaient à un groupe spécifique de reptiles, les archosaures, qui étaient apparus après l'extinction

Les premiers dinosaumorphes avaient la taille d'un chat et de longues jambes maigres

Des empreintes fossiles de *Prorotodactylus* montrent qu'il y a environ 250 millions d'années des précurseurs des dinosaures – des dinosaumorphes – ont foulé le sol des actuels monts Sainte-Croix, en Pologne.

du Permien et étaient dotés d'une innovation évolutive: une posture dressée qui les aidait à courir plus vite, à couvrir des distances plus longues et à traquer leurs proies avec davantage d'agilité. Cela signifiait qu'elles fourniraient peut-être des indices sur les origines des dinosaures. En effet, peu après leur apparition, les archosaures se sont séparés en deux lignées majeures qui, jusqu'à la fin du Trias, n'ont cessé de s'affronter dans une course évolutive aux armements: les pseudosuchiens, qui ont conduit aux crocodiles modernes, et les avemetatarsaliens, qui ont mené aux dinosaures. Dans quelle branche *Prorotodactylus* se rangeait-il?

DES PRÉCURSEURS PETITS ET RAPIDES

Pour le savoir, j'ai mené une étude avec Grzegorz Niedźwiedzki et Richard Butler, maintenant à l'université de Birmingham, en Angleterre. Notre analyse des empreintes, publiée en 2011, a révélé deux particularités qui les relient aux caractéristiques du pied des dinosaures: d'une part, une marche «digitigrade», où seuls les orteils entrent en contact avec le sol lors de la marche (et non le pied entier) et, d'autre part, des pieds étroits qui ne comportent que trois orteils principaux. *Prorotodactylus* est donc un dinosaumorphe: ce n'est pas un dinosaure au sens strict, mais un membre primitif du sous-groupe des avemetatarsaliens, qui inclut les dinosaures et leurs plus proches cousins. Les membres de ce groupe avaient une longue queue, de puissantes jambes et des hanches dotées d'os supplémentaires qui reliaient les cuisses au tronc, ce qui leur permettait de se déplacer encore plus vite et plus efficacement que les autres archosaures.

Ces premiers dinosaumorphes n'étaient pas bien effrayants, cependant. Ils avaient la taille d'un chat domestique et de longues jambes maigres. Et ils n'étaient pas nombreux non plus: moins de 5% de toutes les traces de Stryczowice appartiennent à *Prorotodactylus* et elles sont noyées au milieu de celles de petits reptiles, d'amphibiens et même d'autres archosaures. Le temps des dinosaures n'était pas venu. Pas encore.

Au cours des 10 à 15 millions d'années suivantes, les dinosaumorphes ont continué à se diversifier. Les archives fossiles de cette période montrent un nombre croissant d'empreintes du même type, d'abord en Pologne, puis dans le monde entier. Les traces s'agrandissent et l'éventail de leurs formes s'élargit. Certaines pistes deviennent dépourvues d'empreintes de mains, un signe que leurs propriétaires ne marchaient plus que sur leurs pattes arrière. Les squelettes avaient donc commencé à se redresser. Puis, à un moment il y a entre 240 et 230 millions d'années, l'un de ces ➤



> dinosauiromorphes primitifs a évolué en un dinosaure. Seul le nom a radicalement changé – la transition n’a comporté que quelques subtiles innovations anatomiques : une longue fente sur le haut du bras où s’ancraient de plus gros muscles, des collerettes en forme de tablier sur les vertèbres du cou où s’enracinaient des ligaments plus solides, et une articulation ouverte reliant le fémur et le bassin, qui stabilisait la posture debout. Pourtant, aussi modestes soient ces changements, ils ont marqué le début d’une nouvelle ère.

Les plus anciens fossiles de dinosaures au sens strict, qui datent d’environ 230 millions d’années, proviennent du paysage martien du parc naturel d’Ischigualasto, en Argentine. Là, pendant des décennies, des scientifiques, dont le paléontologue américain Alfred Romer et les chercheurs argentins Osvaldo Reig et José Bonaparte, au milieu du xx^e siècle, ont mis au jour des fossiles. Plus récemment, dans les années 1980 et 1990, Paul Sereno, de l’université de Chicago, et Ricardo Martínez, de l’université nationale de San Juan, en Argentine, ont mené des expéditions à Ischigualasto. Parmi les fossiles exhumés au fil des ans figurent ceux de *Herrerasaurus*, *Eoraptor* et d’autres animaux représentant les trois branches principales de la famille des dinosaures : les théropodes carnivores, les sauropodomorphes, herbivores à long cou, et les ornithischiens, herbivores à bec.

CANTONNÉS AUX LATITUDES MOYENNES DE LA PANGÉE

Au milieu du Trias, il y a environ 230 à 220 millions d’années, ces trois principaux sous-groupes de dinosaures étaient constitués et vivaient dans un monde que nous reconnaitrions à peine. À l’époque, un seul supercontinent, la Pangée, s’étendait d’un pôle à l’autre, entouré d’un océan mondial, la Panthalassa. À première vue, la Terre n’était pas très hospitalière. Le climat était beaucoup plus chaud qu’aujourd’hui et, la Pangée étant centrée sur l’équateur, la moitié des terres brûlaient sous le soleil en été tandis que l’autre éprouvait la morsure du froid hivernal. Ces écarts thermiques prononcés alimentaient de violentes moussons gigantesques qui séparaient la Pangée en provinces caractérisées par divers degrés de précipitations et de vent. La région équatoriale, incroyablement chaude et humide, était bordée des deux côtés par des déserts subtropicaux. Les régions de latitudes moyennes étaient légèrement plus fraîches et beaucoup plus humides.

Herrerasaurus, *Eoraptor* et les autres dinosaures d’Ischigualasto bénéficiaient du climat relativement clément des moyennes latitudes, de même que leurs cousins du Brésil et de l’Inde, dont les fossiles ont été mis au jour récemment. Mais *quid* du reste du

QUERELLE DE FAMILLE

Le débat peut-être le plus houleux de la recherche contemporaine sur les dinosaures porte sur la façon dont les théropodes, les sauropodomorphes et les ornithischiens sont regroupés au sein d’une même famille. En 1887, le paléontologue britannique Harry Govier Seeley étudia la masse de nouveaux fossiles en provenance d’Europe et de l’Ouest américain et soutint que les dinosaures pouvaient être rangés en deux catégories distinctes, fondées sur la structure des os de la hanche. Les théropodes et les sauropodomorphes ont un os pubien pointant vers l’avant, comme les lézards modernes, aussi les rassembla-t-il dans un même groupe qu’il nomma les saurischiens – les « espèces à hanche de lézard ». Il considéra en revanche les ornithischiens, avec leur pubis projeté en arrière comme chez les oiseaux modernes, comme une branche distincte de dinosaures à « hanche d’oiseau ». Cette dichotomie fondamentale perdure aujourd’hui. Comme tous mes camarades chasseurs de fossiles, j’ai appris cette façon de classer les dinosaures à l’université.

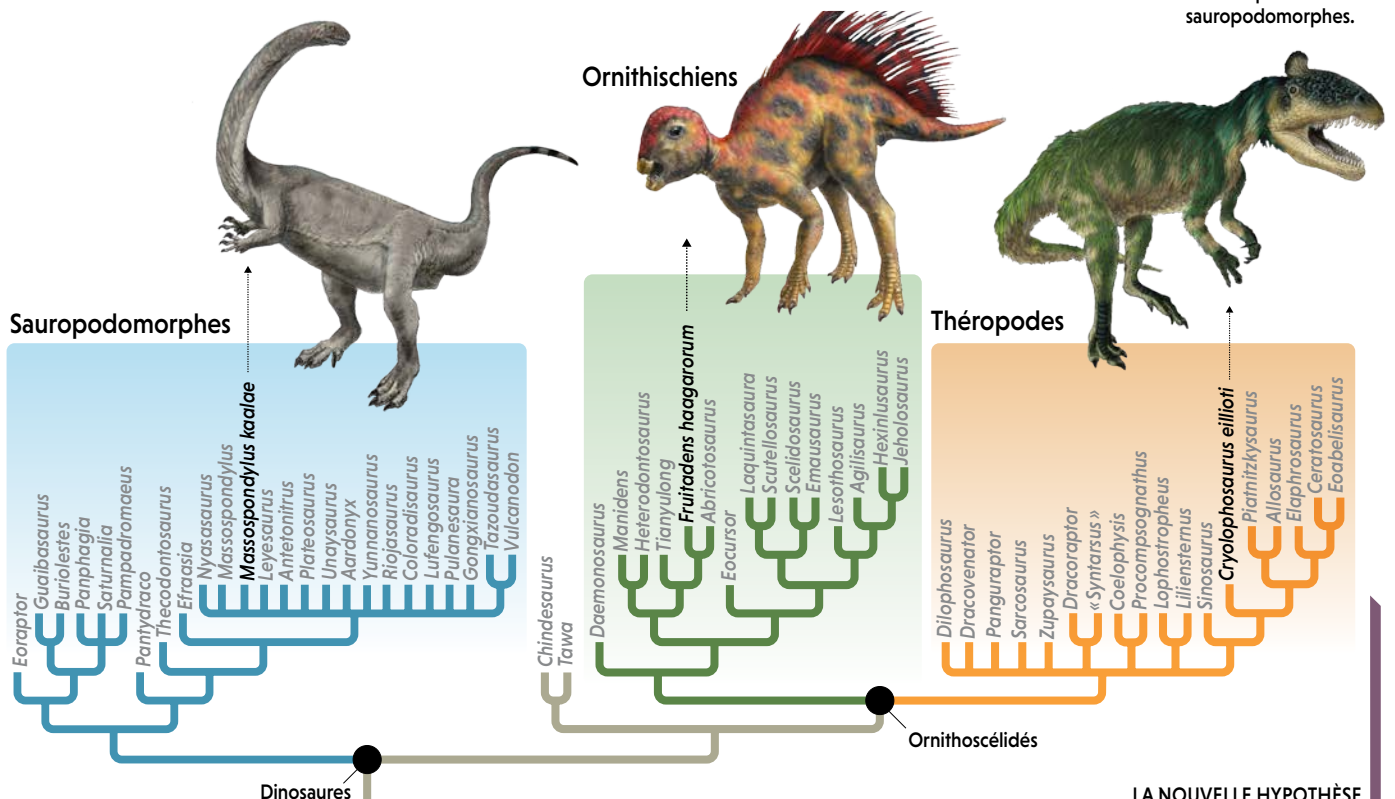
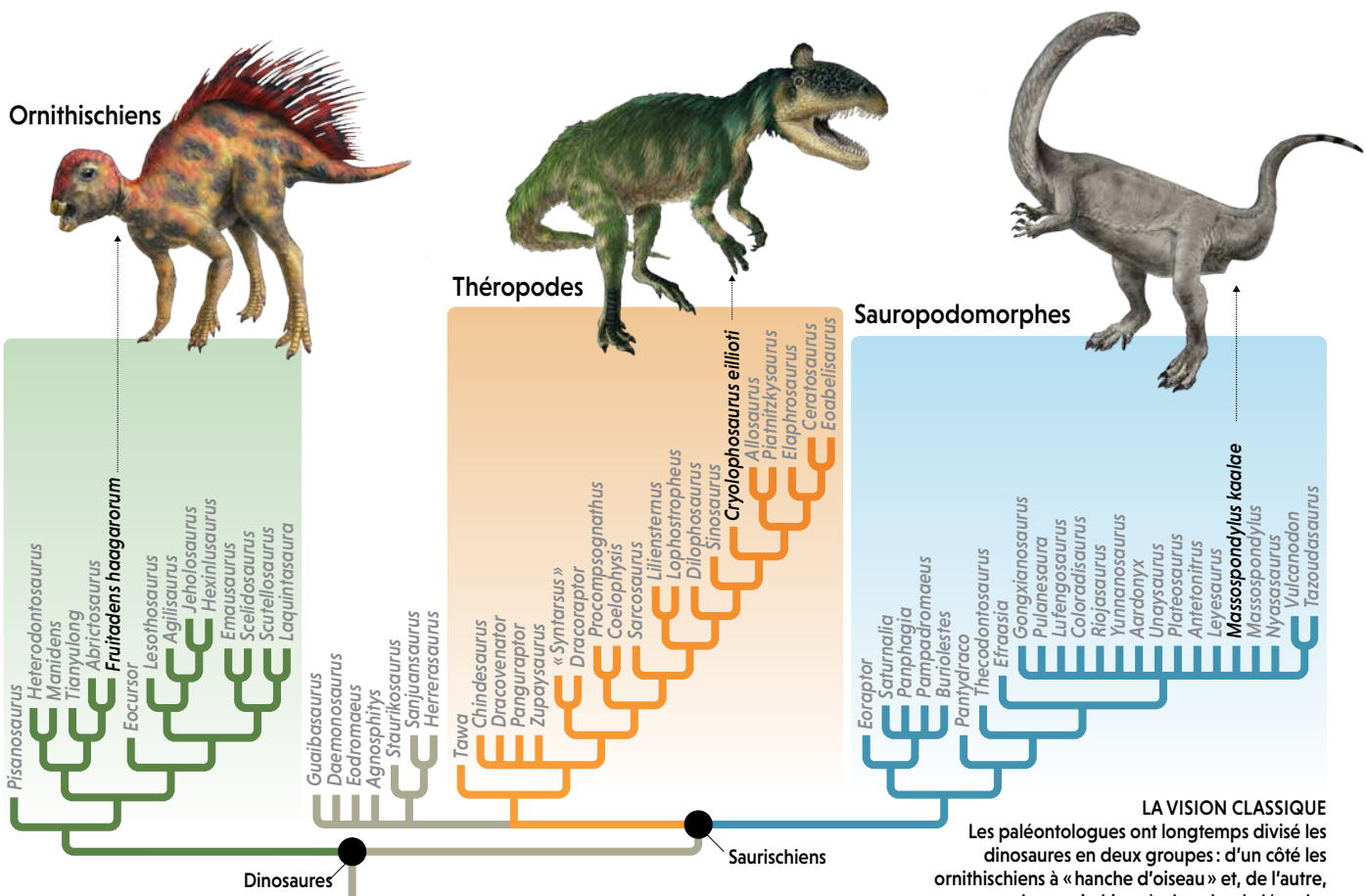
Pourtant, elle pourrait bel et bien se révéler fautive. Dans une étude publiée en 2017 qui a fait beaucoup de bruit, Matthew Baron, doctorant de l’université de Cambridge, et ses collègues ont présenté une nouvelle généalogie des dinosaures fondée sur l’analyse d’un vaste ensemble de données portant sur des dinosaures primitifs et leurs caractéristiques anatomiques. Leur arbre généalogique rassemble les théropodes et les ornithischiens dans un nouveau groupe, les ornithoscélidés, tandis que les sauropodomorphes se retrouvent perchés sur une branche distincte. Au lieu d’opposer les saurischiens et les ornithischiens, la nouvelle dichotomie met en scène les ornithoscélidés *versus* les sauropodomorphes.

Ou peut-être pas. Peu de temps après la publication de cette étude, Max Langer, un paléontologue brésilien, m’a approché. Au cours de la dernière décennie, Max Langer a décrit une série de nouveaux dinosauiromorphes et dinosaures du Trias, dont *Ixalerpeton* (un précurseur des dinosaures qui devait ressembler au *Protodactylus* dont les empreintes ont été retrouvées en Pologne) et *Saturnalia* (un protosauropodomorphe de la taille d’un chien). Il était sceptique à l’égard de la nouvelle généalogie et recrutait une équipe d’experts sur les premiers dinosaures pour examiner les données de Matthew Baron. Parce que j’avais étudié les traces polonaises et d’autres fossiles clés du Trias, Max Langer m’a demandé de rejoindre le groupe. Pendant un mois, nous avons procédé à un examen méticuleux de l’ensemble des données et noté nos différents désaccords sur la façon dont l’autre équipe avait elle-même procédé. Puis nous avons repris l’analyse des traits avec nos propres corrections. L’arbre généalogique qui en a résulté est revenu au modèle saurischiens *versus* ornithischiens, bien que des tests statistiques aient montré que cet arrangement n’avait pas de valeur extrêmement significative par rapport à l’arbre de Matthew Baron. Nous avons publié nos résultats à l’automne 2017.

Ce que cette ambivalence dans les résultats révèle, c’est que les paléontologues n’ont pas une bonne compréhension de la forme globale de l’arbre généalogique des dinosaures. Il semble que la ruée vers les nouvelles découvertes en Argentine, au Brésil, en Pologne et ailleurs au cours des quinze dernières années a brouillé la donne. Nous comprenons maintenant que les premiers membres des trois principales lignées de dinosaures étaient remarquablement similaires en taille et en anatomie, ce qui transforme en casse-tête la recherche de leurs liens de parenté. Ce problème est mûr pour que la prochaine génération de paléontologues le résolve, probablement de la façon dont ces désaccords sont généralement réglés : avec de nouveaux fossiles.

S. B.

M. C. Langer *et al.*, Untangling the dinosaur family tree, *Nature*, vol. 551, publié en ligne le 2 novembre 2017.



> supercontinent? Les premiers dinosaures, que l'on imagine facilement comme des animaux coriaces et résistants, ont-ils colonisé ces régions aux conditions difficiles? En 2009, quelques mois après notre première escapade en Pologne, Richard Butler et moi avons fait équipe avec Octávio Mateus, du musée de Lourinhã, au Portugal, pour tester cette hypothèse en explorant un vestige de la ceinture aride subtropicale du nord de la Pangée, dans ce qui est aujourd'hui le sud du Portugal. Nous espérions mettre la main sur des dinosaures, mais, à la place, nous avons découvert un charnier de centaines d'amphibiens de la taille d'une petite voiture, que nous avons décrits comme une nouvelle espèce, *Metoposaurus algarvensis*. Ces animaux qui peuplaient les lacs et rivières du Trias avaient été victimes de la météo capricieuse de l'époque, qui avait probablement asséché leurs lacs. Nous sommes revenus plus tard creuser le lit d'os et y avons aussi trouvé des fossiles de divers poissons, de reptiles de la taille d'un caniche et d'archosaures de la lignée menant aux crocodiles. Mais à ce jour, nous n'avons trouvé aucun os de dinosaure, pas même un fragment.

Et nous n'en découvrirons probablement jamais. L'Espagne, le Maroc et la côte est de l'Amérique du Nord possèdent d'éblouissants sites fossilifères vieux de 230 à 220 millions d'années. Le bilan des fouilles y est le même qu'au Portugal, avec une abondance d'amphibiens et de reptiles, mais aucun dinosaure. Tous ces sites se situaient dans le secteur aride de la Pangée. Qu'en conclure? Qu'au début de leur évolution, les dinosaures se sont diversifiés lentement dans les régions tempérées humides, mais qu'ils étaient apparemment incapables de coloniser les déserts. C'est une histoire inattendue: les dinosaures n'ont pas été ces créatures extraordinaires qui se seraient comportées en conquérants et auraient occupé toute la Pangée dès leur apparition. La réalité est moins épique: les premiers dinosaures ne supportaient pas la chaleur et vivaient dans une zone géographiquement restreinte – ils étaient de simples habitants d'un monde fragile qui tentait de se remettre de la grande extinction de la fin du Permien.

UN MYSTÉRIEUX COUP DE POUCE

Mais alors que les dinosaures semblaient devoir rester à jamais prisonniers de cette ornière évolutive, ils ont bénéficié d'un coup de pouce du destin. Tout d'abord, dans la zone humide, les grands herbivores dominants de l'époque – des reptiles nommés rhynchosaures et des cousins des mammifères nommés dicynodontes – ont décliné, disparaissant de régions entières pour des raisons encore inconnues. Leur chute, il y a entre 225 et 215 millions

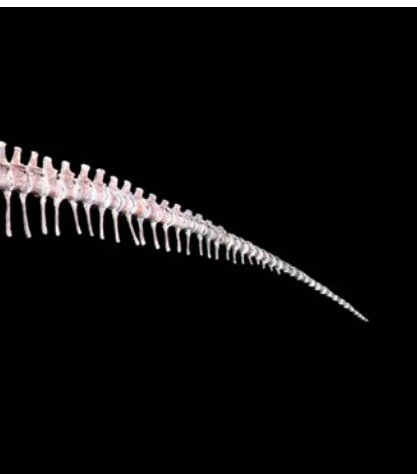


UNE COMPÉTITION RUDE

Durant une grande partie du Trias, les dinosaures formaient un groupe marginal, éclipsé par des espèces apparentées à des crocodiles, tel *Saurosuchus* (1), et par des amphibiens géants, tel *Metoposaurus* (2)

d'années, a laissé vacantes de nouvelles niches écologiques qu'ont occupées les sauropodomorphes primitifs herbivores tels que *Saturnalia*, une espèce de la taille d'un chien, au cou légèrement allongé. Ces ancêtres des sauropodes sont devenus les principaux herbivores des zones humides des hémisphères Nord et Sud. Ensuite, il y a environ 215 millions d'années, les dinosaures ont finalement pénétré dans les déserts de l'hémisphère Nord, probablement en raison de modifications des moussons et de la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique qui ont atténué les différences entre régions humides et arides et facilité la migration des dinosaures des unes aux autres.

La route restait longue, toutefois, avant que les dinosaures ne règnent sur la planète. Les meilleurs enregistrements fossiles des



premiers dinosaures du désert proviennent d'une région redevenue aride aujourd'hui: les Badlands colorées du sud-ouest des États-Unis. Depuis plus d'une décennie, une équipe de jeunes chercheurs fouille méthodiquement le site nommé Hayden Quarry (la «carrière de Hayden»), situé au Nouveau-Mexique, dans une région qui a inspiré la peintre américaine Georgia O'Keeffe. L'équipe (composée de Randall Irmis, de l'université de l'Utah, Sterling Nesbitt, de l'université VirginiaTech, Nathan Smith, du Muséum d'histoire naturelle du comté de Los Angeles, Alan Turner, de l'université Stony-Brook, dans l'État de New York, et Jessica Whiteside, de l'université de Southampton, en Angleterre) y a découvert une mine de squelettes: des amphibiens monstrueux étroitement apparentés au *Metoposaurus* portugais, des ancêtres primitifs de crocodiles et une foule bigarrée de reptiles nageurs et arboricoles. Des restes de dinosaures sont aussi présents à Hayden Quarry, même s'ils sont peu nombreux: on y trouve seulement une poignée d'espèces de théropodes prédateurs, chacune représentée par quelques fossiles. Aucun herbivore en revanche: ni d'espèce ancestrale à long cou si commune dans les zones humides ni d'ancêtre ornithischien du *Triceratops*.

Les chercheurs invoquent cette fois encore le climat pour expliquer la rareté des dinosaures: ces déserts étaient des environnements instables où températures et précipitations

Finalement, peu importe le moment auquel on s'intéresse dans le Trias, des premiers pas des dinosaures, il y a environ 230 millions d'années, jusqu'à la fin de la période, il y a 201 millions d'années, l'histoire est la même. Les dinosaures vivaient dans des environnements très spécifiques – forêts humides ou déserts arides – et, où qu'ils soient, ils étaient entourés de toutes sortes d'animaux plus gros, plus communs, mais aussi plus diversifiés. À Ischigualasto, par exemple, les premiers dinosaures ne représentaient qu'environ 10 à 20% de l'écosystème total. La situation était similaire au Brésil et, des millions d'années plus tard, à Hayden Quarry. Dans tous les cas, les dinosaures étaient largement inférieurs en nombre aux ancêtres des mammifères, aux amphibiens géants et aux reptiles excentriques.

UN COMPÉTITEUR FÉROCE

Mais avant tout, les dinosaures du Trias ont été surpassés par les pseudosuchiens, leurs cousins proches situés du côté crocodile de la famille des archosaures. À Ischigualasto, un archosaurien de la lignée des crocodiles nommé *Saurosuchus* régnait sur la chaîne alimentaire, avec ses dents acérées et ses mâchoires puissantes. Hayden Quarry abritait de nombreuses espèces pseudosuchiennes: des versions semi-aquatiques avec de longs museaux, des herbivores au corps couvert de plaques et même des animaux dépourvus de dents qui couraient sur leurs pattes de derrière et ressemblaient étrangement à certains théropodes qu'ils côtoyaient.

Lorsque j'étais étudiant, à la fin des années 2000, beaucoup de ces fossiles venaient d'être mis au jour et cette répartition m'a interpellé. Il faut dire que j'avais commencé à lire des ouvrages classiques de paléontologie, tels ceux de Robert Bakker et Alan Charig. Ces livres soutenaient avec emphase que les dinosaures, ces créatures rapides, endurantes et intelligentes, étaient si bien adaptés à leur environnement qu'ils avaient rapidement pris le dessus sur leurs cousins crocodiles et leurs autres compétiteurs du Trias. Cette idée ne concordait manifestement pas avec les archives fossiles. Existait-il un moyen de la tester?

Après m'être plongé dans des ouvrages de statistiques, j'ai pris conscience que, deux décennies plus tôt, les paléontologues qui étudiaient les invertébrés avaient mis au point une méthode de mesure de la diversité anatomique à l'intérieur d'un groupe d'espèces. Or, jusque-là, les spécialistes des dinosaures avaient ignoré cette méthode. Si je parvenais à suivre la disparité morphologique des dinosaures et des pseudosuchiens au cours du Trias, je verrais s'ils étaient devenus de plus en plus variés avec le temps et à quel rythme – ce qui indiquerait s'ils avaient conquis le ➤

Les dinosaures étaient entourés de toutes sortes d'animaux plus gros et plus diversifiés

fluctuaient, oscillant entre des périodes d'intenses feux de brousse et d'autres humides. Les plantes avaient sans doute des difficultés à s'établir de façon stable, de sorte que les dinosaures herbivores ne disposaient pas de ressources alimentaires régulières. Ainsi, quelque 20 millions d'années après leur apparition, même après être devenus les principaux herbivores des écosystèmes humides et même après avoir commencé à coloniser les déserts tropicaux, les dinosaures n'étaient toujours pas les maîtres incontestés des continents.

> monde graduellement ou brusquement – et si un groupe avait devancé les autres.

Avec mes superviseurs de l'époque, à l'université de Bristol, en Angleterre – Michael Benton, Marcello Ruta et Graeme Lloyd – j'ai compilé un vaste ensemble de données sur les dinosaures et les pseudosuchiens du Trias, portant sur plus de quatre cents caractéristiques de leur anatomie. Lorsque nous avons analysé ces données d'un point de vue statistique, nous avons obtenu un résultat étonnant, que nous avons publié en 2008. Tout au long du Trias, l'anatomie des pseudosuchiens était plus variée que celle des dinosaures, ce qui indique qu'ils expérimentaient davantage de régimes alimentaires et de comportements, bref de modes de vie. Les deux groupes se sont diversifiés au fil du Trias, mais les pseudosuchiens devançaient toujours les dinosaures. Contrairement à l'image classique les dépeignant comme de supersoldats massacrant leurs rivaux, les dinosaures avaient joué les seconds rôles au profit des pseudosuchiens pendant la plus grande partie de leur longue coexistence.

UN CHAOS SALUTAIRE

Notre analyse statistique nous a conduits à une conclusion iconoclaste : les premiers dinosaures n'avaient rien de spécial, du moins par rapport à la variété des autres animaux qui évoluaient au cours du Trias. Si vous aviez foulé à l'époque le sol de la Pangée, vous auriez probablement considéré les dinosaures comme un groupe assez marginal. Et si vous avez l'esprit joueur, à la question : « Quelles créatures deviendront énormes et conquerront la planète ? », vous auriez probablement misé sur d'autres animaux, et sans aucun doute sur les pseudosuchiens. Mais, bien sûr, nous savons que ce sont les dinosaures qui ont pris l'ascendant et qui survivent aujourd'hui encore à travers plus de 10 000 espèces d'oiseaux. En revanche, seulement une vingtaine d'espèces de crocodiliens modernes ont survécu jusqu'à nos jours.

Comment les dinosaures ont-ils fini par voler la couronne à leurs cousins de la lignée crocodile ? Le plus grand facteur semble avoir été un autre coup de chance indépendant de l'évolution des dinosaures elle-même. Vers la fin du Trias, des forces tectoniques ont étiré la Pangée d'est en ouest et provoqué la fissuration du supercontinent. La longue fracture – que, plus tard, l'océan Atlantique a comblée – a permis à du magma de remonter vers la surface. Pendant plus de 500 000 ans, des épanchements de lave ont envahi une grande partie de la Pangée centrale, d'une façon étrangement semblable aux énormes éruptions volcaniques qui avaient marqué la fin du Permien 50 millions d'années auparavant. Comme ces éruptions antérieures, celles du Trias ont provoqué

une extinction de masse. Les lignées des archosaures ont presque toutes été décimées et seules quelques espèces – les ancêtres des crocodiles et des alligators d'aujourd'hui – ont traversé cet âge sombre.

De leur côté, les dinosaures semblent avoir à peine remarqué ce déluge de feu et de soufre. Tous les principaux sous-groupes – théropodes, sauropodomorphes et ornithischiens – étaient présents dans la période géologique suivante, le Jurassique. Durant la phase de volcanisme, tan-



Les dinosaures avaient joué les seconds rôles au profit des ancêtres des crocodiles



dis que le monde vivait un enfer, les dinosaures prospéraient, profitant en quelque sorte du chaos qui les entourait. J'aimerais pouvoir expliquer comment cela a été possible – les dinosaures possédaient-ils un avantage unique face aux pseudosuchiens ou se sont-ils simplement retrouvés indemnes après le crash de l'avion, sauvés par la chance quand tant d'autres espèces avaient péri ? La prochaine génération de paléontologues aura à résoudre cette énigme.

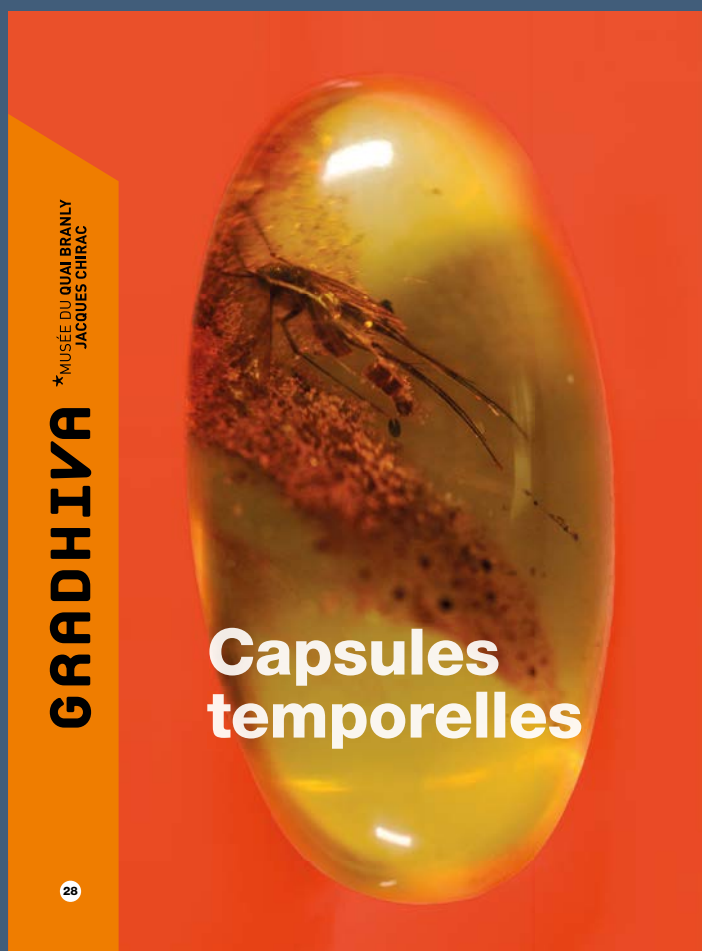
Quelle que soit la raison qui a permis aux dinosaures de survivre au désastre, les conséquences de cet épisode mystérieux de leur histoire sont, elles, parfaitement établies. Une fois libérés de la pression de leurs rivaux pseudosuchiens, les dinosaures ont prospéré au Jurassique. Ils se sont diversifiés et sont devenus plus abondants et plus massifs que jamais. Des espèces radicalement nouvelles sont apparues qui ont migré et joué un rôle prédominant dans les écosystèmes du monde entier. Parmi ces nouveaux venus figuraient les premiers dinosaures avec des plaques sur le dos et une armure couvrant le corps ; les premiers sauropodes colossaux qui faisaient trembler la terre quand ils marchaient ; les ancêtres du *T. rex* et un assortiment d'autres théropodes qui avaient déjà entamé leur évolution vers une taille plus petite, des bras raccourcis et un corps couvert de plumes – les aïeux des oiseaux. Les dinosaures dominaient enfin la Terre. Il avait fallu plus de 30 millions d'années, mais leur règne commençait. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. L. Brusatte, *The Rise and Fall of the Dinosaurs*, William Morrow, 2018.

S. L. Brusatte, G. Niedźwiedzki et R. J. Butler, *Footprints pull origin and diversification of dinosaur stem lineage deep into early Triassic*, *Proc. R. Soc. B*, vol. 278, pp. 1107-1113, 2011.

S. L. Brusatte et al., *The origin and early radiation of dinosaurs*, *Earth-Science Reviews*, vol. 101, pp. 68-100, 2010.



CAPSULES TEMPORELLES

Une capsule temporelle est une œuvre de sauvegarde collective de biens et d'informations, comme témoignage destiné aux générations futures. Elle peut être intentionnellement créée et enterrée, souvent lors d'une cérémonie programmant la date de son ouverture, ou résulter d'une catastrophe, comme le site archéologique de Pompéi. Si les capsules temporelles remontent aux premières formes de civilisation écrite, comme en Mésopotamie, elles sont aussi au cœur des pratiques des artistes contemporains qui souhaitent constituer une archive de leur vie quotidienne, comme le faisait Andy Warhol.

La description des capsules temporelles soulève des questions symboliques sur ce qu'une société ou un individu souhaite transmettre aux générations futures. Mais elle pose aussi des problèmes d'infrastructure matérielle. Comment stocker les objets dans une capsule temporelle de façon à constituer une totalité signifiante ? Comment conserver ces données de façon à ce qu'elles se préservent dans des conditions climatiques encore inimaginables ? Comment communiquer avec les générations futures pour leur indiquer la signification de ces témoignages ?

Les capsules temporelles croisent tout un ensemble de questions qui se posent dans des lieux très différents où des matériaux et des informations sont stockés et conservés pour être transmis aux générations futures. Ce numéro abordera ainsi ces questions dans les pratiques d'art contemporain, dans les fouilles archéologiques, dans les musées ou dans les centrales nucléaires. Sur des terrains et des objets précis, on interrogera comment un patrimoine se constitue non plus seulement par la conservation du passé mais par la projection dans un avenir.

*« Comment communiquer
avec les générations
futures pour leur
indiquer la signification
de ces témoignages ? »*