

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

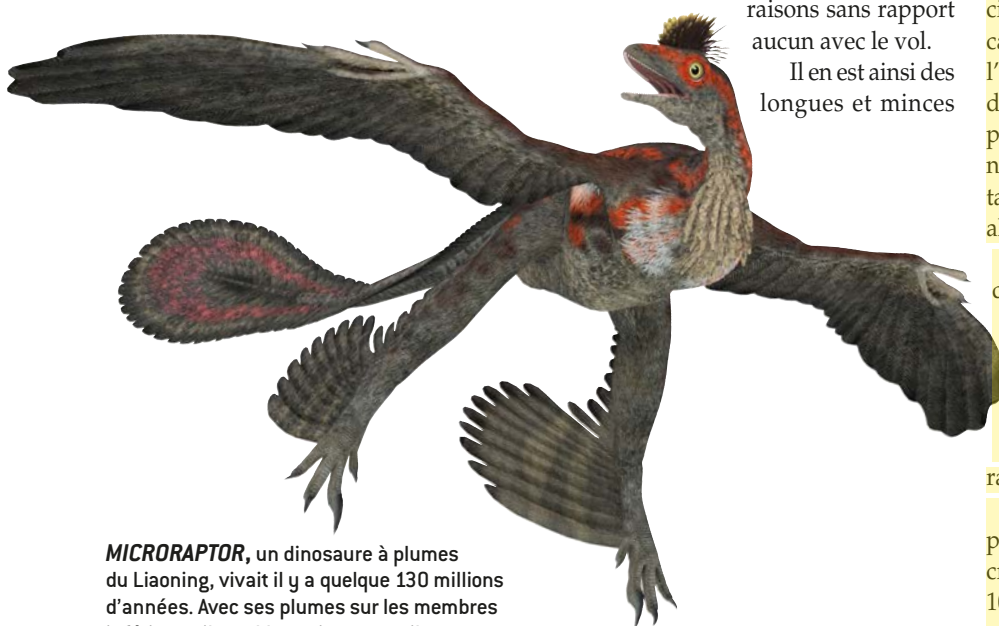
pattes se terminant par trois doigts, l'un des traits les plus caractéristiques des oiseaux actuels. Le registre fossile montre que ce trait est apparu il y a plus de 230 millions d'années chez des dinosaures très primitifs. Cette émergence semble avoir fait partie d'un remodelage général du corps de 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