

sous un certain angle ou ne mangent qu'un type particulier d'algues.

Pourtant, malgré la grande variété des cichlidés d'Afrique de l'Est, certains caractères hautement spécialisés sont apparus un nombre surprenant de fois au cours de l'évolution.

Par exemple, plusieurs espèces de cichlidés des trois lacs se nourrissent presque exclusivement des écailles d'autres poissons. Ils ont tous développé les mêmes dents en forme de râtelier qui leur permettent de s'accrocher aux écailles de leurs victimes. Mais leurs dents ne sont pas la seule adaptation à ce régime alimentaire. Leurs mâchoires sont devenues asymétriques, s'ouvrant vers la gauche ou vers la droite, mais pas des deux côtés, afin de mieux saisir les écailles d'un côté particulier de leurs proies. Ainsi, les cichlidés « orientés à gauche » grattent les écailles du côté droit de leur victime, et ceux « orientés à droite » grattent le côté gauche.

La sélection naturelle a gardé un équilibre dans ces formes asymétriques : environ la moitié des mangeurs d'écailles que nous avons prélevés dans la région du lac Tanganyika étaient orientés vers la droite, l'autre moitié vers la gauche. Les mangeurs d'écailles ont donc un ensemble très particulier d'adaptations à leur mode de vie, mais, d'une manière ou d'une autre, ces mêmes caractères se sont développés au moins à trois reprises dans ces lacs d'Afrique de l'Est.

Une autre adaptation distinctive qui s'est produite indépendamment à plusieurs reprises est la présence de lèvres hypertrophiées chez certaines espèces recherchant leurs proies dans les crevasses rocheuses. Nous avons montré que ces lèvres « à la Angelina Jolie » jouent le rôle de joints d'étanchéité qui aident les poissons à aspirer leurs proies hors de leur cachette. Les cichlidés dépourvus de telles lèvres ne parviennent pas à atteindre efficacement les proies dissimulées dans les anfractuosités. Et une fois encore, des espèces dans les trois radiations africaines, ainsi que dans deux radiations du Nouveau Monde, ont développé ce caractère en parallèle.

De même, des patrons de coloration distinctifs sont apparus indépendamment dans diverses lignées de cichlidés. Alors que la vaste majorité des poissons de cette famille présentent des rayures verticales sombres, qui leur servent vraisemblablement à se camoufler des prédateurs, quelques-unes des espèces de chacun des

trois lacs d'Afrique orientale ont également développé des rayures horizontales. Ces motifs très différents se manifestent le plus souvent chez les espèces en eau libre, qui sont généralement des nageurs rapides et des prédateurs, sans doute parce que les rayures horizontales aident à les dissimuler aux yeux de leurs proies.

Parer au risque de la spécialisation

Apparemment contradictoires, la diversification extrême et l'apparition répétée d'adaptations très spécialisées soulèvent des questions importantes. La première concerne le mode d'alimentation très spécialisé et l'observation selon laquelle, normalement, l'adaptation à une alimentation très particulière signifie que, si la source de nourriture vient à manquer, l'animal spécialisé est en danger.

Comment les cichlidés sont-ils parvenus à éviter cet écueil ? Grâce semble-t-il à une étrange caractéristique anatomique, unique parmi les poissons d'eau douce. Ils ont une paire normale de mâchoires buccales et une paire secondaire de mâchoires située dans la gorge, comme le monstre du film *Alien*. Toute la nourriture qu'ils ingèrent est happée et broyée par les mâchoires

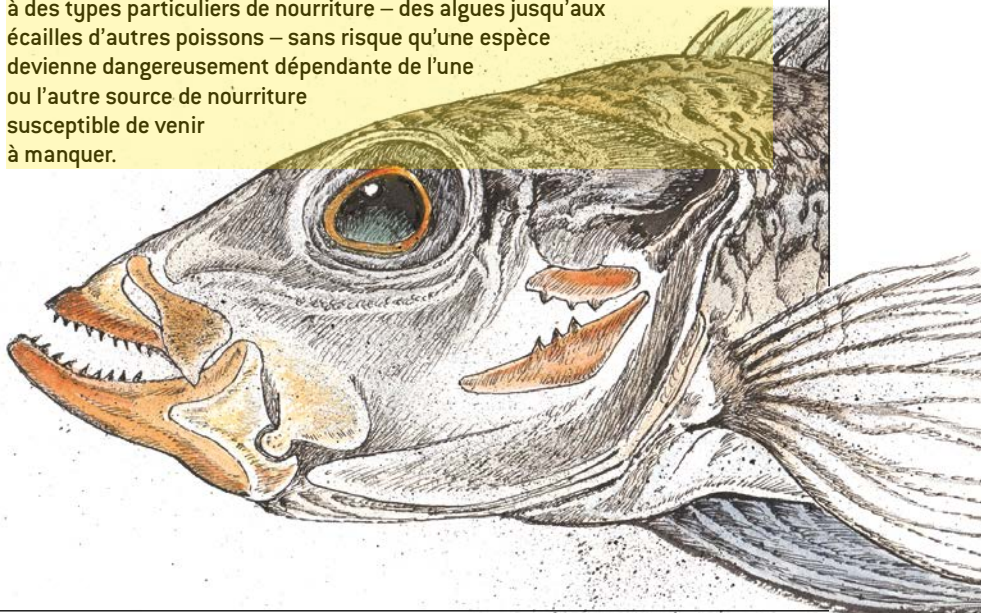
■ L'AUTEUR



Axel MEYER est professeur de zoologie et de biologie évolutive à l'université de Constance, en Allemagne. Il a été l'un des premiers scientifiques à utiliser des séquences d'ADN pour étudier les différences entre les espèces et la spéciation.

L'UN DES SECRETS DU SUCCÈS : DES MÂCHOIRES DE RÉSERVE

Tous les cichlidés présentent les mâchoires buccales habituelles, mais ils ont aussi une seconde paire de mâchoires, situées dans la gorge. La nourriture ingérée est mastiquée par les deux séries de mâchoires. Cette duplication laisse les mâchoires buccales libres de développer des adaptations à des types particuliers de nourriture – des algues jusqu'aux écailles d'autres poissons – sans risque qu'une espèce devienne dangereusement dépendante de l'une ou l'autre source de nourriture susceptible de venir à manquer.

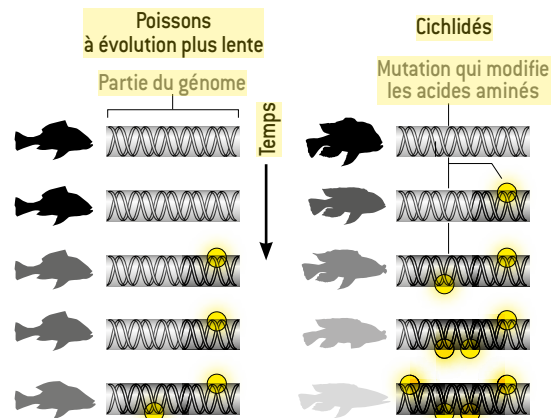


DES INDICES FOURNIS PAR LE GÉNOME

Le séquençage et l'analyse récents des génomes de cichlidés africains ont révélé plusieurs mécanismes qui ont pu aider la famille des Cichlidés à se diversifier rapidement. Certains de ces mécanismes contribueraient aussi à expliquer un autre aspect mystérieux de ce groupe de poissons : le degré extrême d'évolution parallèle, où les mêmes caractères très spécialisés se manifestent indépendamment dans différentes lignées.

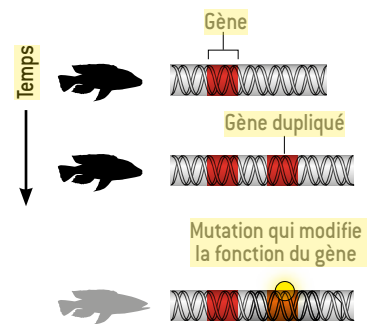
MUTATIONS NOMBREUSES

Un nombre inhabituellement important de mutations, qui ont modifié des acides aminés composant les protéines des cichlidés, suggère que les gènes impliqués ont été soumis à une pression de sélection intense, de telle sorte qu'ils ont évolué rapidement.



DUPLICATION DE GÈNES

Les génomes de cichlidés présentent un taux élevé de duplication génique, où des erreurs dans la réplication de l'ADN produisent de multiples copies de gènes. Les copies supplémentaires peuvent changer de fonction sans dommage pour l'animal et donc l'aider à s'adapter à son environnement.



© Jen Christiansen

buccales puis par les mâchoires pharyngées. Par conséquent, les cichlidés peuvent avoir des mâchoires buccales adaptées à un type de nourriture, et leurs dents pharyngées viennent à bout du reste. De cette façon, de nombreux cichlidés sont devenus à la fois des touche-à-tout et des spécialistes. En d'autres termes, ils ont développé une spécialisation mais sont restés en même temps des généralistes, au cas où s'épuiserait leur type de nourriture préféré ou se présenterait une meilleure occasion.

Les mâchoires pharyngées expliquent comment les cichlidés ont pu limiter le risque d'une spécialisation, mais quelle a été la source de toute la nouveauté évolutive chez ces poissons ? Quels facteurs ont poussé les gènes qui codent leurs caractères à changer aussi rapidement, et comment les mêmes adaptations apparaissent-elles si souvent dans des lignées séparées ?

Récemment, grâce à l'avènement de méthodes rapides de séquençage de l'ADN pour la recherche médicale, mes collègues et moi (un consortium de plus de 70 chercheurs du monde entier) avons commencé à répondre à ces questions et à résoudre le mystère des cichlidés.

En 2014, pour la première fois, nous avons séquencé des génomes de cichlidés. Nous avons obtenu les séquences complètes de l'ADN de cinq espèces africaines et les séquences partielles de 60 individus

de 6 espèces fortement apparentées rien que dans le lac Victoria. En comparant ces génomes entre eux et à ceux de parents des cichlidés, les épinoches (une famille de poissons bien moins diversifiée), nous avons identifié chez les cichlidés des caractéristiques qui aident à comprendre leur diversité.

Des génomes de cichlidés à l'étude

Dans ces génomes, le Cichlid Genome Consortium a recherché en priorité des mutations ayant produit des modifications dans les acides aminés qui composent les protéines. Les protéines réalisent une grande partie des tâches dans les cellules. Or de multiples gènes spécifient les séquences d'acides aminés dont les protéines sont formées. Si un organisme contient de nombreuses protéines aux acides aminés altérés, c'est qu'une forte pression sélective s'exerce sur les gènes correspondants et a provoqué leur évolution rapide. En d'autres termes, les conditions étaient telles que les poissons présentant certaines modifications d'acides aminés ont obtenu un avantage important en termes de survie ou de reproduction.

Nous avons découvert que même les espèces de tilapia (un cichlidé peu remarquable du point de vue de l'évolution par

rapport à ses homologues) présentent bien plus de mutations que les épinoches. Et les cichlidés des groupes hyperdiversifiés du lac Malawi et du lac Victoria ont des mutations plusieurs fois plus fréquentes que le tilapia.

Beaucoup des gènes modifiés sont impliqués dans le développement des mâchoires, ce qui paraît logique quand on observe la grande variété d'adaptations alimentaires des cichlidés. Une pression de sélection intense agissant sur de nombreux gènes est donc l'un des mécanismes qui ont accéléré la spéciation des cichlidés.

Toutefois, les gènes individuels peuvent eux aussi se révéler très influents. Nous avons la preuve qu'un gène unique détermine l'orientation des rayures des cichlidés. Des gènes qui, à eux seuls, influencent fortement l'apparence d'un organisme expliqueraient pourquoi il existe autant de types de cichlidés.

Nous étions également impatients de rechercher dans les génomes de cichlidés des copies multiples de gènes individuels. Les scientifiques savent depuis des décennies que le génome contient parfois plusieurs exemplaires d'un gène. Cette duplication – qui découle d'erreurs dans la réplication de l'ADN – est l'un des mécanismes les plus importants qui permettent à la fonction des gènes de se diversifier rapidement. Fondamentalement, si un gène est dupliqué,