

Dans la région du bassin, des vertèbres s'ajoutent à la ceinture pelvienne, et l'orientation du pubis (l'os qui est attaché devant l'articulation de la hanche, sous cette dernière) change : chez les premiers théropodes, comme chez la plupart des reptiles, le pubis pointe vers l'avant et vers le bas ; puis il recule et, chez les oiseaux plus évolués qu'*Archaeopteryx*, devient parallèle à l'ischion (l'os du bassin qui pointe vers l'arrière). Nous ignorons ce qui a favorisé cette évolution, mais le partage de ces caractéristiques par les oiseaux et par d'autres maniraptorien témoigne de leur origine commune.

Au cours de l'évolution des théropodes, leur queue raccourcit et se rigidifie, devenant un balancier plus efficace pendant la course. Steven Gates, de l'Université Brown, a mon-

tré que cette transformation est associée à un changement de fonction : l'ancrage des muscles des membres postérieurs passe de la queue au bassin. Chez les maniraptorien, les muscles qui tiraient les pattes vers l'arrière peuvent alors contrôler la queue. Chez les oiseaux qui évoluent après *Archaeopteryx*, ces muscles semblent utilisés pour diriger la queue, couverte de plumes, pendant le vol.

Ainsi, de nombreux caractères qui étaient autrefois considérés comme caractéristiques des oiseaux sont déjà présents chez les théropodes. Ces caractères sont associés à des fonctions différentes chez les théropodes et chez les oiseaux, mais leur présence a permis l'apparition du vol et d'autres comportements des oiseaux, telle la vie dans les arbres.

Des dinosaures pondeurs et couveurs

Outre l'évolution des caractères morphologiques, nous disposons aujourd'hui d'autres preuves de la filiation entre les dinosaures et les oiseaux. Des aires de ponte de théropodes, trouvées en Mongolie et dans le Montana, indiquent que certains comportements reproducteurs des oiseaux sont apparus avant eux : les œufs n'étaient pas déposés en une seule fois et en grand nombre, comme chez la plupart des autres reptiles, mais par un ou deux, pendant plusieurs jours peut-être, comme chez les oiseaux. Des squelettes du théropode *Oviraptor* ont même été trouvés sur leurs nids : ils auraient été enfouis par des tempêtes de sable alors qu'ils protégeaient leurs œufs (on a nommé l'animal *Oviraptor*, «voleur d'œufs», car on pensait qu'il pillait les nids d'autres dinosaures, mais le choix semble mauvais). Même la coquille des œufs de théropodes a des points communs avec celle des œufs d'oiseaux : elle est formée de deux couches de calcite, la première cristalline et la seconde plus irrégulière et poreuse.

Les plumes, longtemps considérées comme l'apanage des oiseaux, leur seraient aussi antérieures. En 1996 et en 1997, Ji Qiang et Ji Shu'an, du Musée chinois de géologie, ont découvert deux fossiles de la fin du Jurassique ou du début du Crétacé (d'environ 145 millions d'années), dans la province de Liaoning. Le premier, un dinosaure de la taille d'une dinde, nommé *Sinosauropteryx*, porte une frange d'éléments filamenteux le long de la colonne vertébrale et sur la surface du corps. Ces structures sont-elles des précurseurs des plumes ? L'animal n'est pas, en tout cas, un proche parent des oiseaux. Ses bras courts et d'autres caractères apparenteraient *Sinosauropteryx* au théropode *Compsognathus*, qui n'est pas particulièrement proche des oiseaux ni des autres maniraptorien.

Le second animal, *Protarchaeopteryx*, portait apparemment de vraies plumes sur le corps et d'autres, plus longues, sur la queue. Ce serait un théropode maniraptorien (on ne connaîtra sa parenté avec les oiseaux que lorsqu'il sera complètement décrit). Cette découverte prouve que les structures qui se sont progressivement transformées en plumes seraient appa-

Des os dans la polémique

Malgré les nombreuses preuves que les oiseaux descendent de petits dinosaures théropodes terrestres, quelques paléontologues contestent encore l'hypothèse. Ils n'ont toutefois testé aucune des théories concurrentes par la méthode cladistique ou par toute autre méthode analysant objectivement les relations entre les animaux. Voici quelques-uns de leurs arguments, avec les contre-arguments.

Les mains des théropodes et des oiseaux diffèrent : les théropodes ont conservé les premier, deuxième et troisième doigts (ils ont perdu l'annulaire et l'auriculaire), mais les oiseaux possèdent les deuxième, troisième et quatrième doigts. Cette analyse de la main de l'oiseau s'appuie sur des recherches embryologiques : si, dans une main à cinq doigts, certains disparaissent, ce sont les doigts extérieurs (le premier et le cinquième) qui partent en premier. Pourquoi, dans ce cas, les théropodes ont-ils conservé les premier, deuxième et troisième doigts ? Cette «loi» souffre donc des exceptions : elle n'interdit pas la conservation des trois premiers doigts chez les oiseaux. En outre, les indications apportées par le squelette démentent la prétendue différence entre les mains des oiseaux et celles des théropodes. Les trois doigts conservés par les théropodes (après la perte des quatrième et cinquième doigts) ont des formes, des proportions et des connexions avec le poignet semblables à celles d'*Archaeopteryx* et des oiseaux plus évolués.

Les théropodes sont apparus trop tard pour donner naissance aux oiseaux. *Archaeopteryx* a été découvert dans des sédiments déposés il y a 150 millions d'années, alors que les restes de divers maniraptorien, les plus proches parents connus des oiseaux, n'ont qu'environ 115 millions d'années. L'argument a été récemment invalidé : on a découvert les ossements de petits maniraptorien contemporains d'*Archaeopteryx*. En aucun cas, l'absence de fossiles ne constitue une preuve, et rien n'interdit leur existence dans un gisement plus ancien, encore inconnu.

La fourchette des oiseaux (formée de la fusion des clavicules) est différente des clavicules de théropodes. Cette objection pouvait être retenue quand seules les clavicules de théropodes primitifs étaient connues, mais les clavicules en boomerang découvertes chez de nombreux théropodes ressemblent à celles d'*Archaeopteryx*.

Le poumon complexe des oiseaux ne peut avoir évolué à partir du poumon des théropodes. En l'absence de poumon fossilisé, nous ne pouvons pas trancher. En outre, aucun autre groupe animal n'a de poumon qui aurait pu être le précurseur des poumons d'oiseaux : ces derniers sont particulièrement complexes et sans équivalent chez les autres animaux actuels.

rues avant les oiseaux et, de toute façon, avant que les oiseaux ne commencent à voler. Quelle était leur fonction d'origine : protégeaient-elles les animaux contre le froid ? Étaient-elles déployées lors de parades ?

Les débuts du vol

La plupart des caractéristiques qui permettent aux oiseaux de voler étaient donc présentes chez leurs ancêtres terrestres. *Archaeopteryx* n'était en outre certainement pas le premier théropode volant, même si jusqu'à maintenant on ne lui connaît pas de prédécesseur. Comment ce mode de locomotion s'est-il développé ? Et, tout d'abord, comment les ancêtres des oiseaux se sont-ils envolés ?

On a d'abord pensé que des théropodes avaient commencé à voler parce que, montant aux arbres, ils en redescendaient en planant, grâce à des ébauches de plumes. Des caractéristiques d'*Archaeopteryx* et de ses cousins maniraptorien contredisaient toutefois cette hypothèse : ils étaient mal adaptés à la vie dans les arbres, n'ayant pas, par exemple, un pied qui leur permettait de se percher. Certains grimpaient peut-être aux arbres, mais on comprend mal comment *Archaeopteryx* aurait grimpé aux

arbres et volé avec ses membres antérieurs. De plus, dans l'environnement où l'on a trouvé *Archaeopteryx*, aucune plante ne s'élevait à plus de quelques mètres. Enfin, même s'il grimpait aux arbres, il n'y vivait pas nécessairement ni n'avait de compétences particulières pour le vol plané : la plupart des petits animaux grimpent aux arbres (même certaines chèvres et les kangourous), mais ils ne sont pas pour autant arboricoles.

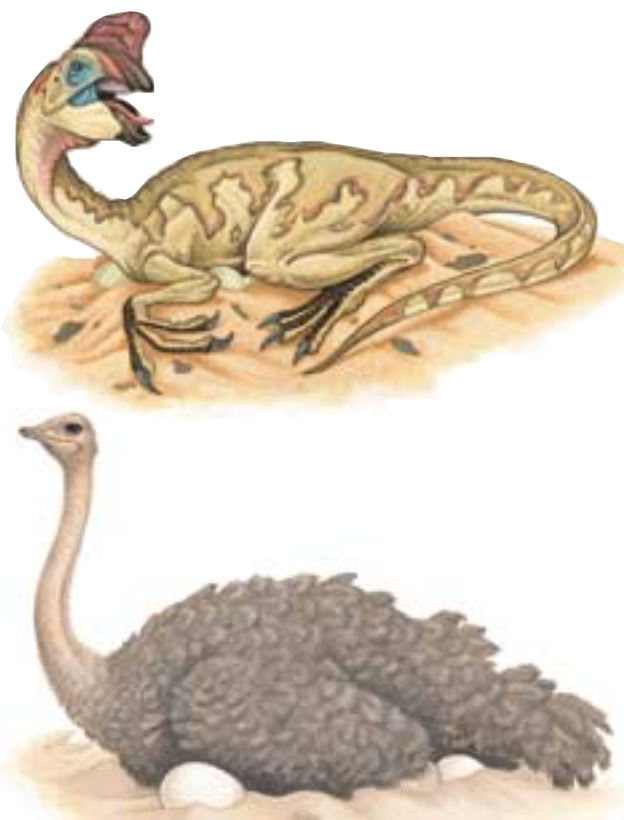
Une autre hypothèse a été proposée : les petits dinosaures qui couraient sur le sol auraient étendu leurs bras pour maintenir leur équilibre quand ils bondissaient dans les airs à la poursuite d'un insecte ou devant un prédateur. Des plumes, même rudimentaires, auraient élargi la surface des membres, favorisant la portance ; puis l'allongement des plumes aurait augmenté la portance jusqu'à l'obtention d'un vol continu. Comme un bond ne procure pas autant d'accélération que la chute du haut d'un arbre, les animaux devaient courir assez vite pour décoller. Certains animaux terrestres atteignent de grandes vitesses.

Cette hypothèse est soutenue par le fait que les théropodes, ancêtres directs des oiseaux, vivaient sur le sol et qu'ils avaient les caractères requis

pour atteindre une grande vitesse de décollage : ils étaient petits, vifs, agiles, légèrement bâtis, et leurs longues jambes leur donnaient une course rapide. Comme ils étaient bipèdes, leurs bras étaient libres de battre l'air, ce dont les autres reptiles étaient incapables. La réalité est toutefois sans doute à mi-chemin des deux hypothèses : les ancêtres des oiseaux s'envolèrent vraisemblablement du sol et du haut de monticules accessibles, collines, gros rochers ou arbres abattus.

Le problème du type de vol est beaucoup plus important que celui du décollage. Le battement produit non seulement la portance, qu'un animal planeur obtient en déplaçant ses ailes dans l'air, mais aussi la poussée, qui permet d'avancer. Sur un avion, la portance est assurée par les ailes, et la poussée par les réacteurs ou les hélices ; chez les oiseaux et les chauves-souris, l'extrémité de l'aile produit la poussée et le reste de l'aile assure la portance.

À la fin des années 1970, Jeremy Rayner, de l'Université de Bristol, montra que le battement vers le bas et vers l'avant des oiseaux et des chauves-souris crée une série de tourbillons qui propulsent l'animal. Au milieu des années 1980, l'un d'entre nous (K. Padian) et J. Gauthier



5. **OVIRAPTOR** a été découvert assis dans son nid et protégeant ses œufs (dessin de gauche), telle une autruche actuelle (dessin de droite). La couvaison est donc apparue avant l'émergence des oiseaux. Sur le fossile qui a servi de modèle à la réalisation du dessin d'*Oviraptor* (photographie ci-dessus) la position des griffes montre que les membres entouraient les œufs (grands ovales sur la photographie) pour les protéger.