

produire de l'énergie à partir des aliments ou des réserves de graisse. Les scientifiques ont découvert que la consommation d'oxygène par des blattes ayant été piquées est beaucoup plus faible que celle de leurs congénères en bonne santé. Ils pensaient initialement que ce métabolisme réduit était la conséquence de la faible mobilité des victimes. Toutefois, ils ont constaté que quand on provoque une paralysie de la blatte à l'aide de substances chimiques ou en sectionnant des neurones, l'insecte vit moins longtemps qu'une blatte envenimée par la guêpe émeraude.

La clé de cette survie prolongée semble être l'hydratation. On ne sait pas exactement comment le venin agit pour que la blatte garde son eau et reste hydratée, mais il fait en sorte que quand la larve de guêpe éclôt de son œuf, son repas soit prêt à être consommé. Cette larve commence par sucer l'hémolymph de l'insecte puis, quelques jours après, s'introduit dans l'abdomen pour le dévorer, avant de se métamorphoser en pupa. Environ un mois après, une nouvelle guêpe émerge du terrier, laissant derrière elle la carcasse de la blatte.

Le venin de la guêpe émeraude n'est qu'un exemple, poussé à l'extrême, de venin neurotoxique. On connaît plus de 130 espèces dans le genre auquel appartient la guêpe *Ampulex compressa*. Le genre *Ampulex* lui-même appartient à un groupe très vaste et très divers de guêpes, qui compte des dizaines de milliers d'espèces (et peut-être des centaines de milliers ou plus, selon certains spécialistes), connues pour l'effet manipulateur de leur venin. Toutes ont un cycle de vie macabre : au stade adulte, elles se nourrissent comme les autres guêpes et abeilles, mais au stade larvaire, elles se nourrissent d'autres animaux. Elles ne sont ni tout à fait indépendantes ni tout à fait parasites – ce sont des « parasitoïdes ».

Un grand nombre d'espèces manipulatrices

Les blattes ne sont pas leurs seules cibles ; il existe des guêpes parasitoïdes qui déposent leurs œufs sur ou dans des araignées, des chenilles, des fourmis.

La guêpe *Agriotypus*, qui vit dans l'hémisphère Nord tempéré, plonge sous l'eau pour fixer ses œufs sur des larves de phryganes (ou trichoptères, des insectes ressemblant à des papillons de nuit) et peut

rester immergée jusqu'à une quinzaine de minutes pour accomplir sa tâche.

Les guêpes *Lasiochalcidia* d'Europe et d'Afrique se jettent courageusement dans les mandibules cauchemardesques d'un fourmilion, les écartent et déposent leurs œufs dans sa gorge.

Il existe même des guêpes dites hyperparasitoïdes qui parasitent d'autres guêpes semblables à elles, à l'instar des espèces euro-asiatiques du genre *Lysibia* : celles-ci

Il existe des guêpes dites hyperparasitoïdes qui parasitent d'autres guêpes parasitoïdes

détectent des chenilles parasitées par des guêpes parasitoïdes du genre *Cotesia* et déposent leurs œufs dans des larves de guêpe qui viennent juste de se métamorphoser en pupes. Dans certains cas, de multiples espèces de guêpes se parasitent l'une l'autre, conduisant à une poupée russe d'interactions parasites.

Et pour assurer la sécurité de leur passage de l'état larvaire à l'âge adulte, ces guêpes obtiennent de leur hôte souvent davantage qu'un simple repas. Ainsi, une espèce transforme ses chenilles-hôtes en gardes du corps morts-vivants qui vont défendre de jeunes guêpes métamorphosées en pupes et venant de se nourrir de leur corps. Une larve d'une autre espèce force son araignée-hôte à tisser une toile qui protégera son cocon, juste avant de tuer l'araignée.

Tandis que les guêpes de cette famille peu ordinaire ont poussé à la perfection l'art du contrôle cérébral, il existe d'autres animaux venimeux dont les toxines modifient les états mentaux. Il existe même des espèces dont les composés neurotoxiques traversent notre propre barrière hématoencéphalique, un exploit qu'aucun venin de guêpe n'accomplit. Mais contrairement aux blattes, nous autres *Homo sapiens* avons une étrange affinité pour les substances qui perturbent notre cerveau. Alors que les blattes fuient celles qui cherchent à leur détraquer le cerveau, certaines personnes sont disposées à payer plusieurs centaines d'euros pour une dose de produit qui leur fera connaître une expérience similaire. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

M. Kaiser et F. Libersat, **The role of cerebral ganglia in the venom-induced behavioral manipulation of cockroaches stung in the parasitoid jewel wasp**, *Journal of Experimental Biology*, vol. 218(7), pp. 1022-1027, 2015.

F. Libersat et R. Gal, **What can parasitoid wasps teach us about decision-making in insects**, *Journal of Experimental Biology*, vol. 216, pp. 47-55, 2013.

F. Thomas et F. Libersat, **Les parasites manipulateurs**, *Pour la Science*, n° 391, pp. 36-42, mai 2010.

R. Gal et F. Libersat, **A wasp manipulates neuronal activity in the sub-esophageal ganglion to decrease the drive for walking in its cockroach prey**, *PLoS One*, vol. 5(4), article e10019, 2010.

Les



© James Gurney

géants

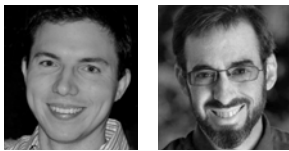


du ciel

Daniel Ksepka et Michael Habib

Les *Pelagornis* ont survolé les mers pendant plus de cinquante millions d'années. Avec leur envergure de plus de 6 mètres, comment faisaient ces oiseaux pour décoller ?

■ LES AUTEURS



Daniel T. KSEPKA est paléontologue et conservateur au musée Bruce de Greenwich, dans le Connecticut aux États-Unis.

Michael HABIB, anatomiste à l'université de Californie du Sud, étudie la biomécanique d'animaux éteints.

L'ESSENTIEL

- *Pelagornis*, un genre d'oiseaux marins qui a régné sur les océans pendant 50 millions d'années, était connu depuis 150 ans.
- Certains pélagornithidés avaient une envergure double de celle des plus grands oiseaux actuels.
- L'étude de *Pelagornis sandersi*, le plus grand oiseau fossile connu, donne enfin des clés sur l'envol, le vol et le mode de vie de ces géants des airs.
- Les raisons de leur disparition, il y a trois millions d'années, restent inconnues.

La pittoresque rade de Charleston, en Caroline du Sud, héberge une grande variété d'oiseaux résidents ou de passage, du pélican au cormoran en passant par les goélands, les hérons et de nombreux passereaux. Mais il y a environ 25 millions d'années, des oiseaux géants régnaient dans le ciel de ce port naturel. En 1983, lors de la construction d'un nouveau terminal de l'aéroport local, une équipe de paléontologues dirigée par Albert Sanders, alors conservateur du musée de la ville, a en effet mis au jour le fossile d'un grand oiseau. Malheureusement, comme ces chercheurs ont été confrontés en même temps à de nombreux fossiles, les restes en question se sont retrouvés délaissés sur des étagères. Jusqu'à ce que, récemment, l'un de nous, Daniel Ksepka, décide de réétudier ce fossile et mette en évidence ce qu'il a d'extraordinaire : ce sont les restes du plus grand oiseau volant jamais identifié !

Avec son envergure considérable, il ressemble à un petit avion, et le fait qu'il ait été découvert sur un aéroport est savoureux. En l'honneur de son découvreur, Daniel Ksepka a nommé son espèce *Pelagornis sandersi*, c'est-à-dire littéralement l'« oiseau pélagique de Sanders ».

Daniel Ksepka a ensuite mené des recherches afin de comprendre comment pouvait voler cet oiseau, dont les dimensions dépassent largement celles que certains spécialistes jugeaient maximales pour un oiseau capable de prendre les airs. De son côté, Michael Habib a étudié d'autres oiseaux géants fossiles. L'ensemble de ces travaux a conduit à une description bien plus complète des pélagornithidés, la famille à laquelle appartient *P. sandersi*. En particulier, on peut désormais conjecturer quels styles de vol ces oiseaux pratiquaient vraisemblablement.

Les pélagornithidés ont fait leur entrée dans le registre fossile dès 1857, quand Édouard Lartet en décrit un humérus. Ce père de la science préhistorique française pensait avoir identifié un os appartenant à un très ancien albatros et nomma l'espèce correspondante *Pelagornis miocaenus*, soit « oiseau de haute mer du Miocène ». Ce nom peu inspiré n'enlève rien au caractère spectaculaire du fossile, puisque l'humérus en question mesure près de 60 centimètres de long. Cela signifie que son propriétaire avait une envergure au moins double de celle d'un grand albatros d'aujourd'hui

(en moyenne 3,1 mètres). À l'époque de Lartet, une telle envergure était inconcevable. Malheureusement sur la base de cet unique humérus, les paléontologues du XIX^e siècle n'étaient pas en mesure de déterminer à quoi cet oiseau avait bien pu ressembler.

Un oiseau hauturier

Toutefois, l'idée que l'humérus décrit par Lartet pouvait provenir d'une autre espèce que celle d'un grand albatros s'imposa une dizaine d'années plus tard, en 1873, quand Richard Owen décrit le crâne d'un autre oiseau géant, trouvé en Angleterre. Ses recherches montrèrent clairement que l'espèce dont provenait ce crâne – qu'il nomma *Odontopteryx toliapica* – ne pouvait appartenir à aucun des groupes d'oiseaux modernes. Et la découverte ultérieure de spécimens plus complets révéla que l'oiseau dont Lartet avait étudié un humérus appartenait au même groupe éteint défini par le crâne d'Owen : celui des pélagornithidés.

D'autres découvertes ont été réalisées au cours du siècle suivant. En 1910, un marin brésilien vendit un crâne de pélagornithidé à l'université de Königsberg, en Allemagne (aujourd'hui Kaliningrad, en Russie). On l'attribua à une nouvelle espèce : *Pseudodontornis longirostris*. Puis sa trace se perdit au cours des bombardements alliés sur la ville en 1945. On ignore si ce spécimen a été volé, détruit ou transporté ailleurs.

Au cours des décennies suivantes, les chasseurs de fossiles ont mis au jour plusieurs nouvelles espèces, dont *Pelagornis orri*, en Californie, et *Pelagornis chilensis*, au Chili. Si les premiers fossiles du genre *Pelagornis* étaient en piteux état, les nouveaux, même partiels, ont permis aux paléontologues de mieux comprendre l'anatomie des pélagornithidés et leur adaptation au vol.

L'image qui émergea alors défie l'imagination, tant les traits des pélagornithidés sont stupéfiants. Il en est ainsi de ces curieux rangs serrés de « dents » portés par les mâchoires inférieures et supérieures. Nous savons que les oiseaux ont perdu la faculté de former des dents il y a plus de 65 millions d'années, donc une dizaine de millions d'années avant l'émergence des pélagornithidés. En réalité, ces derniers ont développé une alternative aux véritables dents dont étaient pourvus leurs ancêtres dinosaures : leurs « dents » ne sont que des excroissances osseuses.



CE CRÂNE DE *PELAGORNIS SANDERSI* est montré ci-dessus vu sous différents angles. On voit distinctement les pseudodents, des excroissances osseuses qui constituent l'un des traits caractéristiques des oiseaux du genre *Pelagornis*. Ces prédateurs marins utilisaient sans doute leurs pseudodents pour saisir des proies et les maintenir dans leur bec.

De vraies dents sont enchâssées dans la mâchoire et faites d'émail et de dentine. Les pseudodents des pélagornithidés n'ont rien de cela : ce sont des structures creuses formées directement dans l'os, curieusement groupées en sous-ensembles de trois, eux-mêmes groupés par trois. Des grandes pseudodents coniques sont en effet précédées et suivies de sous-ensembles comprenant une excroissance de taille moyenne flanquée d'aiguilles acérées (voir l'illustration ci-dessus). Du vivant des pélagornithidés, ces pseudodents étaient probablement recouvertes d'une mince couche du même matériau que celui qui gaine le bec des oiseaux actuels. On imagine qu'en ouvrant leur bec débordant de pseudodents acérées, les pélagornithidés nous auraient semblé menaçants. À quoi servaient ces excroissances ? Sans doute à saisir des proies et à les maintenir fermement.

Les performances prédatrices des pélagornithidés sont soulignées par d'autres traits étranges. Ainsi, le dispositif crânien de ces oiseaux était d'une souplesse incomparable : une forte charnière se trouvait là où la boîte crânienne rencontre la partie supérieure du bec et permettait à cette

dernière de ployer si nécessaire. Ensuite, la partie inférieure du bec comportait des articulations sur chacun de ses côtés qui lui permettaient aussi de ployer ; enfin, au lieu d'être jointe au menton par de l'os, cette « mâchoire inférieure » l'était par un tendon élastique. En somme, il semble que les pélagornithidés aient acquis un bec denté adapté à la saisie de grosses proies.

Un géant fragile ?

Pelagornis se distingue aussi des autres genres d'oiseaux par les os subcrâniens. Les os alaires sont tellement aplatis que cela a conduit certains paléontologues à les placer à l'envers lors de la reconstruction de squelettes ! Tous les oiseaux qui volent ont des os creux qui les allègent, mais *Pelagornis* a poussé cette caractéristique à l'extrême.

Chaque élément de ses ailes est constitué de parois osseuses exceptionnellement minces. La rigidité des os est donc assurée grâce à une structure pesant très peu, ce qui est primordial chez un grand oiseau volant. Des os fins ont cependant l'inconvénient majeur de se fracturer facilement, ce

qui peut condamner un oiseau à rester au sol et donc à ne plus pouvoir se nourrir...

Les os des membres postérieurs sont sans aucun doute les parties les plus normales des pélagornithidés, du moins en termes de forme. Les pattes qu'ils formaient semblent ridicules tant elles sont petites en comparaison des ailes. Néanmoins, leurs parois renforcées et leur forme massive devaient les rendre particulièrement résistantes. Les pélagornithidés devaient marcher maladroitement, comme de nombreux oiseaux marins actuels, mais l'essentiel était qu'ils puissent courir brièvement afin de parvenir à s'envoler.

Les chercheurs n'ont pas attendu la description de *P. sandersi*, publiée en 2014, pour savoir que la morphologie des pélagornithidés est inhabituelle, mais cette description a renforcé encore cette impression d'étrangeté. L'humérus de l'oiseau mesurait en effet presque un mètre de long, de sorte qu'il dépassait de plus de 30 % la longueur de celui de Lartet.

Cette longueur, supérieure à celle du bras d'une personne de taille moyenne, est si grande qu'il semblait impossible que cet humérus ait pu appartenir à un oiseau. On considérerait en effet que l'envergure maximale théorique de l'aile d'un oiseau était de 5,1 mètres : au-delà, estimait-on, un oiseau est trop lourd pour se maintenir en l'air en battant des ailes. Mais il fallut bien se rendre à la réalité : les os découverts à Charleston sont clairement ceux d'une aile taillée pour le vol et d'une patte pour l'envol... Et puisqu'un crâne doté d'une mâchoire à pseudodents les accompagnait, aucun doute n'est possible : il s'agit bien des restes d'un pélagornithidé.

L'excellent état de conservation de ces éléments de squelette, associé aux connaissances accumulées grâce à d'autres spécimens de pélagornithidés, a rendu possible une restitution de *P. sandersi*. Il apparaît que lorsque cet oiseau géant déployait ses ailes, elles mesuraient 6,06 à 7,38 mètres de bout en bout (voir les figures pages 58 et 61), soit plus du double de l'envergure du grand albatros, le plus grand des oiseaux actuels (avec le condor). Puisqu'elles supportaient le poids du corps de l'oiseau, les pattes, ou plutôt la circonférence de leurs os, indiquent que *P. sandersi* aurait pesé entre 21,9 et 40,1 kilogrammes. Quoique massif en comparaison des oiseaux modernes, l'animal était fin pour son envergure, grâce à un corps petit et à un squelette ultraléger.

Des os de *P. sandersi*, découverts dans les années 1980 près de l'aéroport de Charleston, aux États-Unis, viennent d'être réétudiés. Ils révèlent comment cet oiseau fossile – le plus grand connu à ce jour – pouvait voler. La question passionne les paléontologues, car l'envergure de cet oiseau, à peu près double de celle d'un grand albatros, semblait dépasser de beaucoup le maximum possible pour voler, compte tenu des lois de l'aérodynamique. Toutefois, plusieurs caractéristiques clés permettaient à *P. sandersi* de voler (*ci-contre*), ce que les chercheurs ont compris en comparant les mensurations de l'oiseau fossile avec celles d'oiseaux actuels (*ci-dessous*).

D'ÉTROITES ÉPAULES

L'omoplate de *P. sandersi* est très petite comparée au reste du corps, ce qui suggère que les muscles servant à battre des ailes se sont rapetissés à mesure que les ancêtres de cet oiseau ont abandonné ce style de vol. En outre, la forme presque carrée de la tête de l'humérus gênait la rotation nécessaire aux battements dans l'articulation de l'épaule, mais aidait à bloquer l'aile en vol plané.

LONGUES ET EFFILÉES

Parmi les facteurs déterminant le style de vol chez les oiseaux figurent le rapport d'aspect (rapport entre la longueur de l'aile et sa largeur), la charge alaire (le poids du corps par unité de surface d'aile) et la forme de l'aile. *P. sandersi* présentait un rapport d'aspect élevé, des ailes effilées et une charge alaire intermédiaire, comme un albatros. Cela suggère que ce géant éteint excellait dans le vol plané sur de longues distances au-dessus des océans.

P. sandersi

Argentavis

Cette espèce éteinte passait jadis pour le plus grand oiseau volant ayant vécu. Il semble que ses ailes étaient similaires à celles d'un condor, avec un faible rapport d'aspect et des plumes écartées aux extrémités des ailes.



LES AILES

Très minces, les os de *P. sandersi* étaient néanmoins très rigides, ce qui réduisait son poids tout en lui permettant de résister aux bourrasques les jours de grand vent.

DE COURTES PATTES PALMÉES

Même si ses petites pattes empêchaient *P. sandersi* de marcher efficacement au sol, elles lui suffisaient pour courir sur sa courte distance d'envol. Vraisemblablement palmées, elles devaient en particulier lui permettre de décoller en mer en courant sur l'eau.

Grande outarde

Cette espèce est actuellement l'un des oiseaux volants les plus lourds. Son poids et ses ailes longues et larges indiquent que son rapport d'aspect et sa charge alaire sont plutôt intermédiaires. Dans l'air, son cycle de battements d'ailes est lent et régulier.

Condor de Californie

Son faible rapport d'aspect, sa charge alaire intermédiaire, ses ailes larges et dentelées à l'extrémité font de cet oiseau un excellent planeur. Pour s'élever, il profite de masses ascendantes d'air chaud.

Grand albatros

Ce grand oiseau, connu pour sa façon de planer au-dessus des vagues, est caractérisé par un rapport d'aspect élevé, une charge alaire intermédiaire et des ailes effilées. Il s'agit de l'oiseau actuel le plus proche de *P. sandersi*.

Frégate superbe

Le rapport d'aspect élevé et la faible charge alaire de la frégate lui permettent de planer plus lentement et plus haut dans le ciel que l'albatros. Elle vole ainsi jusqu'à 2,5 kilomètres au-dessus du niveau de la mer, tandis que l'albatros rase les vagues.

Moineau domestique

Avec son faible rapport d'aspect, sa charge alaire intermédiaire et ses ailes arrondies, ce petit oiseau est capable de voler dans de tout petits espaces.

Colibri à gorge rubis

C'est l'un des plus petits oiseaux actuels. Il a un faible rapport d'aspect, une charge alaire élevée et des ailes courtes et aplaties dont il se sert pour effectuer un vol stationnaire.

Canard colvert

Son facteur d'aspect élevé, sa forte charge alaire et ses ailes effilées lui permettent de voler à vitesse soutenue, mais sans pouvoir manœuvrer facilement. Il est par conséquent efficace lors de ses vols migratoires, mais peine à échapper aux griffes d'un faucon ou à se poser avec élégance.

Gélinotte huppée

Cet oiseau aux ailes courtes, larges et arrondies, a un petit rapport d'aspect et une charge alaire élevée. La gélinotte huppée peut donc prendre son envol très vite pour fuir un prédateur, mais elle ne peut pas voler avec efficacité sur de longues distances.

Martinet noir

Il peut battre frénétiquement de ses ailes, qui ressemblent quelque peu à celles de l'albatros. Cela lui permet de manœuvrer, mais aussi de voler haut dans les airs, au-dessus des terres.

La mesure de ces paramètres nous a ouvert la voie à une évaluation, par le calcul, du vol de *P. sandersi* et d'autres pélagornithidés. Remonter aux capacités locomotrices d'une espèce éteinte est un exercice particulièrement difficile, mais nous disposons aujourd'hui de simulateurs performants de l'aérodynamique d'un objet volant. Nous y avons fait appel pour étudier le vol de notre incroyable géant.

Toutefois, afin de bien saisir ce que prédisent ces programmes, encore faut-il étudier les différents styles de vol pratiqués par les oiseaux actuels. Très variables, ils vont du surplacé du colibri aux lents battements d'ailes du goéland. À l'évidence, ils varient surtout en fonction du rapport d'aspect de leurs ailes, c'est-à-dire du rapport entre leur longueur et leur largeur.

D'emblée, les ailes étonnamment longues de *P. sandersi* et des pélagornithidés – donc leur rapport d'aspect très élevé – ont suggéré que leur principale façon de voler consistait à surfer sur le vent ou les courants ascendants. Toutefois, les oiseaux planeurs d'aujourd'hui ont diverses façons de se maintenir en l'air pendant de longues périodes, de sorte qu'un examen plus approfondi de ces types de vol s'imposait.

Le condor ou le vautour ont des ailes très larges par rapport au poids de leur corps. En comparaison avec un oiseau de même masse, mais aux ailes moins portantes, cela implique des forces par unité de surface relativement faibles sur les ailes : on parle de faible « charge alaire ». Les ailes de ces grands oiseaux ont aussi la particularité d'être dentelées, c'est-à-dire que les rémiges qui les terminent peuvent s'écarter pour réduire la traînée (la résistance à l'écoulement de l'air). La combinaison de leur faible charge alaire et de la dentelure de leurs ailes rend le condor et le vautour capables de se laisser porter sur les courants d'air chaud qui s'élèvent du sol. Ils réussissent cela avec des ailes plus courtes que celles des grands planeurs marins, ce qui peut se révéler précieux dans les environnements terrestres souvent truffés d'obstacles (terrains accidentés, forêts, etc.).

La frégate, pour sa part, est un oiseau marin dont l'envergure atteint 2,3 mètres. Elle pratique un tout autre style de vol,

puisqu'elle profite des courants d'air chaud qui se forment au-dessus des océans. Plutôt que dentelées, ses ailes sont fuselées et effilées. Comptant parmi les oiseaux les plus légers, elle est logiquement caractérisée par une charge alaire exceptionnellement basse. Ces caractéristiques lui permettent de voler sur de longues distances et très haut dans le ciel, toujours prête à fondre sur une proie repérée à la surface de l'eau ou à faible profondeur.

À l'autre extrême du spectre des vols des oiseaux planeurs se trouve le grand albatros. Au contraire de la frégate, cet

oiseau est d'un poids important proportionnellement à l'envergure de ses ailes à la fois très longues, étroites et effilées. Son vol suppose donc l'existence de vents forts et rapides, ce qui explique qu'il séjourne surtout dans l'océan Austral. Toutefois, en de nombreuses circonstances, il ne trouve de tels vents que juste au-dessus des vagues. Pour les exploiter au mieux, les albatros pratiquent ce que l'on nomme le vol plané dynamique : ils modifient l'angle que font leurs ailes avec le flux de façon à réaliser une ascension face au vent, puis, la hauteur maximale étant atteinte, virent sur l'aile et surfent, le vent aux trois-quarts arrière, jusqu'au raz de l'eau, où ils virent à nouveau sur l'aile, et recommencent... En enchaînant ces montagnes russes, les ailes bloquées en

position fixe, les albatros effectuent avec très peu d'énergie de longs déplacements. En 2004, des écologues ont étudié ceux d'un albatros équipé d'une balise et ont établi que, pendant neuf heures consécutives, l'oiseau a maintenu une vitesse moyenne de 127 kilomètres par heure ! Ce record de vitesse, pour un animal en vol plané dynamique, lui a été possible grâce aux vents d'une tempête de l'Antarctique.

Cependant, l'étude de *P. sandersi* suggère que les pélagornithidés pratiquaient un style de vol plané inexistant chez les grands oiseaux planeurs d'aujourd'hui. Avec leurs ailes étroites, mais de grande surface de par leur très grande longueur, ils auraient en quelque sorte combiné les deux meilleurs styles : celui du vol ascensionnel dans les courants d'air de la frégate et celui du vol plané dynamique de l'albatros. Leur envergure leur aurait permis de pratiquer le vol plané dynamique quand le vent était assez fort et, grâce à la grande superficie de leurs ailes, de planer sur des milliers de kilomètres dans les courants ascensionnels s'élevant de l'océan.

Les plus gros pélagornithidés couvraient sans doute de telles distances assez vite. Selon nos calculs, leur vitesse de vol optimale dépassait 40 kilomètres par heure, ce qui est considérable. En outre, il semble que *P. sandersi* maintenait ce rythme sans grand effort : après avoir atteint 45 mètres d'altitude, il pouvait planer sur plus d'un kilomètre sans battre des ailes et sans l'assistance du vent.

P. sandersi passait probablement la majeure partie de son temps dans les airs, mais il fallait bien qu'il se pose de temps en temps – ne serait-ce que pour nicher – et donc qu'il redécollât. Comment faisait-il étant donné ses pattes minuscules ? La découverte de squelettes assez complets a montré que le corps des pélagornithidés était compact, de sorte que leurs pattes semblent finalement bien proportionnées. En réalisant la première restitution quantitative du mécanisme de l'envol des pélagornithidés géants, Michael Habib a prouvé que leurs petites pattes trapues, et probablement palmées, suffisaient à sprinter brièvement, notamment à la surface de l'eau. Les os de ces pattes étaient

Les oiseaux planeurs d'aujourd'hui ont diverses façons de se maintenir dans les airs



© Muséum de Charleston

LORSQUE SES AILES ÉTAIENT DÉPLOYÉES, *Pelagornis sandersi* avait une envergure comprise entre 6 et 7,4 mètres. Elle est comparée ici à l'« envergure » de 1,75 mètre atteinte par un homme haut de 1,80 mètre.

assez robustes pour résister aux importants efforts musculaires que l'oiseau devait déployer pour atteindre une vitesse permettant de s'envoler.

Il reste à se poser la question du gigantisme des pélagornithidés. Les atouts d'une grande taille sont considérables : par kilomètre parcouru, les grands oiseaux consomment moins d'énergie que les petits ; ils peuvent capturer (ou dérober) de plus grandes proies et sont aussi moins souvent la cible de prédateurs. Qui attaquera un oiseau géant, une fois que celui-ci a pris son envol ? Mais une grande taille n'est pas toujours avantageuse : les gros animaux doivent se nourrir davantage, de sorte que leurs populations ne peuvent qu'être moins nombreuses que celles des animaux de taille plus modeste. Malgré cet inconvénient, de nombreuses lignées d'animaux volants de grande taille ont prospéré. L'absence actuelle de très grands oiseaux n'est qu'une exception à la règle : des animaux volants de grande taille ont presque toujours sillonné le ciel au cours des derniers 120 millions d'années.

Héritier des ptérosaures

De fait, les ptérosaures, des reptiles volants, ont régné dans les airs au-dessus des terres comme des mers pendant des millions d'années. Ceux qui survolaient les océans se nourrissaient probablement d'invertébrés et de poissons. Leur corps était aussi bien adapté aux vols sur de longues distances, et rien n'annonçait leur disparition quand, il y a 65 millions d'années, un gros astéroïde a percuté la Terre et entraîné leur extinction. Devenues vacantes, les niches écologiques des ptérosaures ont alors pu être occupées par de grands oiseaux, notamment marins.

Quelque dix millions d'années après la chute de l'astéroïde, l'évolution a fait apparaître les pélagornithidés, qui ont occupé les niches des ptérosaures marins. Leurs fossiles proviennent en effet

exclusivement de dépôts sédimentaires de milieux océaniques, ce qui indique que les proies marines constituaient l'essentiel de leur régime. Quel type de proies ? Comparées à de vraies dents, les pseudodents des pélagornithidés n'étaient guère solides ; on peut donc supposer qu'ils se nourrissaient d'animaux à corps mous présents à la surface de l'océan : calmars, anguilles...

Les pélagornithidés volaient aussi sans doute la pitance d'autres oiseaux. Aujourd'hui, certains grands oiseaux marins – le grand labbe par exemple – brutalisent en vol des oiseaux plus petits qu'eux pour leur faire régurgiter leurs proies, qu'ils gobent ensuite. Comme les pélagornithidés étaient les plus grands oiseaux de leurs écosystèmes, nul doute qu'ils avaient cette possibilité. Peut-être se nourrissaient-ils aussi des oisillons d'autres espèces, à l'instar du grand labbe et même de certains pélicans.

Le genre *Pelargonis* n'a pas été le seul à occuper la niche des grands ptérosaures marins : un autre groupe de très grands oiseaux, celui des tératornes, est apparu il y a quelque 23 millions d'années, et a perduré jusqu'à la fin du Pléistocène, il y a 11 700 ans. Munis d'ailes plus larges et plus courtes (seulement 4 mètres d'envergure) que celles des pélagornithidés et dotés d'un corps plus massif, il est probable que ces oiseaux volaient et chassaient comme nos condors actuels.

Après 50 millions d'années de survol des mers, le genre *Pelargonis* a disparu il y a trois millions d'années. On ignore pourquoi, même si l'on sait qu'avec la formation de l'isthme de Panama notamment, les milieux océaniques subissaient alors de profonds changements. Ces derniers ont-ils privé, directement ou indirectement, les pélagornithidés de leurs ressources ? Il est difficile de l'admettre, sachant que cette famille d'oiseaux avait, au fil des millions d'années précédents, traversé de nombreux autres bouleversements. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

D. T. Ksepka, *Flight performance of the largest volant bird*, *PNAS*, vol. 111 [29], pp. 10624-10629, 2014.

M. Habib, *Constraining the air giants : Limits on size in flying animals as an example of constraint-based biomechanical theories of form*, *Biological Theory*, vol. 8 [3], pp. 245-252, 2013.

P. Catry *et al.*, *Sustained fast travel by a grey-headed albatross (*Thalassarche chrysostoma*) riding an Antarctic storm*, *The Auk*, vol. 121 [4], pp. 1208-1213, 2004.

Une boussole dans les cellules

Paul Adler et Jeremy Nathans

Si les cellules s'alignent si bien dans les tissus de l'organisme, c'est grâce à un petit groupe de gènes qui les informent sur l'orientation de leurs voisines.

L'ESSENTIEL

- Chez les animaux, les cellules des tissus sont toutes orientées de la même façon.
- Des biologistes ont identifié des protéines clés permettant aux cellules de détecter l'avant et l'arrière de l'animal.
- Ces protéines sont si essentielles que les gènes qui les codent n'ont pas beaucoup changé depuis le moment où ils ont commencé à évoluer, il y a plus d'un demi-milliard d'années.

Construire un corps n'est pas simple. Poissons, grenouilles et humains sont tous au départ une cellule unique qui se transforme, malgré de nombreux obstacles, en un organisme profondément organisé et d'une grande complexité. L'œuf fécondé se divise en deux cellules qui se dédoublent à leur tour et ainsi de suite. Au bout de quelques semaines, elles sont des dizaines de milliers. À ce moment-là, la petite boule qu'elles formaient initialement s'est allongée. Une extrémité est arrondie en forme de bulbe, tandis qu'un sillon peu profond parcourt l'autre extrémité, plus fine. Puis un étonnant ballet commence. Le sillon se creuse et les cellules qui constituent sa paroi s'inclinent peu à peu jusqu'à se toucher et adhérer les unes aux autres pour former un long tube creux – le tube neural – qui donnera naissance d'un côté au cerveau, au niveau du renflement, et de l'autre à la colonne vertébrale.

Pour que ces cellules et d'autres au sein de l'embryon s'assemblent avec autant de précision, il doit exister un mécanisme qui leur permette de percevoir où elles se situent à l'échelle de l'organisme. Chaque cellule doit « savoir » où sont l'avant, l'arrière, le haut et le bas de l'animal, ainsi que la direction qui la rapproche ou l'éloigne le plus du reste de l'organisme. Ces dix dernières années, avec d'autres biologistes du développement, nous avons essayé de comprendre comment ce système d'orientation des cellules fonctionne. Nous avons ainsi découvert un composant clé, constitué de plusieurs protéines qui fonctionnent ensemble comme une boussole miniature à l'intérieur de chaque cellule. Sans cette