

**OFFRE
1 AN**

3 FORMULES AU CHOIX

BULLETIN D'ABONNEMENT

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

☒ **OUI, je m'abonne**
pour 1 an à POUR LA **SCIENCE**

Groupe Pour la Science – Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32 000 € – RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

LES AUTEURS



ROLAND LEHOUCQ
chercheur
au Service
d'astrophysique
du CEA à Saclay



J.-SÉBASTIEN STEYER
paléontologue du CNRS
au Muséum national
d'histoire naturelle,
à Paris





Les dragons de chair, d'os et de feu

Source d'inspiration pour les artistes, le dragon est tantôt couvert d'écailles, de poils, doté d'ailes... Il emprunte bon nombre d'attributs à la nature, mais quel genre d'animal est-il ? Et peut-il vraiment voler et cracher du feu ?

Les dragons asiatiques, au corps allongé comme celui des serpents ou ici d'une salamandre, sont souvent associés à l'eau, comme dans cette estampe de l'artiste japonais Utagawa Kuniyoshi (1797-1861).

Hantant depuis des millénaires l'imagination des peuples, les dragons comptent sans doute parmi les plus célèbres monstres de légende. D'ailleurs, il en existe des représentations très variées. Celles-ci ont souvent fait l'objet d'analyses symboliques, mais, depuis la Renaissance, un courant naturaliste s'est aussi efforcé d'appréhender ces monstres comme formant une espèce plausible. Ces animaux mèneraient alors une existence discrète, à l'abri dans certains massifs européens,

africains ou asiatiques. Tels des cryptozoologues, nous vous convions à une enquête naturaliste sur les traces d'un animal insolite, non pas d'un monstre fabuleux mais bien d'une espèce qui fut longtemps considérée comme réelle quoique insaisissable. Plusieurs questions se posent alors : les dragons sont-ils des amphibiens, des reptiles ou autre chose ? Leurs ailes sont-elles aptes au vol ? Et comment pourraient-ils cracher du feu ?

DRAGON, QUI ES-TU ?

Si nous devons effectuer une sorte de classification systématique des dragons du monde, la première distinction serait à faire entre les dragons occidentaux et les dragons orientaux, tels les *ryu* japonais ou *lóng* chinois. Ces derniers sont en effet caractérisés par un corps serpentin et aptère, c'est-à-dire sans ailes, ce qui >

> n'empêche pas ces espèces magiques de voler ! Le dragon oriental représente clairement les forces de la nature – symbolisme shintoïste que l'on retrouve aussi chez le mythique Godzilla, monstre du cinéma japonais dont la première représentation date de 1954. Long de plusieurs mètres, le dragon-serpent asiatique est souvent intimement lié à l'eau. Notons que, dans la réalité, le milieu aquatique n'est pas incompatible avec les reptiles tels que les serpents, puisque ceux-ci nagent très bien en effectuant de grandes ondulations latérales – il existe même des serpents marins, les hydrophinés au corps aplati comme celui des anguilles et qui regroupent aujourd'hui une soixantaine d'espèces réparties dans les eaux chaudes des océans Indien et Pacifique. Concernant la taille « respectable » des dragons-serpents asiatiques, celle-ci nous rappelle que le gigantisme touche aussi les serpents réels, puisque le python réticulé (*Python reticulatus*) d'Asie atteint jusqu'à 7 mètres de long, tandis que *Titanoboa cerrejonensis*, qui évoluait sur Terre il y a 60 millions d'années environ, frôlait les 13 mètres.

Le dragon occidental, quant à lui, a un corps plus court, une longue queue, une paire d'ailes et crache des flammes. Son aspect est cependant plus hétéroclite que celui de son cousin asiatique. Tête de lézard, langue de serpent, pattes de varan, corps écailleux, ailes de chauve-souris ou de ptérosaure, le dragon est alors construit comme une chimère, par simple addition de parties de corps d'espèces différentes.

Si, dans les mythes et légendes, les dragons inspirent de la terreur, ils pouvaient malgré tout

vivre en paix avec les humains qui se conciliaient leurs bonnes grâces en échange d'un tribut. La tradition chrétienne a fait du dragon le symbole du mal, de la Bête de l'Apocalypse, l'incarnation de Satan et du paganisme. Il est aussi un être puissant et omniprésent dans la littérature de fantasy, mais aussi au cinéma, dans les jeux de rôles ou les jeux vidéo : Smaug dans *Le Hobbit*, de J.R.R. Tolkien, ou les dragons de Daenerys Targaryen dans la série *Game of Thrones* (adaptée des romans de G.R.R. Martin) ne sont que quelques exemples.

Anatomiquement et symboliquement parlant, les dragons sont très souvent des reptiles, animaux qui suscitent fréquemment chez nous de l'aversion. Il existe cependant des dragons-amphibiens, comme celui du film d'animation *Dragons* (inspiré du roman pour enfant *How To Train Your Dragon*, de Cressida Cowell), qui présente des traits de salamandre (peau noire, tête triangulaire et plate, membres potelés, etc.). Enfin, notons que dans le roman *L'Histoire sans fin* (Michael Ende, 1979), le dragon porte-bonheur et aptère nommé Fuchur (ou Falkor dans les adaptations cinématographiques) est clairement de type mammifère, puisqu'il arbore dans les films une magnifique fourrure blanche et une sympathique tête de lion ou de chien.

Dans l'univers de Tolkien, les dragons sont des reptiles maléfiques nés au cours du Premier Âge des œuvres de Morgoth, roi des ténèbres. Ils sont parfois appelés vers, car les premiers dragons étaient aptères ; ils se déplaçaient en rampant et « grandissaient lentement, s'ils vivaient longtemps » (*Le Silmarillion*, 1977). Le plus connu du grand public est sans doute Smaug, qui apparaît dans le court roman *Le Hobbit* (1937) et dont la récente adaptation de Peter Jackson (en trois films !) donne une spectaculaire représentation.

Dans la saga *Harry Potter*, le jeune sorcier se retrouve confronté à un magyar à pointes (ou *Hungarian horntail* en anglais), « le plus dangereux des dragons » selon Norbert Dragonneau, jeune naturaliste de l'univers développé par l'auteure J.K. Rowling : la particularité de ce dragon-reptile est d'être hérissé de pointes (sans doute des excroissances d'écailles comme chez le diable cornu, ou *Moloch horridus*, un petit saurien d'Australie) et muni d'un puissant bec de dinosaure cératopsien – dont le représentant le plus connu est le *Triceratops horridus*, gros herbivore du Crétacé. Nous le voyons, entre dragons-reptiles, dragons-amphibiens et dragons-mammifères, la classification phylogénétique de ces reptiles fictifs varie clairement en fonction des auteurs !

UN DRAGON VOLANT ?

Les dragons inspirent la peur, notamment parce qu'ils sont capables de voler : c'est la menace qui surgit du ciel. En zoologie, on



Humain

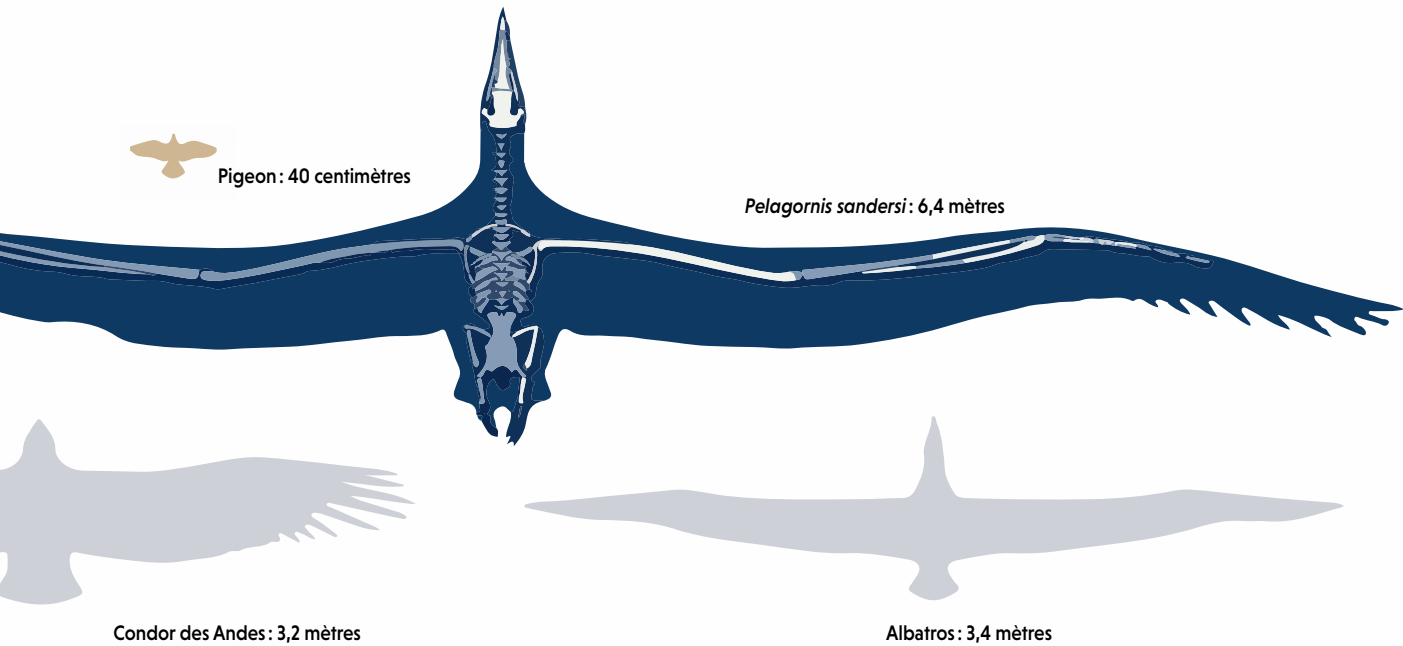


LE WINGSUIT DU LÉZARD

En déployant les membranes souples le long de son corps, *Draco volans*, un lézard asiatique, plane dans les airs.



L'oiseau disparu, *Pelagornis sandersi*, avec une envergure de 6,4 mètres environ dépassait largement en taille l'albatros ou encore le condor géant. Des analyses récentes ont néanmoins montré qu'il était capable de voler à grande vitesse sur plusieurs kilomètres sans battre des ailes. Cet animal démontre qu'un dragon, de cette taille tout du moins, serait capable de voler.



distingue le vol plané du vol battu. Le vol plané est une sorte de chute contrôlée de l'animal, effectuée grâce à diverses structures permettant d'allonger la durée et la distance de vol après un saut (à la façon du vol en *wingsuit* de certains amateurs de sensations fortes). Les nageoires très allongées de l'exocet, un poisson des mers chaudes, les membranes souples le long du corps de *Draco volans* (petit lézard arboricole des forêts asiatiques), ou entre les doigts de la grenouille volante de Wallace (*Rhacophorus nigropalmatus*) et du gecko volant de Kuhl (*Ptychozoon kuhli*), ou encore les extensions de peau entre les pattes des écureuils volants (*Pteromyinae*) et des lémuriens volants (dermoptères) sont autant d'exemples d'évolution qui ont conduit au vol plané chez les vertébrés.

Le vol battu, quant à lui, correspond à un type de locomotion active où certains muscles et éléments du squelette (et pas seulement des extensions de peau ou des baguettes osseuses) participent activement à une locomotion aérienne, dynamique et en trois dimensions. Au cours de l'évolution des vertébrés, seuls trois groupes naturels ou clades ont expérimenté le vol battu : les ptérosaures, les oiseaux et les chauves-souris. Les premiers constituent un clade de reptiles fossiles apparus au Trias, il y a environ 230 millions d'années, et disparus à la fin du Crétacé, il y a 66 millions d'années lors de la grande extinction qui balaya aussi les

dinosaures non-aviens. Premiers vertébrés ayant développé le vol battu, les ptérosaures avaient des ailes formées d'une membrane souple sous-tendue par le quatrième doigt (l'équivalent de votre annulaire) et reliée au corps au niveau des flancs. Par leur aspect membraneux, ces ailes évoquent irrésistiblement celles des dragons.

Les oiseaux sont, quant à eux, des dinosaures à plumes : leurs ailes sont formées par trois doigts (le troisième, c'est-à-dire le majeur, est le plus imposant) et bien sûr par des plumes qui sont, sur le plan morphogénétique, de longues écailles ramifiées. Enfin, les ailes des chauves-souris ou chiroptères (de *cheiro* la main et *pterygion*, la membrane ou l'aile, en grec) correspondent à de fines membranes sous-tendues par les cinq doigts de la main. Elles sont aussi souvent comparées à celles des dragons. Ptérosaures, oiseaux et chauves-souris présentent aussi, par convergence évolutive, un bréchet, excroissance du sternum qui permet l'accroche des puissants muscles pectoraux thoraciques nécessaires au vol battu. Dépourvus de bréchet, certains oiseaux comme les autruches ou les kiwis sont incapables de voler. Est-ce le cas aussi chez les dragons ?

Pour le savoir, il faut comprendre la mécanique du vol. Celui-ci résulte de l'écoulement de l'air autour des ailes. Ce flux engendre une force aérodynamique proportionnelle à la ➤

> masse volumique de l'air ambiant, au carré de la vitesse de l'animal par rapport à cet air et à la surface de ses ailes. La composante verticale de cette force, la portance, permet de voler tandis que sa composante horizontale, la «traînée», s'oppose à la vitesse. Voler à altitude constante impose au volatile de se déplacer assez vite par rapport à l'air pour que la portance compense le poids. Pour un animal volant de taille L , la surface des ailes est proportionnelle au carré de L alors que son poids est proportionnel à son volume, donc au cube de L . Ainsi, la vitesse à laquelle la portance compense le poids est proportionnelle à la racine carrée de la taille de l'animal: plus il est grand, plus il doit voler vite pour se maintenir en l'air.

Mais voler à altitude constante nécessite aussi de fournir une puissance suffisante pour compenser l'effet de la traînée, faute de quoi la vitesse diminuera et le volatile tombera. Les ailes remplissent donc à la fois le rôle de sustentateur et celui de propulseur. Comme la portance, la force de traînée est proportionnelle au carré de la vitesse par rapport à l'air. La puissance à dépenser pour se maintenir en l'air, égale au produit de la traînée par la vitesse relativement à l'air, varie donc comme le cube de cette vitesse.

Comme il est très coûteux en énergie de voler vite, une espèce volante a nécessairement un métabolisme actif. On montre que la puissance à fournir pour compenser la puissance dissipée par la traînée varie comme la masse de l'animal à la puissance $7/6$. La puissance est fournie par les muscles et, selon une loi empirique, varie comme la puissance $3/4$ de sa masse, plus lentement que la puissance à dépenser. Il existe donc une limite supérieure à la masse d'un volatile, fixée par sa capacité à fournir la puissance nécessaire au maintien de sa vitesse de vol. L'outarde, avec ses 20 kilogrammes en moyenne, est l'oiseau volant actuel le plus massif.

Afin d'économiser leur énergie, les grands oiseaux, tels le condor des Andes (3,2 mètres d'envergure pour une masse variant entre 11 et 15 kilogrammes) et l'albatros (3,4 mètres d'envergure pour une masse comprise entre 6 et 12 kilogrammes), préfèrent planer avec leurs grandes ailes alors que les pigeons et les moineaux pratiquent plus volontiers le vol battu. Plus grand, plus lourd, *Pelagornis sandersi* évoluait dans le ciel il y a 25 à 28 millions d'années avec une envergure estimée à plus de 6 mètres pour une masse comprise entre 22 et 40 kilogrammes! En 2014, grâce à des simulations numériques, Daniel Ksepka, conservateur au Bruce Museum, dans le Connecticut, a montré que cet oiseau était capable de planer à grande vitesse sur plusieurs kilomètres sans avoir besoin de battre des ailes.

Cette envergure record pour un oiseau n'a teint cependant pas celle des plus grands

ptérosaures: *Quetzalcoatlus* et *Hatzegopteryx*, avec leurs 10 mètres de large et leurs 100 kilogrammes estimés, restent les plus grands animaux volants connus. Qu'en est-il des dragons? Leurs mensurations démesurées imposent *a priori* des contraintes physiques qui rendent très difficile le vol battu. Mais certaines «trouvailles» de la nature pourraient aider. Ainsi, pour rendre plausibles ces géants ailés, nous pourrions les imaginer, comme les oiseaux ou les ptérosaures,



UN VRAI CRACHEUR DE «FEU»

Le coléoptère bombardier *Stenaptinus insignis* a un mécanisme de défense original et élaboré: il projette sur le prédateur un liquide corrosif à presque 100 °C.

dotés de diverses structures d'allègement: des sacs aériens multiples, des poumons démesurés, des crânes très fenêtrés ou encore des os complètement creux, et ainsi de suite. L'évolution a sélectionné une large gamme de structures possibles permettant de se mouvoir dans les airs!

ALLUMEEEEER LE FEU!

Le trait caractéristique du dragon, celui qui en fait un être à la fois puissant et effrayant, est sa capacité à cracher du feu. Or une réaction de combustion ne peut se produire que si trois éléments sont réunis: un combustible, un comburant et une énergie d'activation en quantités suffisantes. C'est pourquoi les pompiers parlent de «triangle du feu». Si la question du comburant est facilement évacuée (il s'agit généralement du dioxygène, O_2 , contenu dans l'air), examinons quel serait le combustible et d'où viendrait l'énergie déclenchant la combustion.

Dans les feux courants, le combustible est un solide (charbon, bois, papier, carton, tissu,

PVC, etc.), un liquide (essence, gazole, fioul, huile, etc.) ou un gaz (gaz naturel, butane, propane, méthane, dihydrogène, etc.). Avec les contraintes que représente le vol pour un dragon, utiliser un gaz moins dense que l'air et inflammable, comme le dihydrogène (H_2), semble être une solution idéale. Le dihydrogène remplissait d'ailleurs les fameux zeppelins, ces dirigeables rigides qui connurent leur âge d'or dans les années 1930. Le spectaculaire embrasement du *Hindenburg*, le 6 mai 1937, sonna le glas de ce mode de déplacement aérien.

Le méthane pourrait aussi être un bon choix, car les bactéries méthanogènes sont omniprésentes dans la biosphère (marécages, mangroves, sous-sol sibérien) et on les trouve aussi chez les termites et dans le tube digestif des vaches. Avec un microbiote adapté, le dragon serait capable de produire du méthane durant sa digestion avant de le stocker dans une poche dédiée. Le problème est qu'à pression et température ambiantes, un gaz occupe un volume considérable, environ 1000 fois supérieur à celui d'un liquide de même masse ! C'est pourquoi le gaz naturel, qui contient essentiellement du méthane, est liquéfié à très basse température (environ $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ à la pression atmosphérique) pour être transporté dans des bateaux spécialisés, les méthaniers. Dans les véhicules fonctionnant au gaz naturel, il est stocké dans des réservoirs spécifiques à une pression 200 fois supérieure à la pression atmosphérique.

Mais l'utilisation d'un gaz pour créer son souffle pose un autre problème au dragon : peu dense, le jet serait difficile à diriger et se disperserait rapidement dans l'air ambiant. Le dragon émettrait une boule enflammée plutôt qu'un jet de feu.

La solution serait peut-être de s'inspirer des cracheurs de feu humains. Pour réaliser leur performance, ces artistes prennent en bouche un peu de liquide inflammable (pétrole désaromatisé ou paraffine liquide) et le pulvérisent en minuscules gouttelettes en direction d'une torche. La spectaculaire flamme qui en résulte donne l'impression de sortir directement de la bouche du cracheur. Cela évoque aussi le lance-flammes, une arme portative conçue pour projeter un liquide enflammé. Il existe également des lance-flammes destinés aux spectacles pyrotechniques qui émettent des flammes contrôlées à l'aide d'un brûleur. Bref, notre dragon pourrait disposer d'un organe spécialisé produisant un biocarburant liquide, stocké dans une poche dédiée et projetable à volonté sur ses ennemis.

Reste la question de la source d'énergie déclenchant la combustion. Dans les situations réelles, cette source est généralement de la chaleur (échauffement par frottement pour

une allumette ou par passage d'un courant électrique), une étincelle (allume-gaz, pierre à briquet) ou une flamme. Plusieurs solutions sont imaginables. Le dragon serait capable, par exemple, de créer des étincelles en crissant des « dents » spécialisées. Si son combustible est gazeux, il pourrait aussi utiliser un catalyseur comme la mousse de platine (néanmoins pas

Les plus grands animaux volants connus sont des ptérosaures de 10 mètres d'envergure

facile à produire par un processus biologique!). À température ambiante, la mousse de platine fixe sur sa grande surface massique (qui peut atteindre des dizaines de mètres carrés par gramme!) de l'ordre de 100 fois sa masse de dihydrogène et jusqu'à 20 fois sa masse de dioxygène. Cette accumulation déclenche spontanément la réaction exothermique de combustion du dihydrogène.

Dans le cas des liquides, on trouve même des réactions autocatalytiques : il suffit de mélanger combustible et comburant pour que le mélange s'enflamme spontanément. Ce type de combustion est employé dans la propulsion spatiale car il dispense du dispositif d'allumage et permet de concevoir des propulseurs déclenchés ou arrêtés par simple ouverture ou fermeture de l'alimentation de la chambre de combustion. Malheureusement, ils font souvent appel à des comburants toxiques tels que l'hydrazine. Mauvais pour notre dragon.

La solution est peut-être à trouver chez les insectes. À partir des années 1980, Thomas Eisner, de l'université Cornell, a étudié les coléoptères bombardiers (appartenant au grand groupe des carabes). Ces insectes projettent par l'anus sur leurs prédateurs un liquide très chaud ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) résultant du mélange exothermique d'hydroquinone (composé organique aromatique apparenté au phénol) et de peroxyde d'hydrogène (appelé eau oxygénée en solution aqueuse). Sans être aussi spectaculaire qu'une flamme de feu, le jet de ces insectes est tout aussi dissuasif. Mais alors, que resterait-il de la magie du dragon ? ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Meurger, Histoire naturelle des dragons : un animal problématique sous l'œil de la science, Terre de Brume, 2006.

L. Grasset, Les dragons pourraient-ils cracher du feu ?, sur la chaîne YouTube DirtyBiology, http://bit.ly/PLS488_Dragons1

V. Amouroux, Le Musée des Dragons, documentaire-fiction sur une histoire naturelle des dragons, 2005, http://bit.ly/PLS488_Dragons2 http://bit.ly/PLS488_Dragons3

E. Buffetaut, Des fossiles et des hommes, Robert Laffont, 1991.

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université, à Paris

COMMENT LE TÉTRA A PERDU LA VUE

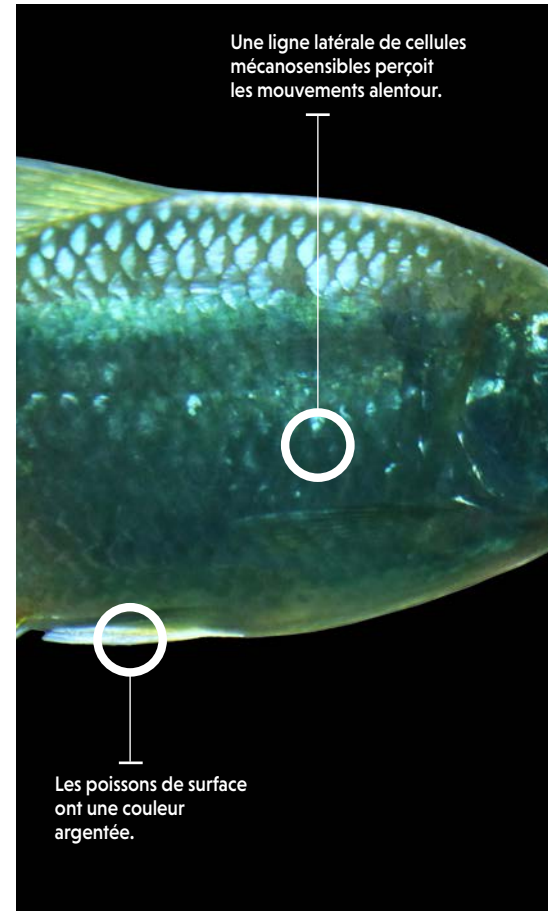
Contrairement à son frère de surface, le tétra mexicain des cavernes n'a plus d'yeux, alors que ces poissons appartiennent à la même espèce. Pourtant, son embryon commence bien à fabriquer ses yeux. Que deviennent les cellules produites ?

Dans la Sierra del Abra, au centre du Mexique, un petit poisson solitaire, rose pâle et sans yeux, explore sans relâche, méthodiquement, les fonds de Pachón, l'une des grottes souterraines de la vallée karstique. Cette version cavernicole du tétra mexicain (*Astyanax mexicanus*), un poisson d'eau douce rencontré du sud du Texas à la Patagonie, se nourrit en effet préférentiellement de fientes de chauves-souris... quand il en trouve. Son frère de surface, pourtant, nage en bancs dans la colonne d'eau des rivières et absorbe diverses proies, souvent des petits crustacés, qu'il capture en pleine eau.

La différence entre le tétra mexicain de surface et celui devenu cavernicole ne s'arrête pas là. De nombreux traits liés aux originalités de son nouveau milieu ont été décelés : les poissons cavernicoles ont non

seulement perdu leurs yeux et leur pigmentation, mais ils ont acquis des mâchoires plus puissantes et pourvues de plus de dents, ainsi qu'un plus grand nombre de bourgeons du goût et de neuromastes – des cellules ciliées formant une ligne mécanosensorielle le long du corps (la ligne latérale). Par ailleurs, leur métabolisme de base est très réduit, tandis que leur charge en graisse est plus élevée, ce qui leur confère une étonnante résistance à la famine – très utile dans leur habitat pauvre en nourriture. Enfin, leur temps de sommeil est très réduit, ce qui augmente celui consacré à la recherche alimentaire.

Ces singularités anatomiques et comportementales ont très vite intéressé les biologistes de l'évolution : en comparant les deux morphes du tétra, ils comprendraient peut-être les bases moléculaires de l'évolution du poisson cavernicole et parviendraient, qui sait, à retracer le récit de cette évolution. De fait, l'histoire qu'ils



Une ligne latérale de cellules mécanosensibles perçoit les mouvements alentour.

Les poissons de surface ont une couleur argentée.