

> terre ferme pendant de courtes périodes avec leurs nageoires. Avec ses nageoires bien plus puissantes, *Elpistostege* était probablement d'autant plus capable de s'aventurer à terre.

Notre découverte non seulement éclaire le moment où la transition nageoires-membres s'est opérée, mais aide aussi à comprendre quels changements génétiques et développementaux l'ont orchestrée. Il y a encore quelques décennies, peu d'indices étaient disponibles. À l'époque, on ne connaissait que quelques poissons fossiles dont l'anatomie pectorale était intermédiaire entre les nageoires et les membres. S'ils suggéraient que les os du bras et de l'avant-bras avaient évolué progressivement, la main et le poignet des tétrapodes semblaient en revanche être apparus d'un coup à partir de la nageoire d'un poisson ancestral. Mais un changement aussi radical s'était-il produit ou cette rupture apparente n'était-elle qu'un artefact dû au manque de fossiles ?

UNE MAIN APPARUE D'UN COUP ?

En 1991, le Britannique Peter Thorogood, qui était un éminent biologiste du développement, a proposé que la main et le poignet aient eu une origine soudaine. Il s'appuyait sur la comparaison du développement embryonnaire des poissons osseux et des tétrapodes. Dans ces deux groupes, une structure de l'embryon au stade précoce – la crête ectodermique apicale – agit comme un centre de signalisation qui guide le développement de la nageoire ou du membre. Située à l'extrémité de la nageoire ou du membre bourgeonnant, cette crête sécrète des substances qui favorisent localement la croissance des tissus.

Chez les poissons, elle n'est active qu'un court instant avant de se transformer en un autre centre de signalisation, le pli ectodermique apical, qui dirige la formation des rayons des nageoires. Chez les tétrapodes, en revanche, la crête est active beaucoup plus longtemps, car elle ne se transforme pas en pli. Il n'y a donc pas de formation de rayons de nageoire et la crête a plus de temps pour développer les os à la base de la fabrication d'une main. Pour Thorogood, la perte de la transition crête-pli aurait entraîné à la fois la perte des rayons et d'autres traits des nageoires pectorales, et le gain des os nécessaires à la formation d'un poignet et de doigts.

La découverte de *Tiktaalik*, le premier poisson fossile à présenter l'équivalent non seulement des os de nos bras et de certains os proximaux (proches du centre du corps) de nos poignets, mais aussi des os distaux (éloignés) de nos poignets, a stimulé les recherches. Des biologistes ont voulu déterminer quels os de la nageoire ancestrale du poisson s'étaient transformés en os de poignet et de main et

quels gènes produisaient cette nouvelle morphologie. Des gènes de la famille *Hox*, connue pour contrôler le développement de la tête, la queue, etc., semblaient de bons candidats.

En 2007, Zerina Johanson, du Muséum d'histoire naturelle de Londres, et ses collègues ont étudié l'activité d'un de ces gènes, *HoxD13*, chez l'un des plus proches parents vivants des tétrapodes, le dipneuste australien. Des recherches antérieures avaient révélé que chez les tétrapodes, *HoxD13* est actif dans les membres en développement lorsque les poignets et les doigts se forment. L'équipe de Zerina Johanson a montré que le gène est aussi actif pendant le développement des os des radiaux de la nageoire du dipneuste.

Toutefois, alors que chez les tétrapodes, *HoxD13* a deux phases d'activité durant le développement des membres – une phase précoce associée au développement du bras et de l'avant-bras et une phase tardive associée à celui du poignet et des doigts –, chez le dipneuste, il semble n'avoir qu'une seule période d'activité lors du développement de la nageoire, correspondant à la deuxième phase des tétrapodes. Ces travaux suggèrent que les os des doigts des tétrapodes ont évolué à partir des radiaux des nageoires de poissons. Cependant, le poignet et la main n'ont pu apparaître d'un coup, comme le proposait Thorogood, car quelques poissons à nageoires charnues actuels et fossiles ont des radiaux et des os du poignet (os carpiens) sans pour autant avoir de doigts. Au moins deux événements ont dû survenir durant la transition, l'un qui a produit des doigts et l'autre des poignets.

Elpistostege complique encore l'histoire. Il suggère que, contrairement à l'argument de Zerina Johanson, les radiaux des dipneustes et autres poissons à nageoires charnues ne sont pas tous équivalents à des doigts : seuls les radiaux les plus distaux sont homologues des os des doigts, tandis que les radiaux proximaux sont homologues des os du poignet et des os longs de la paume (les métacarpes).

De plus, *Elpistostege* révèle une autre étape dans la transition nageoires-membres. Parce qu'il préserve à la fois les os du poignet et les doigts, ainsi que les rayons des nageoires, *Elpistostege* montre que la perte des rayons des nageoires a dû être une autre phase, distincte, de l'évolution de la main.

Nous devons encore affiner notre compréhension des mécanismes génétiques et développementaux à l'œuvre. Néanmoins, par sa préservation et les nombreuses études en cours sur lui, le spécimen entier d'*Elpistostege* semble bien destiné à jouer le rôle de pierre de Rosette pour résoudre l'énigme de l'évolution des membres à partir des nageoires – et donc de la manière dont les vertébrés ont conquis la terre. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Cloutier et al., **Elpistostege and the origin of the vertebrate hand**, *Nature*, vol. 579, pp. 549-554, 2020.

Z. Johanson et al., **Fish fingers : Digit homologues in Sarcopterygian fish fins**, *JEZ-B Molecular and Developmental Evolution*, vol. 308B(6), pp. 757-768, 2007.

J. Clack, **Le premier pied à terre**, *Pour la Science*, n° 340, pp. 30-36, février 2006.

Le ressaut circulaire, une histoire à rebondissements

Un jet liquide d'huile de silicone, 20 fois plus visqueux que l'eau, frappe perpendiculairement une surface horizontale. On observe un ressaut hydraulique circulaire.

L'ESSENTIEL

> Les premières observations du ressaut hydraulique sont anciennes. Pourtant, les modèles qui décrivent ce phénomène ne sont pas encore totalement satisfaisants.

> Des expériences et des travaux théoriques récents continuent d'affiner la compréhension du ressaut hydraulique.

> La modélisation du ressaut présente des analogies avec des systèmes astrophysiques bien plus difficiles à étudier en laboratoire : les supernovæ ou les hypothétiques « trous blancs », inverses des trous noirs.

L'AUTEUR



ALEXIS DUCHESNE
maître de conférences
à l'université de Lille
et à l'Institut d'électronique,
de microélectronique et
de nanotechnologie (IEMN)

Le bourrelet liquide qui se forme dans un évier autour du jet d'eau du robinet est facile à observer. Mais ce phénomène résiste depuis cinq cents ans à une explication complète. Et, de façon surprenante, il sert aussi à comprendre certaines explosions d'étoiles.

Et si, une fois la vaisselle terminée, vous laissez le robinet couler encore un peu ? Ce n'est certes pas très écologique, mais cela vous permettra d'observer un phénomène surprenant. Le jet atteint le fond de l'évier et l'eau s'écoule radialement autour du point d'impact sous la forme d'un mince film. En raison de l'étalement radial et de la friction de l'eau sur la surface de l'évier, on s'attend à ce que le film liquide perde peu à peu sa vitesse. Pour autant, on n'anticipe pas la présence d'une transition brutale, où le film de faible épaisseur et de forte vitesse fait place à un écoulement environ cinq fois plus épais et cinq fois plus lent. Ce changement de régime d'écoulement se traduit par un « mur » d'eau, un bourrelet liquide circulaire. C'est ce qu'on appelle le « ressaut hydraulique circulaire ».

Même s'il nous est familier, un tel ressaut peut surprendre, car il va à l'encontre d'un précepte partagé par les physiciens et les philosophes depuis Aristote jusqu'à Newton et élevé au rang d'axiome par Leibniz : *Natura non facit saltus* (« La nature ne fait pas de saut »). Ce principe, également nommé « principe de continuité », est assez intuitif et, en effet, très souvent valable. Il suppose qu'en général les choses évoluent de façon continue et progressive. Et pourtant, dans l'évier, on observe un ressaut plutôt qu'une pente faible et régulière de la surface liquide.

Pendant longtemps, ce mur d'eau ne semble pas avoir troublé les savants. Il a fallu attendre

Léonard de Vinci, au ^{xv}^e siècle, pour trouver la première description du ressaut. Il notait ainsi dans ses carnets : « L'eau qui tombe en ligne perpendiculaire par un tuyau arrondi sur un lieu plan, tracera une onde circulaire autour de l'endroit percuté ; à l'intérieur de ce cercle, l'eau se mouvra très rapidement et s'étalera en une couche fort mince autour du point frappé, puis finira par heurter la vague qu'elle a produite qui cherche à retourner au lieu de la percussion. »

En termes modernes, de Vinci définit, à juste titre, le ressaut comme une onde de choc. Pour les physiciens, ce phénomène est dû à la compétition entre la vitesse de déplacement du liquide et la célérité des ondes gravitaires. Ces dernières sont des vagues qui se propagent à la surface d'un fluide. C'est la gravité et la hauteur du liquide qui déterminent leur longueur d'onde et leur vitesse de propagation. Elles deviennent visibles sous l'effet d'une excitation externe, comme le vent sur la mer ou lorsqu'on lance un caillou dans une mare.

Dans la zone interne d'un ressaut circulaire (près du jet), les ondes gravitaires se propagent moins vite que le liquide ; elles sont donc emportées par l'écoulement. Dans la zone externe où l'eau est plus profonde et l'écoulement plus lent, les ondes gravitaires vont plus vite que le fluide. Du fait de perturbations ou de réflexions, sur les bords de l'évier par exemple, ces ondes gravitaires sont susceptibles de remonter le courant. Le ressaut hydraulique est alors vu comme l'endroit où l'onde gravitaire (surélévation du liquide) émise depuis les bords (bords de l'évier, fin de >