



© 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.**

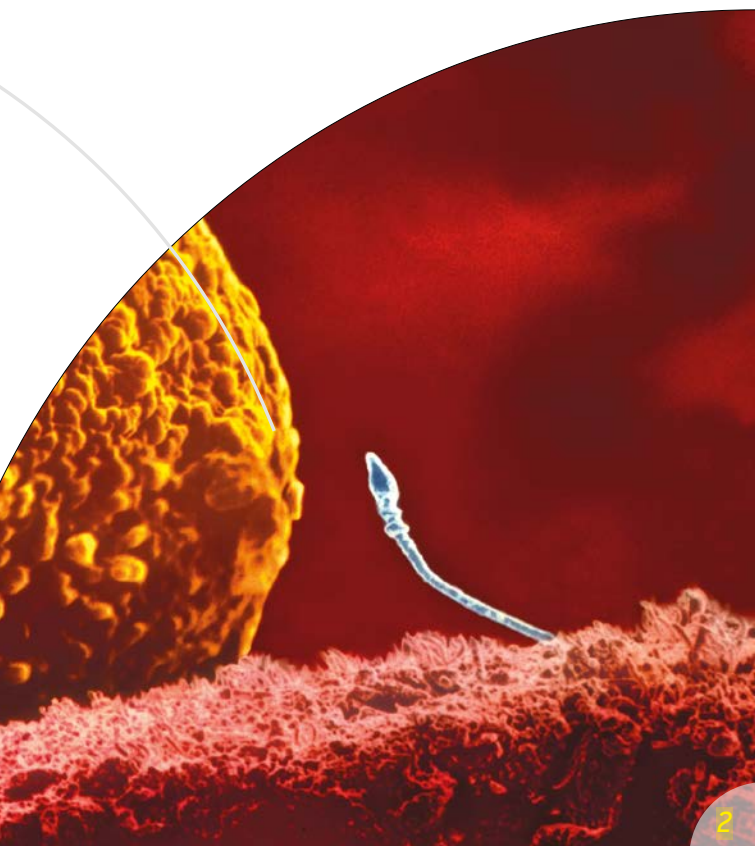
## L'ESSENTIEL

- 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.

**C**onstruire 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

**LES STADES PRÉCOCES DU DÉVELOPPEMENT HUMAIN** sont en partie contrôlés par la polarité des cellules. Peu après la fécondation (*ici, la photo 1 montre un spermatozoïde encore dans les testicules, la photo 2 un autre approchant un ovocyte, vus au microscope électronique à balayage*), l'embryon s'allonge. Au bout de vingt-deux jours, les cellules de la crête neurale (*en jaune sur l'image 3*) se rejoignent pour former le tube qui donnera le cerveau et la colonne vertébrale, bien visible à six semaines (*photo 4*). Si la polarité des cellules est perturbée, le tube se referme mal.



2



3



1



4



boussole, le cœur, les poumons, la peau et d'autres organes ne se développera pas convenablement. Quand une de ces protéines est altérée chez l'homme, de graves anomalies congénitales s'ensuivent.

Bien qu'il reste encore beaucoup à comprendre sur le fonctionnement de ce système d'orientation, nos découvertes éclairent d'un jour nouveau les processus fondamentaux du développement au sein du règne animal. C'est dans les cellules épithéliales que nous comprenons le mieux comment cette boussole fonctionne. Celles-ci tapissent la surface des tissus, un peu comme les pavés d'un trottoir, formant des couches de l'épaisseur d'une cellule. Si le drap d'un lit était constitué de cellules épithéliales, les protéines que nous et d'autres avons trouvées permettraient à chacune d'entre elles de sentir lequel de ses côtés est le plus proche de la tête ou du pied du lit.

## Des gènes évoluant depuis plus de 500 millions d'années

Les organismes dont les cellules ont une boussole bénéficient d'un avantage évolutif : leurs tissus n'ont pas besoin d'être symétriques dans toutes les directions. Certaines parties peuvent se spécialiser. Par exemple, dans l'oreille, l'orientation de la touffe ciliaire des cellules auditives – des groupes de minuscules poils qui vibrent à certaines fréquences – est indispensable à l'activation de ces cellules, et les touffes ciliaires sont ainsi toutes orientées de la même façon (voir la figure page 69). Les scientifiques désignent l'asymétrie de ces couches tissulaires sous le nom de polarité planaire, car le tissu peut alors être vu comme une surface comportant deux pôles opposés (l'adjectif « planaire » est ici un néologisme, car en français, ce terme est un nom féminin se référant à des vers plats aquatiques).

Lorsque le vivant invente un outil qui fonctionne, il le garde. À l'instar des gènes codant nombre de protéines régulatrices, ceux qui codent les protéines de polarité planaire sont très similaires chez des espèces pourtant très éloignées d'un point de vue évolutif. Par exemple, les versions que l'on trouve chez les mammifères ressemblent à celles découvertes chez les insectes. La présence

### ■ LES AUTEURS



Paul ADLER est professeur de biologie à l'université de Virginie, aux États-Unis.

Jeremy NATHANS est professeur de biologie moléculaire, génétique, neurosciences et ophtalmologie à l'école de médecine de l'université Johns Hopkins, aux États-Unis. Il est aussi chercheur à l'institut médical Howard Hughes.

de ces gènes chez des espèces aussi distantes témoigne de leur ancienneté : ils évoluent depuis plus de 500 millions d'années.

Une grande partie de ce que nous savons de la polarité planaire provient d'études menées sur des insectes à partir du milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Pour plus de commodité, ces expériences se sont concentrées non pas sur leurs organes internes, mais sur leur squelette externe ou cuticule, plus accessible et présent chez la plupart des insectes adultes.

La cuticule est sécrétée par une couche plus molle de cellules épidermiques située juste en dessous. Au microscope, elle révèle un paysage bien ordonné de crêtes et d'écaillés, parsemé de divers poils à intervalles réguliers. Certaines de ces protrusions, nommées sensilles, sont sensibles aux changements de pression ou à des substances chimiques et aident ainsi les insectes à réagir à leur environnement. Le point important est que quasiment chaque sensille est parallèle à ses plus proches voisines, si bien que toutes leurs extrémités ont tendance à pointer dans la même direction. Sur les ailes, les poils sont orientés vers l'extérieur. Sur le corps lui-même, ils pointent à l'opposé de la tête. Comme les parois d'un tube neural en formation, les cellules qui produisent ces poils (chaque poil est issu d'une cellule) semblent distinguer l'avant et l'arrière de l'animal. Elles perçoivent aussi quel côté est plus proche (proximal) ou plus distant (distal) des autres tissus.

Mieux, les cellules partagent ces informations directionnelles avec leurs voisines. C'est ce qu'ont montré Peter Lawrence de l'université de Cambridge, en Angleterre, Michael Locke de l'université de Western

Ontario, au Canada, et d'autres au cours d'une série d'expériences pionnières menées il y a plus de 40 ans. Ces biologistes ont découpé de minuscules carrés de la couche épidermique qui sécrète l'exosquelette chez deux espèces de

punaises – des réduves (genre *Rhodnius*) et des punaises de l'asclépiade (genre *Onco-peltus*). Puis ils ont tourné les carrés de 180 degrés et les ont réimplantés dans l'épiderme de l'abdomen de chaque insecte hôte.

On s'attendait à ce que les sensilles à la surface du greffon pointent dans la direction opposée à celle de leurs congénères alentour. Or, à la mue suivante, lorsque les insectes se sont débarrassés de leur ancien exosquelette et en ont synthétisé

Les mutations de chacun de ces gènes produisaient une série de volutes évoquant les coups de pinceau de Van Gogh