

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

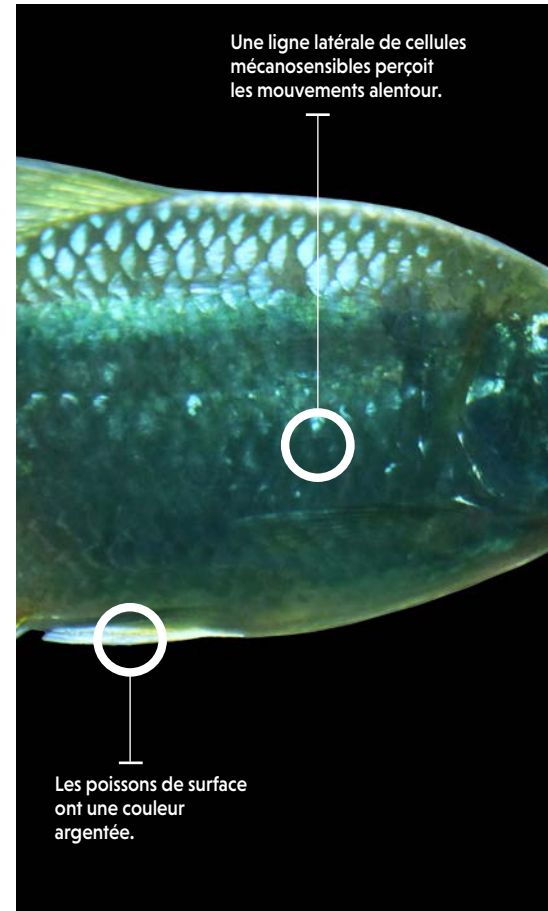
Contrairement à son frère de surface, le tétra mexicain des cavernes n'a plus d'yeux, alors que ces poissons appartiennent à la même espèce. Pourtant, son embryon commence bien à fabriquer ses yeux. Que deviennent les cellules produites ?

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.

EN CHIFFRES

30 000

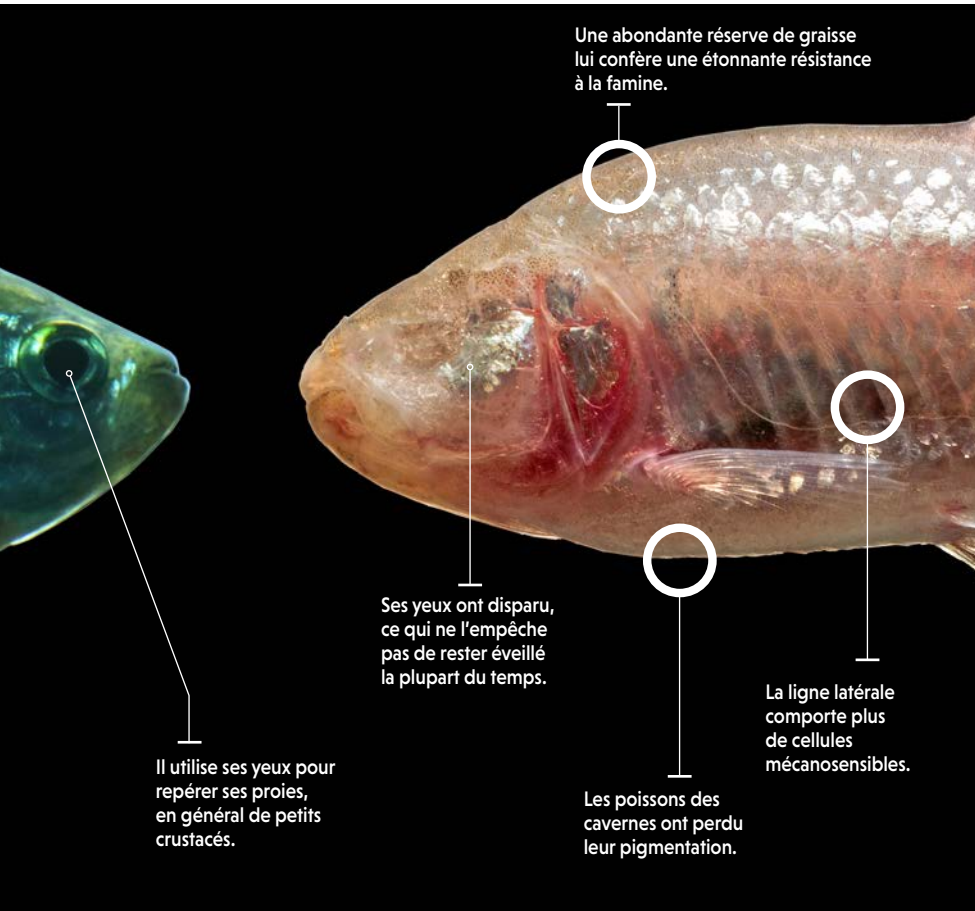
Les tétras mexicains auraient colonisé des grottes il y a environ 30 000 ans. Ils se seraient donc adaptés à leur nouvel habitat en très peu de temps, à l'échelle de l'évolution.

27 neurones

Le tétra mexicain cavernicole âgé de 24 heures compte 27 neurones à hypocretine, contre 17 chez le poisson de surface. Chez l'humain adulte, cette population de l'hypothalamus est elle aussi petite : 10 000 à 20 000 neurones sur les quelque 100 milliards que compte le cerveau.

100

Les neurones à neuropeptide Y sont à peine plus nombreux que ceux à hypocretine : 100 chez le poisson cavernicole âgé de 84 heures, soit deux fois plus que chez le poisson de surface.



commencent à dessiner est plus que surprenante.

UNE DESTRUCTION PROGRAMMÉE

C'est en enquêtant sur la disparition de l'œil du tétra cavernicole que l'équipe de Sylvie Rétaux, à l'institut des neurosciences Paris-Saclay, à Gif-sur-Yvette, a peu à peu reconstitué tout un pan de cette histoire. Tout d'abord, en 2011, l'équipe a mis en évidence le mécanisme par lequel l'œil du tétra cavernicole a régressé. Intuitivement, on s'attendrait à ce qu'il ne se construise pas lors de l'embryogenèse. Pourtant, l'organe se développe normalement chez l'embryon précoce, à

l'exception du quadrant ventral de la rétine, réduit ou absent. Puis, tout à coup, chez l'embryon âgé de un jour, le cristallin se détruit par une apoptose (mort cellulaire) qui déclenche la dégénérescence complète et progressive de l'œil.

Pour en chercher l'explication, les biologistes ont comparé les expressions de certains gènes majeurs de développement chez les embryons des deux morphes. Ils ont ainsi montré que, d'une part, le gène *Shh* s'exprime un peu plus vers l'avant de l'embryon chez le morphe cavernicole. D'autre part, le gène *Fgf8*, qui interagit avec la protéine *Shh*, s'exprime deux heures plus tôt chez les embryons de poissons cavernicoles.

Ce sont ces légers décalages spatio-temporels qui entraînent la réduction de la taille de la rétine, avec la disparition du quadrant ventral. De plus, c'est le changement du territoire d'expression de *Shh* qui déclenche l'apoptose du cristallin. Enfin, en modulant l'expression de ces deux gènes, les chercheurs ont réussi à restaurer la taille de la rétine chez les poissons cavernicoles. Les cellules étaient donc bien quelque part, mais où ? En fait, comme l'ont aussi montré Sylvie Rétaux et ses collègues, le décalage spatiotemporel des gènes de développement déplace les cellules du quadrant ventral de la rétine vers une région du cerveau, l'hypothalamus, laquelle devient donc plus importante chez le poisson cavernicole. ➤



Tétra mexicain
(*Astyanax mexicanus*)
Taille maximale : 12 cm

> Cette redistribution des cellules éclaire d'un jour nouveau le développement d'un système visuel chez un animal aveugle à l'âge adulte. Ce n'est pas une question de tout ou rien, mais de cohérence générale du développement du système nerveux central. L'œil et le cerveau ne se développent pas indépendamment l'un de l'autre. L'ensemble neuronal doit se construire précocement pour que l'animal ait un système nerveux fonctionnel. Ce n'est que devenu autonome, toute structuration embryologique terminée, que l'œil peut être résorbé sans dommage collatéral. Ainsi s'explique le paradoxe d'un animal aveugle qui présente toujours le programme de fabrication de l'œil.

DE LA RÉTINE À L'HYPOTHALAMUS

Que deviennent les cellules intégrées à l'hypothalamus? Cette question est primordiale, car l'hypothalamus est un centre nerveux qui, en intégrant les signaux centraux et périphériques, se comporte comme une plaque tournante. Il libère des messagers chimiques contrôlant des comportements tels que l'activité locomotrice, les cycles sommeil-éveil, la prise de nourriture... c'est-à-dire les comportements originaux des poissons cavernicoles. Chez la souris, ces comportements sont sous le contrôle de populations adjacentes de neurones de l'hypothalamus, qui sécrètent différents neuropeptides. Tout récemment, l'équipe de Sylvie Rétaux est donc partie en quête de telles populations chez les deux morphes de tétra. Les résultats les plus impressionnants concernent les neurones à hypocretine et à neuropeptide Y.

L'hypocretine est un neurotransmetteur produit par une population très restreinte de neurones de l'hypothalamus. Elle stimule l'appétit et l'état d'éveil. Le neuropeptide Y, quant à lui, stimule la prise de nourriture et, par conséquent, favorise l'adiposité. Or les neurones à hypocretine et à neuropeptide Y se sont révélés plus nombreux chez les poissons cavernicoles – lesquels mangent plus, dorment moins et sont plus gras que les poissons de surface. Ainsi, les anciennes cellules rétiniennes sont devenues des neurones sécréteurs de l'hypothalamus, lesquels ont favorisé des changements de comportement – comme si la disparition des yeux du tétra n'avait été qu'un dommage collatéral de la réorientation des cellules de la rétine vers l'hypothalamus.

Par ailleurs, les tétras ont dû acquiescer assez rapidement ces modifications.

DIABÉTIQUES, MAIS EN BONNE SANTÉ

Les tétras mexicains cavernicoles sont diabétiques. Leur glycémie est près du double de celle des poissons de surface et ils présentent une forte résistance à l'insuline : l'hormone se fixe moins sur son récepteur à cause d'une mutation ponctuelle sur ce dernier. C'est ce qu'ont montré Misty Riddle, de l'université Harvard, et ses collègues, en 2018. Or une telle mutation est bien connue en génétique humaine, car elle est à l'origine du syndrome de Rabson-Mendenhall, une forme très sévère de diabète. Chez l'humain, une telle déficience entraîne des désordres importants, tels que des difformités de la face et des anomalies de la peau. De plus, l'hyperglycémie entraîne une fixation de sucres sur les protéines, avec pour conséquence un vieillissement accéléré des tissus. Le tétra cavernicole, lui, semble très bien s'accommoder de cette mutation. Son espérance de vie est identique à celle des poissons de surface, et la mutation lui conférerait même des réserves de graisse plus abondantes. Explorer les mécanismes compensateurs qui ont gommé ses effets délétères aidera probablement à comprendre toutes les facettes de la maladie humaine.

POISSON DES CAVERNES



POISSON DE SURFACE



C'est ce que suggère une autre étude récente menée par Didier Casane, de l'université Paris-Saclay, et Sylvie Rétaux. Modélisations élaborées à l'appui, les biologistes plaident pour une colonisation des cavernes il y a 30 000 ans environ, au Pléistocène. Soit bien plus récente que les migrations vieilles de 8 et 3 millions d'années que suggérait en 2012 Joshua Gross, de l'université de Cincinnati, à partir d'informations géologiques et climatiques sur la formation des grottes karstiques, et de données génétiques partielles.

Or cette période de 30 000 ans est bien trop courte pour soutenir l'explication classique de l'évolution: des mutations ne peuvent survenir et être sélectionnées en un temps si bref. Plusieurs variants génétiques de tétras mexicains devaient donc préexister dans les eaux de surface, dont certains ont été sélectionnés dans les cavernes. Ainsi, des changements anatomiques, physiologiques et comportementaux majeurs peuvent être obtenus très rapidement, en quelques dizaines de milliers d'années... ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Alié et al., **Developmental evolution of the forebrain in cavefish, from natural variations in neuropeptides to behavior**, *eLife*, vol. 7, article e32808, 2018.

J. Furney et al., **Evidence for late Pleistocene origin of *Astyanax mexicanus* cavefish**, *BMC Evol. Biol.*, vol. 18, article 43, 2018.

M. Riddle et al., **Insulin resistance in cavefish as an adaptation to a nutrient-limited environment**, *Nature*, vol. 555, pp. 647-651, 2018.

J. B. Gross, **The complex origin of *Astyanax* cavefish**, *BMC Evol. Biol.*, vol. 12, article 105, 2012.



À l'écoute de nos amis les animaux

Michel Kreutzer
L'ÉTHOLOGIE



Que
sais-je?



Suivez-nous
sur les réseaux sociaux



quesaisje.com