

L'étude de l'impact des mutations sur l'assemblage des jonctions communicantes et sur leur fonctionnement pourrait aussi conduire à des thérapies hautement ciblées, qui contrediraient les conséquences d'une mutation sans provoquer de graves effets indésirables. Par exemple, le fait qu'une mutation donnée perturbe l'assemblage d'une jonction communicante, mais pas le transport des connexines vers la surface cellulaire, ouvre une piste pour concevoir un médicament qui rendrait la connexine à nouveau capable de former un canal fonctionnel. De telles thérapies ciblées fourniraient un moyen de rétablir la communication entre cellules sans avoir à remplacer la connexine mutante par une protéine fonctionnelle – une opération nécessitant une thérapie génique, une approche encore risquée et expérimentale.

Mais la découverte de mutations des connexines à l'origine de maladies apporte bien plus que des cibles thérapeutiques

prometteuses. Elle fournit un nouvel ensemble d'outils pour l'étude de la biologie des jonctions communicantes. Par exemple, notre compréhension des molécules qui les traversent reste très limitée. Dans le cas des cellules cardiaques, nous savons que les ions qui circulent *via* ces jonctions transmettent un signal électrique d'une cellule à une autre. Mais nous n'avons aucune idée de la nature du message véhiculé entre les cellules de l'appareil auditif ou entre celles qui interviennent dans la cicatrisation d'une lésion cutanée. En poursuivant l'étude des hémicanaux et de leurs liens avec des maladies, nous serons un jour en mesure d'aborder les questions fondamentales ultimes concernant cette forme de communication : que se chuchotent les cellules et comment ces messages moléculaires gouvernent-ils l'assemblage et le fonctionnement d'organismes aussi complexes que l'humain ? ■

■ BIBLIOGRAPHIE

T. Aasen *et al.*, Gap junctions and cancer : Communicating for 50 Years, *Nature Reviews Cancer*, vol. 16(12), pp. 775-788, 2016.

J. L. Solan et P. D. Lampe, Specific Cx43 phosphorylation events regulate gap junction turnover *in vivo*, *FEBS Letters*, vol. 588, pp. 1423-1429, 2014.

R. G. Johnson *et al.*, Gap junction assembly : Roles for the formation plaque and regulation by the C-terminus of connexin43, *Molecular Biology of the Cell*, vol. 23(1), pp. 71-86, 2012.

K. Jordan *et al.*, Trafficking, assembly and function of a connexin43-green fluorescent protein chimera in live mammalian cells, *Molecular Biology of the Cell*, vol. 10(6), pp. 2033-2050, 1999.



LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Partagez les savoirs

Entrée gratuite

FILMS Dès 10 ans

Samedi 6 mai - 15h : Le jardin en mouvement par O. Comte (52', 2013)
16h30 : People's park par J.-P. Sniadecki (7', 2012)

CONFÉRENCES Redouté au Jardin

Lundi 15 mai - 18h : Regards croisés en lien avec l'exposition :
Le pouvoir des fleurs, au Musée de la vie romantique
C. de Bourgoing, commissaire scientifique de l'exposition, **A. Lemaire**, chef du service des collections, Bibliothèque centrale du Muséum

UNE EXPO, DES DÉBATS

Lundi 22 mai - 18h : La biodiversité dans nos jardins en lien avec la journée mondiale de la biodiversité
M. Flandrin, jardinier, Jardin des Plantes, Muséum, **B. Fontaine**, observatoire de papillons, Vigie nature, centre d'écologie et des sciences de la conservation, Muséum, **P. Gourdain**, coordinateur des inventaires des jardins, service du patrimoine naturel, Muséum

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution - 36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

BAR DES SCIENCES DES EXTRÊMES

Dimanche 21 mai - 17h30 :
Quelles adaptations possibles du vivant en milieux extrêmes ?
 Animé par **M.-O. Monchicourt**, journaliste scientifique à France Inter, créatrice des Lab'Origins dans le cadre de la fête de la nature,
J.-P. Concordet, biologiste moléculaire, Inserm-Muséum,
A. Couté, spécialiste de micro-organismes, Muséum,
Ch. Lasseur, responsable du programme Melissa, entraîneur de spationautes, Agence européenne spatiale

Café-restaurant la Baleine - 47 rue Cuvier, Paris 5^e

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE





© Jon Foster

Comment **les ailes** sont venues aux dinosaures

Stephen Brusatte

Les fossiles de dinosaures à plumes du Liaoning, en Chine, révèlent que la transformation de certains dinosaures en oiseaux a été longue. Et que les premières plumes n'avaient rien à voir avec la capacité de voler.



Pékin, six heures du matin. Par une froide journée de novembre, je me fraye un chemin dans la gare vers un train bondé. Je me rends à Jinzhou, ville de trois millions d'habitants située aux confins du nord-est de la Chine. Plus tard, tandis que le train serpente parmi les usines en béton et les champs de maïs embrumés, je tente de récupérer un peu de sommeil, mais je suis trop excité pour y parvenir. Je fais ce long voyage pour voir un extraordinaire fossile découvert par hasard par un paysan. D'après les bruits qui courent, il est incroyablement.

Quatre heures passent et me voilà à nouveau en train de marcher dans une gare : celle de Jinzhou. Je suis à la traîne de Junchang Lü, un célèbre chasseur de dinosaures de l'Académie chinoise des sciences géologiques, qui a sollicité mon aide. Un petit groupe de dignitaires nous accueille avant de nous amener au muséum de la cité, installé dans un bâtiment délabré. Avec un sérieux digne d'une réunion politique au sommet, notre groupe emprunte un long couloir et pénètre dans une pièce où une plaque rocheuse repose sur une petite table. Je me retrouve face à l'un des plus beaux fossiles que j'ai jamais vus : un squelette à peu près grand comme un âne, et d'une couleur chocolat qui contraste avec le calcaire gris dans lequel il est enchâssé (voir la photographie page ci-contre).

L'animal, manifestement un dinosaure, a des dents ressemblant à des couteaux à viande, des griffes acérées et une longue queue. Aucun doute : il s'agit d'un proche cousin de *Velociraptor*, ce dangereux prédateur popularisé par le film *Jurassic Park*. Cependant, le spécimen chinois diffère notablement de ce dinosaure relativement ordinaire qu'est *Velociraptor*. Ses os sont légers et creux ; ses pattes sont longues et étroites comme celles d'un héron. Son corps devait être recouvert de divers types de plumes, notamment sur les bras, où des pennas de grande taille s'empilaient et formaient des ailes. Ce dinosaure ressemblait étonnamment à un oiseau !

Un an plus tard, Junchang Lü et moi avons nommé cette nouvelle espèce *Zhenyuanlong*. Il s'agit du dernier des nombreux dinosaures à plumes découverts au cours des vingt dernières années dans la province chinoise du Liaoning. Or le remarquable registre fossile constitué par toutes ces découvertes illustre la façon

L'ESSENTIEL

■ Depuis la découverte de dinosaures à plumes, il est établi que les oiseaux sont issus des dinosaures théropodes.

■ Les nombreux fossiles de tels dinosaures révèlent comment de lourds monstres terrestres se sont mués en petits animaux volants.

■ Ils indiquent aussi que les plumes ont d'abord servi à préserver la chaleur du corps et à l'apparat, et que la capacité de voler n'est venue qu'après.

dont certains dinosaures ont évolué et donné naissance aux oiseaux.

Les implications de ces fossiles sont capitales, car, depuis Darwin, les paléontologues s'interrogent sur la façon dont l'évolution fait apparaître des classes entières de nouveaux animaux. Le phénomène se produit-il rapidement, à la faveur de quelque bizarre innovation de rupture ? Ou peu à peu sur plusieurs millions d'années, à mesure que les formes de vie s'adaptent à de nouvelles conditions environnementales ? *Zhenyuanlong* et les fossiles du Liaoning nous éclairent sur ces questions dans le cas des oiseaux.

Élucider l'origine des oiseaux

De très nombreux traits séparent aujourd'hui les oiseaux des autres animaux. Outre ceux liés au vol, ces organismes ont un métabolisme élevé, qui leur permet une croissance spectaculairement rapide ; leurs cerveaux relativement gros les dotent d'une bonne intelligence et de sens développés. En réalité, les oiseaux sont tellement particuliers que les paléontologues se sont longtemps interrogés sur leur origine.

C'est le biologiste anglais Thomas Henry Huxley qui, dans les années 1860, a proposé une réponse à la question. C'était un ami de Darwin et l'un de ses plus fervents soutiens. Quelques années seulement après la publication de l'œuvre majeure de Darwin (*De l'origine des espèces*) en 1859, des carriers bavarois ont découvert qu'une plaque de calcaire qu'ils venaient de fendre contenait un curieux squelette. Doté de griffes acérées et d'une longue queue reptilienne, l'animal avait aussi des bras emplumés. Des ailes ? Huxley remarqua que la forme en question – que l'on nomma *Archaeopteryx*, soit l'« oiseau archaïque » – ressemblait beaucoup à de petits dinosaures carnivores tels que *Compsognathus*, qui commençaient aussi à être mis au jour. Il avança donc l'idée, radicale en son temps, que les oiseaux descendaient des dinosaures. Les autres biologistes n'étaient pas d'accord. Le débat a duré plus d'une centaine d'années.

La question fut finalement tranchée par la découverte de nouveaux fossiles. Au milieu des années 1960, dans l'ouest de l'Amérique du Nord, le paléontologue John Ostrom mit au jour *Deinonychus*, un

■ L'AUTEUR



Stephen BRUSATTE est paléontologue à l'université d'Édimbourg, en Écosse. Il étudie l'évolution sur de longues échelles de temps de grands groupes d'animaux tels que les dinosaures et les oiseaux.

ZHENYUANLONG est un dinosaure à plumes découvert à Jinzhou, en Chine. C'est l'un des nombreux fossiles découverts récemment qui montrent que les dinosaures théropodes ont longuement évolué avant que la capacité de voler soit apparue.



Tiré de J. Liu et S. L. Brusatte, Scientific Reports, vol. 5, article 11775, 16 juillet 2015

dinosaure de forme étonnamment proche de celle d'un oiseau. Ses longs bras ressemblent beaucoup à des ailes ; sa structure, qui suggère l'agilité, est révélatrice d'un animal actif et énergique. Ostrom avança que *Deinonychus* avait peut-être des plumes. Après tout, si les oiseaux sont issus des dinosaures – ce qu'entre-temps de nombreux paléontologues commençaient à accepter –, les plumes devaient être apparues quelque part sur cette trajectoire évolutive. Mais Ostrom ne pouvait en être sûr, car il ne disposait que des os de l'animal. Les chairs et les parties molles, telles les plumes, ne résistent en effet que très rarement à la fossilisation.

Un dinosaure à duvet

Ostrom prit son mal en patience. Il continua à chercher le Graal paléontologique qui prouverait sans le moindre doute le lien entre les dinosaures et les oiseaux : un squelette de dinosaure ayant conservé des traces de plumage. En 1996, alors que sa carrière tirait à sa fin et qu'il participait au congrès annuel de la Société de paléontologie des vertébrés à New York, Philip Currie l'aborda. Ce paléontologue, aujourd'hui à l'université de l'Alberta, s'intéressait aussi aux dinosaures aviformes. Il revenait de Chine, où il avait eu vent d'un fossile extraordinaire, dont il rapportait une photographie. Ostrom y découvrit un petit dinosaure entouré d'un halo duveteux,

admirablement bien conservé par l'épaisse couche de cendres volcaniques qui l'avait enseveli aussi brusquement que le Vésuve avait fait disparaître Pompéi. Ostrom en pleura d'émotion : quelqu'un avait enfin trouvé son dinosaure à plumes !

Nommé ensuite *Sinosauropteryx*, le fossile montré par Philip Currie à Ostrom inaugurait une spectaculaire série de découvertes. Tels des prospecteurs avides d'or, les paléontologues se ruèrent en masse dans le Liaoning et constatèrent que seuls les paysans locaux savaient où chercher. Deux décennies après la découverte de *Sinosauropteryx*, plus de 20 espèces de dinosaures à plumes ont aujourd'hui été mises au jour dans cette région de Chine. Ils vont de cousins primitifs du *Tyrannosaurus rex*, longs de neuf mètres et couverts d'une sorte de pelage en duvet, à des herbivores de la taille d'un chien, hérissés de pointes comme un porc-épic, en passant par des planeurs de la taille d'un corbeau dotés de vraies ailes. Ces fossiles de dinosaures à plumes sont extrêmement célèbres.

Les dinosaures à plumes du Liaoning le confirment : les oiseaux sont issus des dinosaures. Cette phrase est peut-être un peu trompeuse, car elle laisse penser que les dinosaures et les oiseaux sont deux groupes totalement distincts. En réalité, les oiseaux *sont* des dinosaures ; ils constituent l'un des nombreux groupes d'animaux qui descendent de l'ancêtre commun des dinosaures. En d'autres termes, ce sont des

dinosauriens, au même titre que les bien connus *Triceratops* et *Brontosaurus*. Cela peut paraître étonnant, mais on peut se dire que les oiseaux sont des dinosaures aberrants, car capables de voler, exactement de la même façon que les chauves-souris sont des mammifères aberrants parce qu'elles volent.

Les fossiles du Liaoning éclairent la généalogie des oiseaux en indiquant à quel niveau leurs lignées apparaissent sur l'arbre phylogénétique des dinosaures. Les oiseaux constituent en effet un clade de dinosaures (un clade est un groupe de taxons (d'espèces) partageant un ancêtre commun), qui fait partie du clade des théropodes. Le nom de ces dinosaures carnivores réunit deux racines grecques traduisant l'idée d'« animaux à pieds de bêtes sauvages ». *T. rex*, *Allosaurus* ou encore *Spinosaurus* sont des théropodes, mais du genre massif. Cependant, les théropodes proches des oiseaux constituent un clade d'animaux de petite taille particulièrement agiles et intelligents, nommé Maniraptora. Popularisés sous le terme de raptors dans le film *Jurassic Park*, ce clade comprend notamment *Velociraptor*, *Deinonychus* (révélé par Ostrom) et *Zhenyuanlong*. C'est donc quelque part au sein de cette foule de théropodes à plumes que se trouve la ligne de démarcation entre « oiseaux » et « non-oiseaux ».

Nous disposons aujourd'hui de tellement de dinosaures à plumes du Liaoning et d'ailleurs que leur ensemble fournit le

UNE TRANSFORMATION GRADUELLE

Les biologistes s'interrogent depuis longtemps sur la façon dont l'évolution produit des groupes d'organismes entièrement nouveaux. Le registre fossile montre que dans le cas des oiseaux et de leurs ancêtres dinosaures, ce processus s'est déroulé lentement. Les traits caractérisant les oiseaux ne se sont accumulés que très progressivement et, dans la plupart des cas, dans le cadre d'adaptations sans rapport avec les fonctions que ces traits remplissent aujourd'hui.

Une anatomie distinctive

Les oiseaux présentent une multitude de traits qui les distinguent des autres animaux actuels. Beaucoup d'entre eux jouent un rôle dans le vol.

Les plumes procurent à l'animal de la portance et de la poussée.

Les longs membres supérieurs permettent aux plumes de couvrir une grande surface.

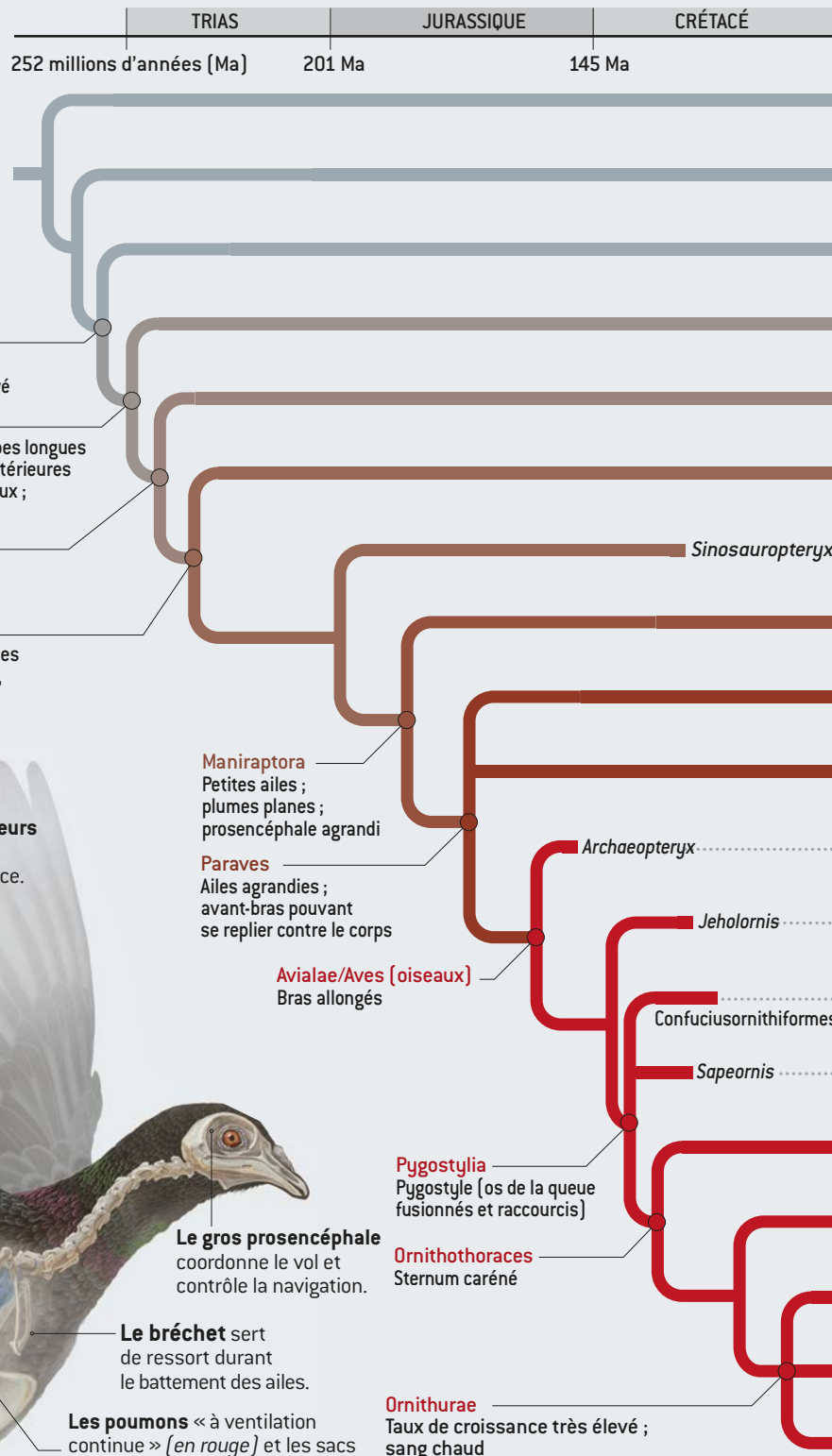
Les os de la queue fusionnés et raccourcis ancrent les plumes de la queue.

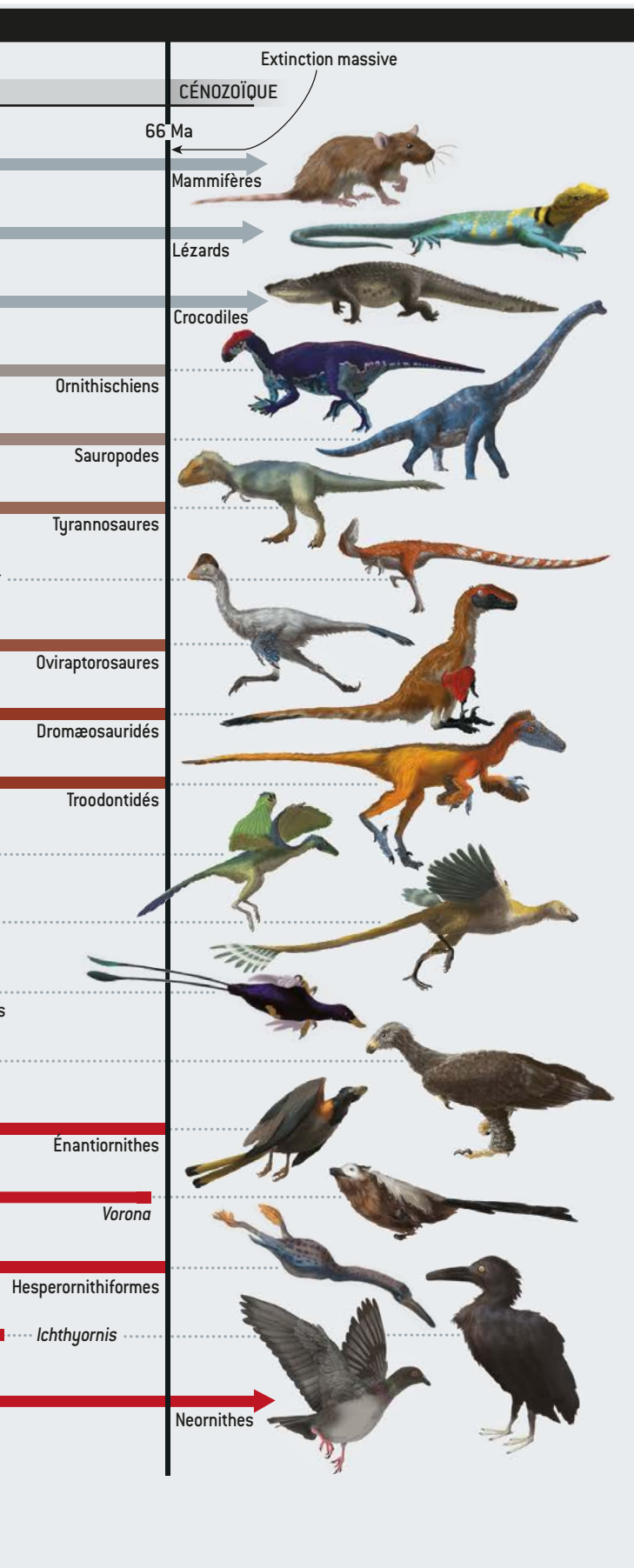
Le gros prosencéphale coordonne le vol et contrôle la navigation.

Le bréchet sert de ressort durant le battement des ailes.

Les poumons « à ventilation continue » (en rouge) et les sacs aériens (en bleu) recueillent plus d'oxygène et allègent le squelette.

Le sternum caréné ancre d'énormes muscles pectoraux.





meilleur des aperçus sur l'une des plus remarquables transitions évolutives de l'histoire de la vie. Pour étudier ces fossiles, les chercheurs commencent par en réaliser des images tridimensionnelles par tomographie à rayons X (ou scanner 3D). Ils se livrent ensuite à de savantes analyses informatiques afin de les placer dans des arbres de parenté. Des programmes de simulation permettent aussi de reconstituer leur biomécanique. Et des techniques statistiques élaborées aident à retracer l'apparition au cours de l'évolution de nouveaux traits ou de nouvelles espèces. C'est ainsi que nous sommes parvenus à établir par quelle trajectoire évolutive certains dinosaures se sont transformés en oiseaux.

Ces productions cornées de la peau que sont les plumes

Au centre de l'énigme de l'apparition des oiseaux figure la question de l'origine de ces productions cornées de la peau que sont les plumes. Celles-ci sont aux oiseaux ce que les cheveux gominés et les rouflaquettes étaient à Elvis Presley : un signe distinctif incontournable ! Au premier coup d'œil sur les longues rémiges d'un aigle ou sur la queue bariolée d'un paon, nous savons qu'il s'agit d'un oiseau. En effet, les oiseaux sont les seuls animaux dotés de plumes. Des attributs loin d'être anodins : ce sont des outils polyvalents qui rendent le vol possible, aident à séduire une femelle ou à intimider un rival, retiennent la chaleur corporelle, isolent et protègent les œufs pendant la couvaison... Les plumes ont tellement d'usages qu'il a été difficile de comprendre quelle a été leur première fonction sélectionnée par l'évolution.

Grâce à *Sinosauropteryx* et aux autres fossiles du Liaoning, nous sommes en tout cas certains d'une chose : les plumes ne sont pas subitement apparues avec les premiers oiseaux, mais beaucoup plus tôt, chez leurs lointains ancêtres dinosauriens. Il est même possible que l'ancêtre commun de tous les dinosaures ait eu quelque sorte de plumes. Mais les toutes premières plumes différaient beaucoup des plumes qui nous sont familières chez les oiseaux modernes. Le plumage de *Sinosauropteryx* et de nombreux autres dinosaures ressemblait plutôt à un duvet constitué de milliers de filaments comparables à des poils. Les dinosaures équipés d'un tel plumage ne pouvaient absolument pas voler : leurs plumes ne s'y prêtaient pas et ils n'avaient même pas d'ailes. Ces premières plumes ont été sélectionnées parce qu'elles apportaient probablement un autre avantage adaptatif : l'isolation thermique.

Chez la plupart des dinosaures, un revêtement de téguments duveteux suffisait. Au sein du clade des théropodes maniraptorien, un nouveau type de couverture corporelle s'est peu à peu développé : les filaments se sont d'abord allongés, puis se sont ramifiés – initialement en touffes, puis de façon de plus en plus ordonnée – de part et d'autre d'une tige centrale. Une fois les barbes complétées de barbules selon un réseau plan et régulier, la plume, c'est-à-dire la « plume d'oise » que nous avons tous en tête, était née. Alignées et disposées en couches sur les bras, ces plumes plus complexes ont fini par former des ailes. De la taille d'un corbeau, le dinosaure *Microraptor* du Liaoning décrit en 2003 par Xu Xing, de l'Institut de paléontologie des vertébrés et de paléoanthropologie de Pékin, avait aussi des « ailes » sur ses pattes et sa queue, un plan d'organisation inconnu chez tous les oiseaux modernes (voir l'illustration page 60).

Pourquoi du duvet s'est-il transformé en plumes structurées ? La première idée qui se présente à l'esprit est que le corps des

© Illustrations par Porta Sloan Rollings (animaux) et Jan Christensen (diagramme)

maniraptorien serait devenu apte à planer, et la portance associée à leurs membres aurait favorisé le développement des ailes.

Cependant, l'étude attentive du registre fossile suggère une autre trajectoire évolutive. Il semble que plusieurs petits animaux ailés, tel *Microraptor*, étaient capables de planer, comme le suggèrent les expériences en soufflerie et les simulations de Gareth Dyke de l'université de Debrecen en Hongrie. Mais d'autres, tels que *Zhenyuanlong*, avaient un corps lourd doté de petits bras, et étaient incapables de décoller. En outre, aucun de ces dinosaures ailés n'était équipé des énormes muscles pectoraux nécessaires au vol. Et peu d'entre eux avaient des plumes asymétriques dotées d'un bord d'attaque (celui où le flux d'air aborde la plume) et d'un bord de fuite (le flux d'air y quitte la plume), capables de résister aux intenses forces aérodynamiques engendrées par le vol.

Les recherches récentes suggèrent que les ailes ont d'abord été des attributs sexuels. Ainsi, Jakob Winter, de l'université de Bristol en Angleterre, a réussi à identifier au microscope les structures porteuses de pigments, les « mélanosomes », dans les plumes fossiles. On a ainsi montré que le plumage des dinosaures non aviens (ne volant pas) présentait tout un spectre de couleurs. Certaines des plumes étaient même iridescentes, c'est-à-dire qu'elles changeaient de couleur selon l'angle d'observation, comme c'est le cas chez de nombreux oiseaux actuels. De tels habits de parade devaient être précieux pour séduire une partenaire potentielle.

La splendeur manifeste de ces plumes de dinosaures a donc suggéré une nouvelle hypothèse quant à l'origine des ailes : elles auraient été initialement sélectionnées parce qu'elles constituaient un message coloré bien visible. Peu à peu, certains dinosaures à plumes se seraient ensuite retrouvés avec des surfaces suffisamment étendues pour créer de la portance aérodynamique.

Le vol serait apparu fortuitement

En d'autres termes, la capacité de planer, puis de voler, serait apparue fortuitement. Un événement qui a très bien pu se produire à plusieurs reprises et parallèlement, quand des maniraptorien de lignées différentes se sont mis à exploiter la portance qu'engendraient leurs bras ailés pour bondir et se percher en hauteur, pour sauter d'une branche à l'autre, voire pour s'élancer du haut d'un arbre. Finalement, des membres d'une de ces lignées ont acquis des traits adaptés au vol : une plus petite taille, des bras très allongés, de puissants muscles pectoraux, une large queue de plumes qui a remplacé leur longue queue. Ce sont eux qui ont donné les oiseaux actuels.

Les plumes et les ailes s'inscrivent dans un cadre bien plus vaste que celui de l'évolution du vol. Les dinosaures si bien conservés du Liaoning montrent que de nombreuses caractéristiques singulières des oiseaux sont apparues des millions d'années avant les oiseaux et pour des raisons sans rapport aucun avec le vol.

Il en est ainsi des longues et minces

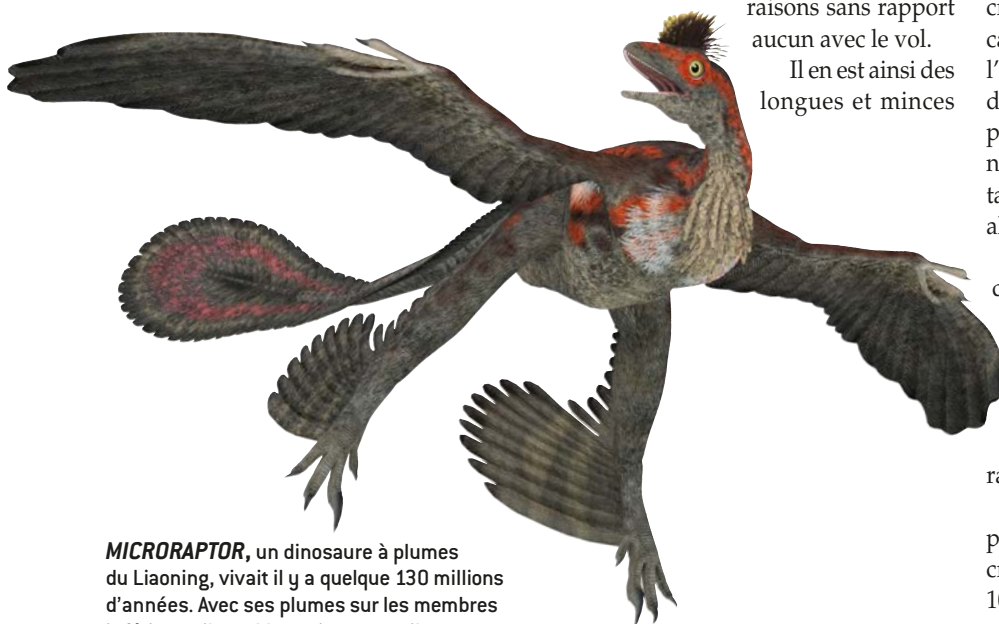
pattes se terminant par trois doigts, l'un des traits les plus caractéristiques des oiseaux actuels. Le registre fossile montre que ce trait est apparu il y a plus de 230 millions d'années chez des dinosaures très primitifs. Cette émergence semble avoir fait partie d'un remodelage général du corps de certains dinosaures, qui a transformé ces derniers en animaux bipèdes courant très vite pour distancer des prédateurs ou rattraper des proies. Cette forme des membres inférieurs fait partie des caractéristiques des dinosaures expliquant qu'ils aient pu régner aussi longtemps.

Chez certains de ces dinosaures – les tout premiers membres de la dynastie des théropodes –, les clavicules gauche et droite ont fusionné pour constituer une nouvelle structure, le bréchet. Un changement apparemment mineur, mais qui a stabilisé la ceinture scapulaire (les os qui relient les membres supérieurs à la colonne vertébrale), ce qui a permis à ces prédateurs furtifs de mieux encaisser les contre-chocs se produisant lors de la saisie des proies. Les oiseaux, leurs descendants, ont profité de la présence du bréchet, puisque celui-ci se déforme comme un ressort et stocke de l'énergie dans les battements d'ailes.

Deux autres éléments jouant un rôle important dans le vol sont la croissance rapide des oiseaux et leurs os creux. Ces traits si caractéristiques des oiseaux ont aussi une origine profondément dinosaurienne. Beaucoup de dinosaures avaient en effet des os creux où se logeaient des sacs aériens, révélateurs de poumons à circulation continue ultra-efficaces, car capables de prélever de l'oxygène dans l'air tant pendant l'inspiration que pendant l'expiration. C'est du reste ce type de poumon qui fournit aux oiseaux l'énergie nécessaire à leur mode de vie exigeant, tandis que les vides internes de leurs os allègent leur squelette pour le vol.

En étudiant la structure microscopique des os de dinosaures, nous avons appris que ces premiers théropodes avaient des vitesses de croissance et des physiologies intermédiaires entre les reptiles, à croissance lente et à sang froid, et les oiseaux d'aujourd'hui, à croissance rapide et à sang chaud.

Ainsi, on sait maintenant qu'un poumon « à ventilation continue » et une croissance rapide sont apparus plus de 100 millions d'années avant les oiseaux, à une époque où apparaissaient les premiers



MICRORAPTOR, un dinosaure à plumes du Liaoning, vivait il y a quelque 130 millions d'années. Avec ses plumes sur les membres inférieurs, il semble avoir quatre ailes.

dinosaures aux longues jambes, très différents des amphibiens, des lézards et des crocodiles. Plus rapides que ces animaux avec lesquels ils concourraient, ces boules d'énergie ont alors conquis de nouvelles niches écologiques.

La petite taille des oiseaux – qui n'a rien à voir avec celle, massives, de *T. rex* et compagnie – est elle aussi apparue au sein de lignées bien antérieures aux oiseaux. Mike Lee, de l'université Flinders en Australie, et Roger Benson, de l'université d'Oxford, ont établi indépendamment que la gracilité et la petite taille des oiseaux sont le résultat d'une réduction progressive, qui a débuté avec les maniraptorien et a duré plus de 50 millions d'années.

On ne sait pas exactement ce qui l'a déclenchée, mais une possibilité serait que le rapetissement des dinosaures à plumes leur ait donné accès à de nouvelles niches écologiques – arbres, broussailles, peut-être même grottes ou terriers – inaccessibles aux géants tels que *Brontosaurus* et *Stegosaurus*.

On peut également faire remonter aux dinosaures certains traits neurologiques et comportementaux des oiseaux actuels. De nombreuses étapes clés de l'histoire de ces traits ont été découvertes dans le désert de Gobi, en Mongolie. Au cours du dernier quart de siècle, une équipe conjointe du Muséum américain d'histoire naturelle et de l'Académie mongole des sciences, dirigée notamment par Mark Norell et par Mike Novacek, a rassemblé de nombreux fossiles significatifs à cet égard.

La plupart remontent au Crétacé supérieur, il y a entre 84 millions et 66 millions d'années. Ils livrent un nombre exceptionnel de détails sur la vie des dinosaures et des premiers oiseaux. On trouve notamment toute une série de crânes bien conservés de *Velociraptor* et d'autres maniraptorien à plumes. Réalisées par Amy Balanoff de l'université Stony Brook, les tomographies à rayons X de ces spécimens révèlent que ces espèces avaient un volumineux cerveau dont la partie antérieure était étendue.

Le gros prosencéphale des oiseaux est ce qui explique leurs remarquables capacités cognitives. C'est en son sein que se loge l'« ordinateur de vol », en

d'autres termes les circuits neuronaux grâce auxquels les oiseaux contrôlent si bien leurs déplacements dans les trois dimensions. Les chercheurs ignorent encore pourquoi les maniraptorien ont acquis plus d'intelligence, mais les fossiles montrent clairement que cela s'est produit bien avant l'apparition du vol.

Le plan d'organisation des oiseaux s'est donc construit en de nombreuses petites étapes. La transition entre dinosaures et oiseaux ne s'est pas produite d'un seul coup, mais plutôt au cours de dizaines de millions d'années d'évolution graduelle.

Cette transition a d'ailleurs été si progressive qu'il n'existe pas de distinction claire entre « oiseaux » et « non-oiseaux ». C'est ce que j'ai mis en évidence en 2014 pendant ma thèse de doctorat (sous la direction de Mark Norell) par des techniques statistiques. En plus de ses 25 ans de recherche dans le désert de Gobi, Mark Norell a travaillé avec plusieurs vagues d'étudiants de troisième cycle pour établir de façon de plus en plus détaillée les arbres de parenté des dinosaures.

Avec nos collègues Greene Lloyd, de l'université de Leeds en Angleterre, et Steve Wang, du Swarthmore College, Mark Norell et moi avons compilé les données concernant plus de 850 caractéristiques du squelette de quelque 150 théropodes qui couvrent la transition dinosaures-oiseaux. Nous avons ensuite utilisé les statistiques à variables multiples pour placer chaque espèce dans un espace morphologique – une carte qui regroupe les espèces en fonction des pourcentages de traits communs.

Sur une telle carte, deux espèces très semblables anatomiquement se retrouvent très proches l'une de l'autre, comme Paris et Créteil sur une carte géographique; deux espèces aux squelettes très différents se retrouvent loin l'une de l'autre, comme Paris et Strasbourg sur la même carte. Si les oiseaux ont évolué par une série de mutations rapides et spectaculaires à partir de certains dinosaures, alors les deux groupes auraient dû se retrouver sur deux zones distinctes de la carte. Au lieu de cela, l'espace morphologique que nous avons obtenu s'est révélé beaucoup plus désordonné: les oiseaux s'y trouvaient

**La gracilité
et la petite taille**
des oiseaux sont le résultat
d'une réduction
progressive, qui a duré plus
de 50 millions d'années

dispersés au milieu d'un grand nuage de dinosaures. Aucune démarcation nette n'étant perceptible, on en déduit que la transition entre oiseaux et dinosaures a été lente au point d'en être imperceptible.

Les oiseaux sont donc un groupe particulier de dinosaures. Si, il y a quelque 125 millions d'années, je m'étais trouvé en ce lieu qui allait devenir Jinzhou, en train d'observer *Zhenyuanlong* battre frénétiquement des ailes pour essayer d'échapper au nuage de cendres volcaniques qui allait l'ensevelir, il m'aurait fait l'impression d'un grand oiseau.

Dans le même temps, j'aurais pensé que dinosaures et oiseaux sont en gros des animaux du même type. Le fait que l'on classe *Zhenyuanlong* parmi les dinosaures et non parmi les oiseaux est affaire de convention : pour les paléontologues, les oiseaux font traditionnellement partie du clade de l'*Archaeopteryx* de Huxley – en d'autres termes, de petits animaux dotés d'ailes pleinement évoluées et aptes au vol. Puisque les dromæosauridés, dont fait partie *Zhenyuanlong*, occupent une branche extérieure de l'arbre de parenté des oiseaux, on tend à penser qu'ils n'en font pas partie.

Nous ne devrions cependant pas sous-estimer les oiseaux. Oui, ce sont bien des dinosaures ; non, ils ne constituent pas une classe à part. Toutefois, ce sont des dinosaures remarquables, et ils ont adopté un mode de vie qui les a fait prospérer. Les quelque 10 000 espèces actuelles d'oiseaux représentent en effet une spectaculaire diversité de formes, qui va des oiseaux-mouches aux autruches. Qui plus est, les oiseaux ont été capables de survivre aux catastrophes de la fin de Crétacé, il y a quelque 66 millions d'années, ce qui n'a pas été le cas des autres dinosaures.

Il est fascinant de penser que, bien avant les oiseaux, un grand nombre de sélections et d'adaptations ont été à l'œuvre des dizaines de millions d'années durant, dont sont issus les théropodes non aviens, puis les théropodes aviens (les oiseaux). Si quelqu'un parmi nous avait pu être témoin de ce long processus évolutif, il n'aurait pas vu venir le fait que l'accumulation de traits aidant ces dinosaures à garder la chaleur de leur corps ou à attirer un partenaire sexuel conduirait un jour à des organismes volants.

L'évolution n'a pas d'objectif ; elle n'agit que sur ce qui est disponible sur

le moment, elle est influencée par les incessantes et toujours changeantes pressions de l'environnement et de la compétition. Il n'y a pas eu de moment où un dinosaure est devenu oiseau, une sorte d'explosion biologique qui aurait transformé un *T. rex* en poule.

La longue évolution qui a abouti aux oiseaux se compare davantage à une épopée qu'à une rupture. Il en va de même pour le long processus qui a conduit de certains poissons à quatre nageoires aux tétrapodes (à quatre membres) terrestres que nous sommes. Dotés de doigts, les tétrapodes ont donné des formes aussi différentes que les mammifères terrestres, dont certains se sont transformés en baleines, et les primates arboricoles, dont certains se sont transformés en humains bipèdes. Plus les chercheurs en apprennent sur les transitions évolutives majeures, plus ils concluent qu'elles n'ont rien d'un sprint et tout du marathon.

L'évolution des oiseaux, une longue saga

L'évolution des oiseaux est donc une saga, dont un aspect supplémentaire mérite d'être mentionné. L'étude statistique que nous avons effectuée pourrait aussi expliquer comment les oiseaux ont survécu à l'extinction de masse qui a emporté tous les dinosaures, sauf eux, à la fin du Crétacé. Une partie de notre travail a consisté à mesurer la vitesse à laquelle les caractéristiques du squelette des oiseaux et de leurs cousins dinosaures ont changé, ce qui est un reflet de leur vitalité évolutive.

Les résultats nous ont plus que surpris : les premiers oiseaux qui côtoyaient les autres dinosaures évoluaient extrêmement vite, nettement plus que *Velociraptor*, *Zhenyuanlong* et les autres espèces de dinosaures non aviens. Il semble qu'avec l'apparition du premier petit dinosaure capable de voler, un énorme potentiel évolutif s'est débloqué. Désormais, les dinosaures se déplaçant dans les trois dimensions de l'espace avaient accès à une myriade de nouvelles niches écologiques. Et alors que leurs cousins terrestres n'ont pu faire face aux catastrophes de la fin du Crétacé, les oiseaux ont traversé en volant les régions ravagées – et ont trouvé tout un nouveau monde, vidé de ses anciens habitants, à conquérir. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Lü et S. L. Brusatte, A large, short-armed, winged dromaeosaurid (Dinosauria: Theropoda) from the early Cretaceous of China and its implications for feather evolution, *Scientific Reports*, vol. 5, article 11775, 2015.

S. L. Brusatte et al., Gradual assembly of avian body plan culminated in rapid rates of evolution across the dinosaur-bird transition, *Current Biology*, vol. 24(20), pp. 2386-2392, 2014.

R. Prum et A. Brush, Les plumes de dinosaures, *Dossier Pour la Science* n° 48, juillet-septembre 2005.



Abonnez-vous à POUR LA SCIENCE

OFFRE DÉCOUVERTE
12 n^{os} par an
4,90€
PAR MOIS
SEULEMENT

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

PAS475

☒ **OUI**, je m'abonne à **Pour la Science** formule Découverte.
Je règle par prélèvement automatique de 4,90€ par mois et
je complète l'autorisation ci-contre. **J'économise 24% par mois.**
(DPV4E90)

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____

@ _____

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/08/2017 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

IBAN _____
(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse - 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM)

Joindre un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire