

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 504 (oct. 19)
réf. PL504



N° 503 (sept. 19)
réf. PL503



N° 502 (août 19)
réf. PL502



N° 501 (juillet 19)
réf. PL501



N° 500 (juin 19)
réf. PL500



N° 499 (mai. 19)
réf. PL499



N° 498 (avr. 19)
réf. PL498



N° 497 (mar. 19)
réf. PL497



N° 496 (févr. 19)
réf. PL496



N° 495 (jan. 19)
réf. PL495



N° 494 (déc. 18)
réf. PL494



N° 493 (nov. 18)
réf. PL493

À retourner accompagné de votre règlement à :

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



OUI, je commande des numéros de Pour la Science,
au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres
correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ 01 x 9,90 € = 9,90 €
2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/07/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR



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

LE DÉCLIC ÉVOLUTIF DES CICHLIDÉS DU LAC VICTORIA

Le lac Victoria a été le siège d'une extraordinaire diversification de poissons cichlidés riches en couleurs. Plus de 500 espèces y sont apparues en moins de 15000 ans. Si l'analyse génomique a permis de cerner les clés de cette évolution, on vient d'en comprendre la dynamique.

Les grands lacs africains abritent une diversité stupéfiante de poissons cichlidés, une famille proche des labres très connue des aquariophiles par ses riches colorations: 250 espèces dans le lac Tanganyika, 800 dans le lac Malawi, 700 dans le lac Victoria et ses satellites, les lacs Édouard, Albert et Kivu. Dans le lac Victoria, notamment, plus de 500 espèces sont apparues en moins de 15000 ans. Les biologistes appellent cela des bouquets d'espèces. Quelles caractéristiques ont rendu possible cette diversification? Et quel en a été le déroulement? Depuis longtemps, nombre de chercheurs tentent de répondre à ces questions. Mais ce n'est que tout récemment qu'une équipe a résolu l'énigme – pour le lac Victoria.

Les milliers d'espèces de cichlidés africains diffèrent principalement par quelques traits. D'un point de vue écologique, elles ont des places différentes dans

la colonne d'eau et des modes variés de nutrition: détritivores, herbivores, carnivores... Corrélativement, leurs mâchoires sont elles aussi très variées: taille, nombre et forme des dents... Enfin, les mâles sont très colorés, avec des variations incroyables des gammes de couleur, ce qui a dû jouer un rôle clé dans la spéciation. Ces tenues de parade demandent par ailleurs une vue élaborée. Évidemment, toutes ces caractéristiques dépendent de l'environnement: la profondeur maximale du lac Tanganyika est de 1433 mètres, tandis que le lac Victoria atteint péniblement 82 mètres! Les colonnes d'eau des deux lacs ne sont donc pas comparables. Bref, si les études morphologiques ont révélé quels traits s'étaient diversifiés, elles n'ont fourni aucun indice sur ce qui avait pu permettre cette diversification.

Mais en 2014 un consortium international a publié une étude génomique comparative de cinq espèces de cichlidés africains: le tilapia du Nil, une lignée qui



*Thoracochromis
pharyngalis*
Longueur maximale:
10,5 cm



Hervé Le Guyader
a récemment publié:
**L'Aventure de
la biodiversité,**
(Belin, 2018).

EN CHIFFRES

242

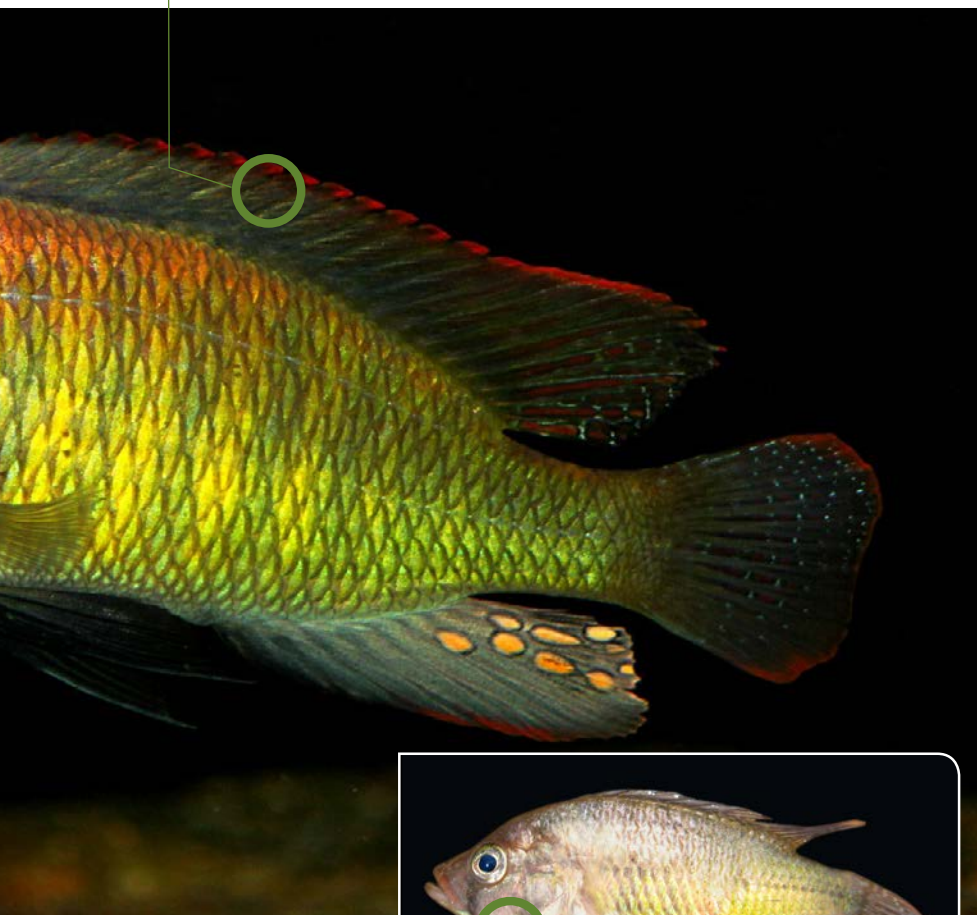
La lignée de poissons cichlidés qui a conduit au bouquet d'espèces du lac Victoria compte pas moins de 242 gènes présents en plusieurs exemplaires.

156

Pour déterminer pourquoi les cichlidés du lac Victoria se sont autant diversifiés, l'équipe d'Ole Seehausen, de l'université de Berne, a comparé les génomes de 156 poissons de la région.

18 %

Avec ses 68 100 km² de superficie et sa profondeur maximale de 82 mètres, le lac Victoria est l'un des plus grands lacs africains. Il est cependant 7 fois moins volumineux que son voisin le lac Tanganyika qui, avec une superficie de 32 900 km² et une profondeur maximale de 1 433 mètres, représente à lui seul 18 % des eaux douces du monde.



Cette nouvelle espèce du genre *Astatotilapia* vit au Congo.



Astatotilapia yaekama n. sp.

s'est peu diversifiée, comme point de repère, et quatre espèces issues des grands lacs. Les résultats sont en cohérence avec les études morphologiques. Ainsi, trois gènes de développement (*bmp4*, *bmp1b* et *nog2*), connus pour jouer un rôle sur la forme des mâchoires, présentent une évolution accélérée chez les cichlidés des grands lacs, avec un taux élevé de mutations ponctuelles. De même, trois autres gènes, eux aussi avec un taux élevé de mutations ponctuelles, ont certainement joué un rôle majeur dans la diversification des cichlidés: l'un d'eux (*ednrb1*) affecte le

patron de coloration, tandis que les deux autres (*kfn-g* et *rho*) codent des opsines – des protéines essentielles pour la vision.

Mais ce qui a frappé le plus les génomiciens est le nombre de duplications de gènes – plus de 200 –, six fois supérieur au taux moyen attendu. De plus, la proportion de transposons (éléments mobiles du génome) était élevée: 16 à 19 % de l'ensemble des quatre génomes de cichlidés des grands lacs. Les chercheurs ont ainsi relevé trois vagues de nouvelles insertions de transposons dans chacun de ces génomes, corrélées avec une augmentation de l'expression des gènes modifiés dans tous les tissus des poissons. Enfin, le bouquet d'espèces du lac Victoria s'est révélé le plus récent.

UNE ÉVOLUTION RAPIDE

En d'autres termes, les génomes des cichlidés des grands lacs portent les traces d'une évolution rapide, avec une sélection importante de quelques gènes clés et plusieurs mobilisations rapides de transposons. On entrevoit donc les rouages qui ont permis l'étonnante diversification de ces poissons. Mais quel en a été le déclencheur? C'est à cette question qu'a répondu l'équipe d'Ole Seehausen, de l'université de Berne, en 2017, en se focalisant sur les poissons du lac Victoria. Pour cela, elle a séquencé des génomes supplémentaires ➤

> (ou des portions susceptibles de présenter des mutations) en privilégiant les cichlidés du lac Victoria et de ses satellites, mais aussi ceux des bassins de drainage adjacents, c'est-à-dire du Nil supérieur, au nord, et du Congo, à l'ouest. Complété par des animaux venant du bassin versant est et des autres grands lacs, l'échantillonnage comptait 156 spécimens.

Cette très belle étude met en évidence un point capital, passé inaperçu : les cichlidés du lac Victoria sont le résultat d'une hybridation entre une lignée provenant du bassin du Nil et une autre, du bassin du Congo, et cette hybridation a joué le rôle de déclencheur pour l'évolution du bouquet d'espèces du lac Victoria.

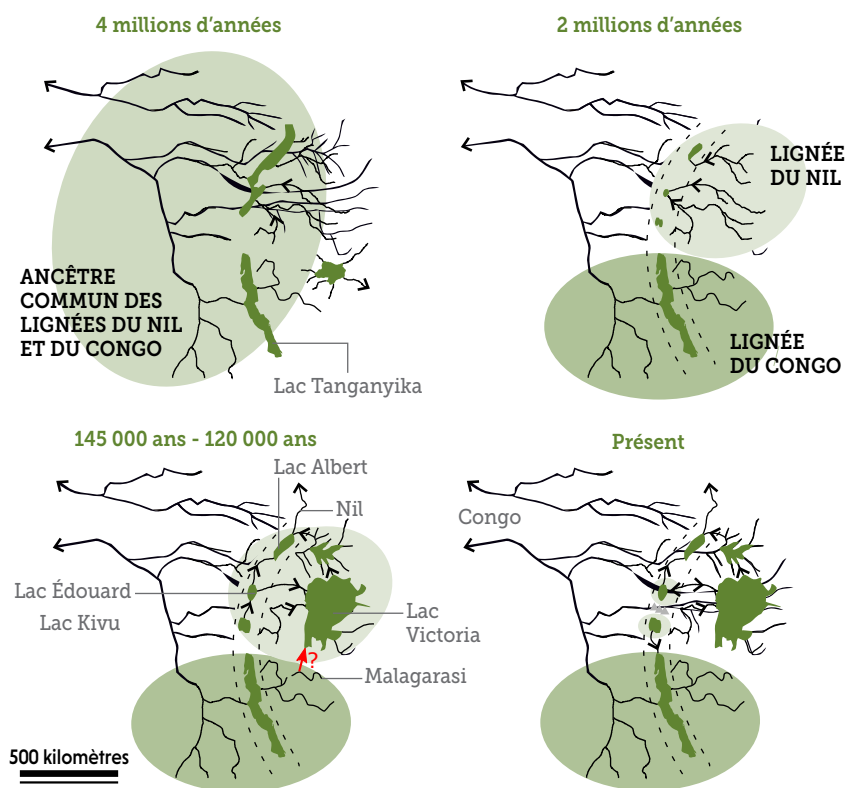
UN ESSAIM D'HYBRIDATION

Cette hybridation explique une curiosité qui avait été incidemment citée dans la première analyse des génomes : les gènes prétendument dupliqués se ressemblent... un peu trop. Or quand un gène est dupliqué, une copie au moins évolue vite, allant même jusqu'à adopter un nouveau rôle. Avec l'hybridation, plus de problème : les différentes copies correspondent à une diversité ancestrale provenant d'une des lignées hybridées. Ainsi, il s'agit non pas de nouvelles copies soumises au jeu habituel de mutations et de sélections, mais de la mise en commun de gènes existants et donc déjà passés par ce crible. Tout peut donc aller très vite et fournir à l'animal hybride des gènes déjà testés chez un ancêtre.

De telles hybridations surviennent dans ce que les évolutionnistes appellent un essaim. Ce ne sont pas quelques individus qui sont entrés en contact, mais des populations entières provenant des deux lignées – Nil et Congo. Leur rencontre a produit un énorme brassage d'une diversité génétique déjà existante, laquelle s'est recombinaisonnée et a conduit à un bouquet d'espèces. L'étude des gènes des opsines des cichlidés victoriens en fournit une illustration étonnante. Ces protéines permettent la vision des couleurs : plus on en a, mieux on distingue les teintes. Or on s'aperçoit que ces poissons ont acquis toutes les possibilités de vision dans la colonne d'eau, de la surface aux profondeurs. De plus, la vision des couleurs a un rôle crucial lors des parades nuptiales, pour la reconnaissance des partenaires. Elle a ainsi certainement joué un rôle essentiel dans la spéciation. Enfin, l'hybridation a autorisé la mobilisation de transposons, entraînant un bouleversement génétique qui a surtout touché la régulation de l'expression des

QUAND LE LAC VICTORIA S'EST REMPLI

Il y a 4 millions d'années, le lac Victoria n'existait pas et toute la région appartenait au système de drainage du Congo. Puis, il y a 2 millions d'années, les mouvements géologiques du rift africain ont isolé la région du lac Victoria. Il y a environ 400 000 ans, de nouveaux mouvements géologiques ont modifié le sens d'écoulement de deux anciens affluents du Congo, qui ont alors rempli le lac, lequel s'est déversé vers le Nil. Enfin, il y a environ 140 000 ans, une période très humide a probablement reconnecté la région au système de drainage du Congo via la capture d'un affluent, le Malagarasi, et remis en contact les cichlidés des deux bassins.



gènes. On comprend pourquoi cette diversification a été si rapide et si importante.

Comment les poissons du Congo et du Nil se sont-ils rencontrés ? La géologie fournit une réponse (voir l'encadré ci-dessus). Il y a quatre millions d'années, le lac Victoria n'existait pas et toute la région drainait l'actuel Congo. Puis des mouvements géologiques ont isolé la région du lac Victoria, lequel s'est rempli et déversé vers le Nil. Mais plus tard, la capture, par cette région, d'un affluent du système de drainage congolais, le Malagarasi, a connecté à nouveau les deux bassins. Ainsi, les cichlidés des bassins du Nil et du Congo ont évolué indépendamment pendant des dizaines de milliers d'années avant d'être soudainement mis en contact. Curieusement, malgré cet isolement géographique, les animaux ont pu s'hybrider. C'est cet accident géologique fortuit qui a donné naissance à l'essaim d'hybridation, à la source de l'extraordinaire bouquet d'espèces du lac Victoria. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. A. Marques et al., **A combinatorial view on speciation and adaptive radiation**, *TREE*, vol. 34(6), pp. 531-544, 2019.

J. Meier et al., **Ancient hybridization fuels rapid cichlid fish adaptive radiations**, *Nat. Commun.*, vol. 8, article 14363, 2017.

D. Brawand et al., **The genomic substrate for adaptive radiation in African cichlid fish**, *Nature*, vol. 513, pp. 375-381, 2014.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE NOËL

1 AN

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pouirlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
Votre cadeau : le livre <i>Une histoire de flou</i> de Pierre Léna (74651805)	✓	✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59€ Au lieu de 102,80€	79€ Au lieu de 134,40€	99€ Au lieu de 194,40€

43 %
de réduction *

41 %
de réduction *

49 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

PAG19NOE



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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ **FORMULE PAPIER**
• 12 n° du magazine papier
+ UN CADEAU **59€**
Au lieu de 102,80€ D1A59EK7

☐ **FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE**
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
+ UN CADEAU **79€**
Au lieu de 134,40€ P1A79EK7

☐ **FORMULE INTÉGRALE**
• 12 n° du magazine
(papier et numérique)
• 4 Hors-série
(papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne
+ UN CADEAU **99€**
Au lieu de 194,40€ 11A99EK9

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal [] [] [] [] [] [] Ville :

Téléphone [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

Date d'expiration [] [] [] [] Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) [] [] []

Signature obligatoire :

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/05/2020 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.fr>. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,90 € et le livre *Une histoire de flou* pour 20,00 €.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pouirlascience.fr.

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 58.14 Z