

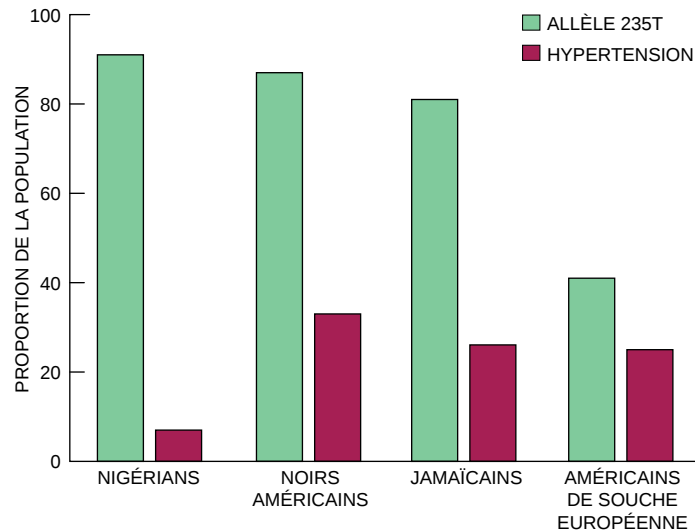
différences interindividuelles de la pression artérielle. Enfin, ce gène ne favorisera l'hypertension qu'en présence des facteurs environnementaux nécessaires à son expression.

Nos études corroborent que l'allèle 235T est deux fois plus fréquent parmi les Noirs américains que chez les Blancs, mais les Noirs qui ont cet allèle ne sont pas plus hypertendus que les Noirs qui en sont dépourvus. Chez les Nigériens de notre étude, les porteurs de l'allèle 235T ont une concentration sanguine en angiotensinogène un peu supérieure à la moyenne, mais le risque d'hypertension n'est pas augmenté. De plus, 90 pour cent des Africains étudiés ont l'allèle 235T, mais la fréquence de l'hypertension dans cette communauté est extrêmement faible, comme nous l'avons déjà mentionné (la fréquence de l'allèle 174M est la même dans tous les groupes).

Ainsi, une concentration élevée en angiotensinogène ne semble pas suffisante pour déclencher une hypertension chez les personnes d'origine africaine ; d'autres facteurs génétiques, physiologiques ou environnementaux seraient également nécessaires. Ou encore, cet allèle n'a-t-il pas la même importance pour le développement de l'hypertension dans tous les groupes ethniques ?

Des éléments de l'énigme

Bien que nos résultats confirment que le patrimoine génétique et l'environnement interagissent pour modifier la physiologie, par exemple pour favoriser une hypertension, les généralisations ne doivent pas être trop hâtives. Il est clair qu'un unique allèle, pas plus qu'un unique facteur environnemental, n'explique l'origine ni la fréquence de l'hypertension chez les Noirs américains. Une personne qui a un ensemble d'allèles de prédisposition risque d'avoir une pression artérielle élevée, mais, comme l'a montré notre étude sur la diaspora africaine, l'hypertension n'apparaît que dans certaines conditions. Plusieurs équipes continuent à rechercher les gènes de l'hypertension et les facteurs environnementaux qui



3. LA PRÉSENCE DE L'ALLÈLE 235T, une version particulière d'un gène, est associée à l'hypertension dans certains groupes ethniques. En revanche, les Nigériens sont rarement hypertendus, mais l'allèle 235T y est très fréquent. On sait aujourd'hui qu'un seul gène ne peut déclencher une hypertension.

favorisent la maladie, et à déterminer comment ils interagissent pour déclencher une élévation chronique de la pression sanguine.

Aujourd'hui, l'hypertension est responsable de sept pour cent des décès dans le monde, et son incidence augmentera avec l'industrialisation. Les mécanismes d'évolution étant très lents, la science devra trouver des moyens de lutter contre les effets néfastes de l'environnement moderne. L'hygiène a progressé quand la médecine a découvert les mécanismes de la contagion. La compréhension des maladies cardiaques a progressé quand les biologistes ont mis en évidence l'importance des habitudes alimentaires sur le métabolisme du cholestérol. La prévention et le traitement de l'hypertension exigeront que l'on comprenne comment les gènes et l'environnement interagissent pour perturber la régulation de la pression artérielle.

Richard COOPER et Charles ROTIMI travaillent à l'École de médecine Stritch, à Chicago. Ryk WARD dirige l'Institut d'anthropologie biologique de l'Université d'Oxford.

Ryk WARD, *Familial Aggregation and Genetic Epidemiology of Blood Pressure*, in *Hypertension : Pathophysiology, Diagnosis and Management*, sous la direction de J.H. Laragh et B.M. Brenner, Raven Press, 1990.

Philip D. CURTIN, *The Slavery Hypothesis for Hypertension among African Americans : The Historical Evidence*, in *American Journal of Public Health*, vol. 82, n° 12, pp. 1681-1686, décembre 1992.

Nous pensons aussi que, pour mieux comprendre l'hypertension chez les Noirs américains, la communauté scientifique doit s'interroger sur le sens de nos divisions ethniques et raciales. Il n'y a pas de fondement biologique au concept de race, qui reflète des distinctions sociales plutôt que des distinctions scientifiques bien définies. Il y a longtemps que les anthropologistes ont abandonné l'idée de subdiviser *Homo sapiens* en races ou en sous-espèces. Pourtant, certains médecins et épidémiologistes continuent à attribuer une signification biologique

aux désignations raciales, prétendant que le concept les aide à distinguer les différents groupes et à expliquer la fréquence de certaines maladies. Toutefois, les classifications raciales ne sont pas fondées sur des critères scientifiques rigoureux.

Tandis que les chercheurs débattent de la signification scientifique des races, leur sens social ne doit pas être oublié. Nous vivons dans un monde où les désignations raciales ont une signification regrettable. Les effets destructeurs du racisme compliquent toute étude de l'impact d'une maladie, telle l'hypertension, dans les minorités. À mesure que nous continuerons à étudier les interactions complexes entre les facteurs de risque extérieurs, tels le stress et l'obésité, et les gènes de régulation de la pression artérielle, nous obtiendrons des informations riches d'enseignements, quelle que soit notre couleur de peau.

X. JEUNEMAITRE, F. SOUBRIER, Y.V. KOTILEVTSOV, R.P. LIFTON, C.S. WILLIAMS, A. CHARU et al., *Molecular Basis of Human Hypertension : Role of Angiotensinogen*, in *Cell*, vol. 71, n° 1, pp. 169-180, octobre 1992.

Richard S. COOPER et Charles N. ROTIMI, *Hypertension in Populations of West African Origin : Is There a Genetic Predisposition ?*, in *Journal of Hypertension*, vol. 12, n° 3, pp. 215-227, mars 1994.

Richard S. COOPER et al., *Hypertension Prevalence in Seven Populations of African Origin*, in *American Journal of Public Health*, vol. 87, n° 2, pp. 160-168, février 1997.

La naissance des espèces

MELANIE STIASSNY • AXEL MEYER

L'extraordinaire diversité des poissons du groupe des cichlidés éclaire les mécanismes d'apparition de nouvelles espèces.



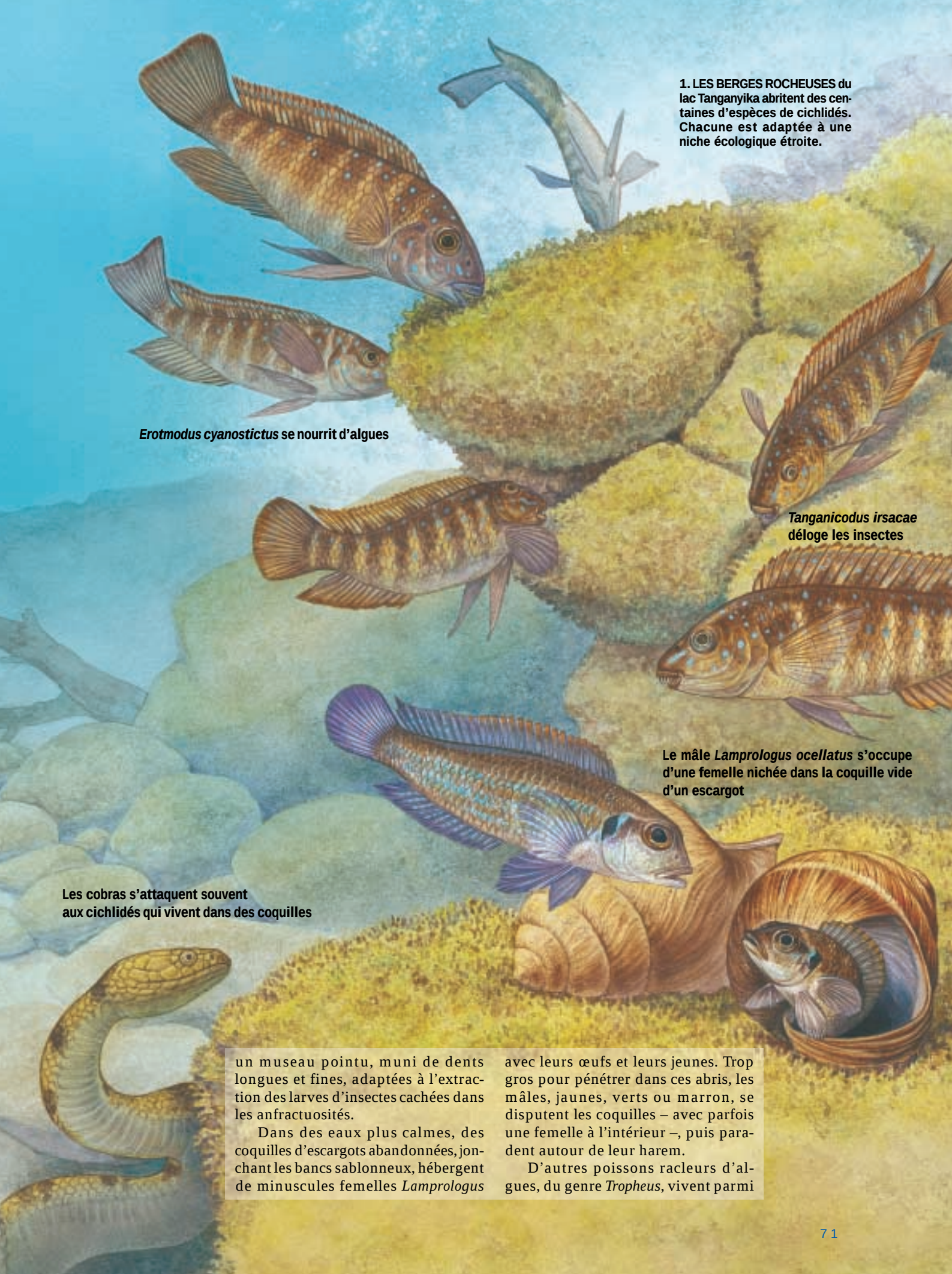
La femelle *Haplotaxodon tricoti* s'occupe de ses jeunes



Les différents *Tropheus duboisi* colorés vivent dans des amas rocheux distincts

Cla Tanzanie et la Zambie, le lac Tanganyika s'étend sur plus de 700 kilomètres, du Nord au Sud, et sur environ 32 000 kilomètres carrés. Les berges les plus ensoleillées abritent la plupart des espèces de cichlidés, tels que les poissons marrons ou verts,

couverts de taches bleues, du genre *Eretmodus*. Les eaux agitées ramènent en permanence ces poissons au dos arrondi vers les rochers couverts d'algues, qu'ils coupent et raclent grâce à leurs dents tranchantes. Des *Tanganicodus* insectivores, au dos également arrondi, ont une tête plus allongée et



1. LES BERGES ROCHEUSES du lac Tanganyika abritent des centaines d'espèces de cichlidés. Chacune est adaptée à une niche écologique étroite.

Erotmodus cyanostictus se nourrit d'algues

Tanganicodus irsacae déloge les insectes

Le mâle *Lamprologus ocellatus* s'occupe d'une femelle nichée dans la coquille vide d'un escargot

Les cobras s'attaquent souvent aux cichlidés qui vivent dans des coquilles

un museau pointu, muni de dents longues et fines, adaptées à l'extraction des larves d'insectes cachées dans les anfractuosités.

Dans des eaux plus calmes, des coquilles d'escargots abandonnées, jonchant les bancs sablonneux, hébergent de minuscules femelles *Lamprologus*

avec leurs œufs et leurs jeunes. Trop gros pour pénétrer dans ces abris, les mâles, jaunes, verts ou marron, se disputent les coquilles – avec parfois une femelle à l'intérieur –, puis parquent autour de leur harem.

D'autres poissons racleurs d'algues, du genre *Tropheus*, vivent parmi

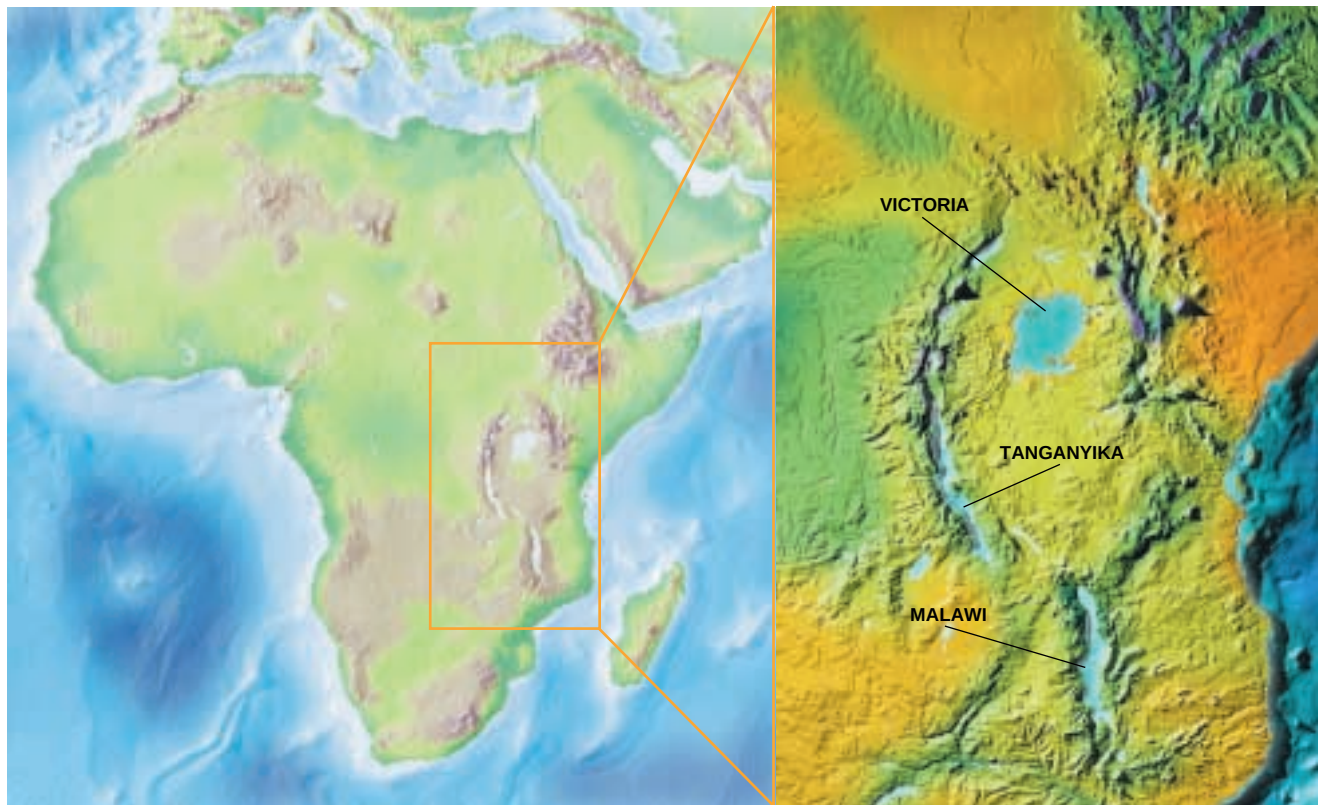
les abris rocheux. Parfois, des bancs de sable de quelques centaines de mètres de large séparent les blocs de rochers ; la traversée est trop risquée pour ces petits poissons, de sorte que les amas rocheux dispersés sont aux *Tropheus* ce que les îles Galápagos sont aux pinsons de Charles Darwin : des régions isolées, propices aux évolutions divergentes. Dans une zone rocheuse, on rencontre ainsi des *Tropheus* noirs avec des bandes verticales jaunes et, dans une autre, des poissons identiques, mais avec des bandes blanches et bleues. Au total, une centaine de ces différentes formes colorées a été recensée. Néanmoins, elles sont toutes étroitement apparentées.

Tous de la même famille

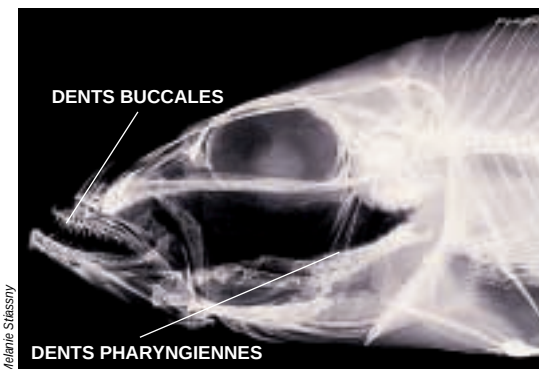
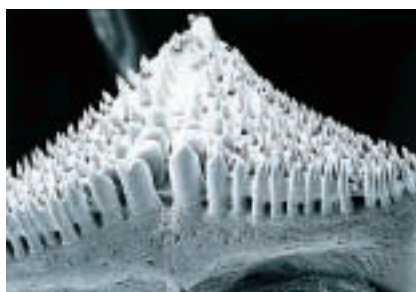
Les cichlidés sont des poissons d'eau douce aux nageoires rayonnées, c'est-à-dire munies de segments rigides parallèles. Leurs couleurs, leurs formes et leurs comportements sont variés. Ils sont indigènes des rivières et des lacs chauds d'Afrique, de Madagascar, du Sud de l'Inde, du Sri Lanka, d'Amérique du Sud, d'Amérique centrale ; une seule espèce (le cichlidé du Texas) vit en Amérique du Nord. Ces régions, à l'exception de la dernière, appartiennent au Gondwana, l'ancien continent austral qui s'est fragmenté il y a 180 millions d'années. La répartition géographique de cette famille indique probablement son origine ancienne.

L'une d'entre nous (M. Stiassny) a identifié 15 espèces de cichlidés, à Madagascar, et trois espèces, dans le Sud de l'Inde, qui sont sans doute les survivants des plus anciennes lignées. Ils ont évolué indépendamment des populations d'Afrique. Environ 300 espèces vivent en Amérique du Sud et en Amérique centrale. Toutefois, la plus importante diversité s'observe en Afrique et, notamment, dans les grands lacs d'Afrique de l'Est : Victoria, Malawi et Tanganyika (voir la figure 2).

Le lac Victoria est une cuvette grande comme l'Irlande, qui contient plus de 400 espèces de cichlidés ; sa formation date d'environ 500 000 ans. Les lacs Malawi et Tanganyika sont



2. LES LACS TANGANYIKA, MALAWI ET VICTORIA, en Afrique de l'Est, sont ceux dont les espèces de cichlidés sont le plus variées. Toutefois, les cichlidés sont également présents dans les eaux chaudes de la plus grande partie du Globe.



3. LES DENTS DE *CICHLASOMA CITRINELLUM* prennent la forme de pointes aiguës (a) ou de plaques broyeuses (b). La radiographie (c) montre les deux séries de dents des cichlidés.

étroits et très profonds, car ils remplissent le fossé d'effondrement entre les plaques tectoniques d'Afrique de l'Est et d'Afrique centrale. Le lac Malawi, formé il y a environ quatre millions d'années, compte 300 à 500 espèces de cichlidés, tandis que le lac Tanganyika, âgé de 12 millions d'années, en comprend près de 200. Malgré l'ancienneté de la famille des cichlidés et de leurs lacs d'origine, la diversité de ces poissons n'est apparue que ces derniers millions d'années.

L'anatomie des cichlidés est l'un des nombreux facteurs qui expliquent leur diversité. Ils ont deux séries de dents, l'une dans la bouche (dents buccales), pour râper ou mordre la nourriture, et l'autre dans le pharynx (dents pharyngiennes), pour écraser, émincer ou transpercer le morceau avant de l'ingérer (voir la figure 3). Les cichlidés sont les seuls poissons d'eau douce à posséder cette seconde série de dents, qui a évolué à partir des arcs branchiaux (les os qui soutiennent les branchies).

Ces deux séries de dents sont extrêmement variables et adaptables : l'un d'entre nous (A. Meyer) a montré qu'elles changent de forme au cours de la vie des animaux. Par exemple, de pointues et perforantes, les dents deviennent broyeuses et plates. Comme la morphologie des cichlidés varie selon leur régime alimentaire, chaque espèce est adaptée à sa niche écologique. Ainsi, des centaines d'espèces coexistent sans être en compétition ; avec des ressources identiques, la plupart d'entre elles auraient disparu.

Les cichlidés mangeurs d'écailles illustrent l'une de ces spécialisations alimentaires. Le lac Tanganyika abrite sept de ces espèces, mais ces poissons du genre *Perissodus* sont présents dans les trois grands lacs d'Afrique de l'Est. Ils approchent d'autres cichlidés par l'arrière et râpent quelques écailles de leurs flancs. Michio Hori, de l'Université de Kyoto, a découvert deux formes différentes chez les *Perissodus microlepis* mangeurs d'écailles : certains ont la tête et les mâchoires courbées vers la gauche, d'autres vers la droite. Ces poissons se nourrissent uniquement d'écailles d'un seul côté de leurs proies : les poissons «gauchers» attaquent le flanc droit de leurs victimes, et les «droitiers» le flanc gauche. Cette asymétrie morphologique favorise probablement l'arrachage d'écailles. Ces dernières, riches en protéines, sont

empilées par les dents pharyngiennes avant d'être ingérées.

Les victimes survivent et se méfient des attaques de chaque côté. Lorsque les mangeurs d'écailles «gauchers» sont plus nombreux que les «droitiers», les victimes protègent davantage leur flanc droit : les «droitiers» sont alors avantagés, et leur population augmente. L'équilibre entre les populations de «droitiers» et de «gauchers» est ainsi maintenu.

Le mode de reproduction est un autre facteur de diversification. On rencontre des cas de monogamie, de polygamie et de polyandrie. Les cichlidés consacrent plus de temps et d'énergie à leurs jeunes que toute autre espèce de poisson. Ils s'occupent de leur progéniture longtemps après l'éclosion, et cette longue association entre parents et enfants nécessite une communication élaborée. Alors qu'un seul parent suffit à surveiller les œufs fécondés, les deux

parents sont requis dès que la progéniture devient mobile. Cette attention soutenue est cause des comportements reproductifs.

De nombreux cichlidés gardent dans la bouche les œufs fécondés ou les jeunes : ils offrent un abri sûr où les jeunes se réfugient en cas de danger. En outre, les parents, en broutant les algues ou en ingérant d'autres nourritures pour leur propre compte, nourrissent les jeunes à l'intérieur de leur bouche. Tel le coucou, de nombreuses espèces de cichlidés glissent leurs œufs fécondés ou leurs jeunes parmi la progéniture d'autres parents cichlidés et se débarrassent ainsi des contraintes de la surveillance.

Les poissons incubateurs buccaux pondent peu d'œufs, parfois moins de dix, et ils investissent beaucoup de temps et d'énergie par portée. De plus, la population totale d'une espèce est souvent réduite à quelques centaines



4. CHEZ OPHTALMOTILAPIA VENTRALIS, la femelle libère un ovule et le prend dans sa bouche pour le protéger (à gauche). Au même endroit, le mâle libère du sperme qui ressemble à l'ovule (à droite, la tache jaune à l'extrémité de la nageoire ventrale). La femelle tente aussi de le ramasser. Elle avale ainsi le sperme qui féconde les œufs conservés dans sa bouche.



5. L'INCUBATION BUCCALE est une stratégie efficace pour la survie des jeunes. Cette femelle *Nimbochromis livingstonii*, du lac Malawi, récupère ses jeunes quand un danger menace.

de poissons vivant dans une même zone. Une mutation à l'origine de la différenciation d'une espèce se propage plus rapidement dans une petite population que dans une grande. Par conséquent, la taille limitée des populations, favorisée par l'incubation buccale, a pu contribuer à la diversification rapide des cichlidés.

Dans les lacs d'Afrique de l'Est, les mâles des espèces à incubation buccale ne s'occupent pas des jeunes. Cependant, ils rivalisent pour fertiliser le plus d'œufs possible. Par exemple, ils forment parfois des rassemblements où ils paraded pour attirer les femelles. Un rassemblement compte 20 à 50 mâles, mais, chez certaines espèces, on a observé des groupes de plus de 50 000 individus. D'autres mâles, tels les *Ophthalmotilapia*, vivement colorés,

construisent un nid élaboré au-dessus duquel ils s'exhibent à la vue des femelles. Des poissons pesant environ 300 grammes déplacent jusqu'à près de 10 kilogrammes de sable et de graviers pour construire un nid. Lorsqu'une femelle a pondu quelques œufs dans un nid, souvent le plus grand, le mâle les féconde rapidement ; la femelle prend alors les œufs dans sa bouche et continue sa nage, à la recherche d'un autre mâle.

Alors que les femelles cichlidés ont souvent une couleur terne (grise ou marron), les mâles sont vivement colorés. Les diverses nuances sont probablement la conséquence d'une sélection sexuelle plutôt que de la pression pour la survie physique qui semble avoir gouverné la diversification. Des couleurs différentes empêchent la reproduction de

poissons par ailleurs identiques et marquent ainsi des frontières entre des populations distinctes.

Les secrets des gènes

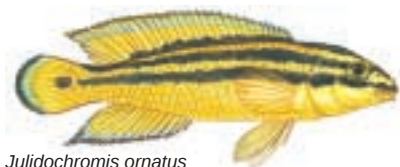
Quels liens de parenté unissent les centaines d'espèces de cichlidés ? Les études de génétique moléculaire ont confirmé de nombreuses hypothèses fondées sur l'anatomie, mais elles ont aussi, souvent, bousculé des idées établies.

L'hypothèse de Mutsumi Nishida, de l'Université de Fukui, a été ainsi confirmée : les lignées primitives de cichlidés d'Afrique de l'Ouest ont tout d'abord colonisé le lac Tanganyika. La diversité génétique des cichlidés de ce lac ancien montre qu'ils dérivent de 11 espèces ancestrales. Certains de ces poissons ont ensuite quitté le lac et envahi le réseau fluvial d'Afrique de l'Est, par lequel ils ont atteint les lacs Victoria et Malawi. L'étude de l'ADN mitochondrial, effectuée par l'équipe de l'un d'entre nous (A. Meyer), a montré que les cichlidés du lac Victoria sont génétiquement plus proches les uns des autres que des cichlidés des deux autres lacs dont la morphologie est pourtant similaire (les mitochondries sont les organites intracellulaires qui assurent la respiration des cellules). Les cichlidés du lac Victoria proviennent presque tous d'une seule lignée à incubation buccale.

Ce scénario indique que des adaptations similaires sont apparues plusieurs fois indépendamment : les trois lacs hébergent des cichlidés qui présentent des caractères anatomiques singuliers, tels ceux nécessaires pour se nourrir d'autres poissons, d'œufs ou de larves, pour couper les nageoires, racler les algues, arracher les écailles, écraser les mollusques... Ce résultat est important, car de nombreux biologistes admettaient que ces caractères exceptionnels étaient peu susceptibles d'apparaître plus d'une fois : les poissons présentant la même spécialisation semblaient apparentés.

Ainsi, on croyait que l'aptitude à racler les algues n'était apparue qu'une seule fois, et que la population de racleurs d'algues s'était dispersée ultérieurement. En fait, les racleurs d'algues des lacs Victoria et Malawi ont évolué indépendamment de ceux du lac Tanganyika, à partir d'un ancêtre qui ne possédait pas cette aptitude. Les mêmes solutions biologiques ont été mises en œuvre plusieurs fois,

ESPÈCES DU LAC TANGANYIKA



Julidochromis ornatus



Tropheus brichardi



Bathybates ferox



Cyphotilapia frontosa



Lobochilotes labiatus

ESPÈCES DU LAC MALAWI



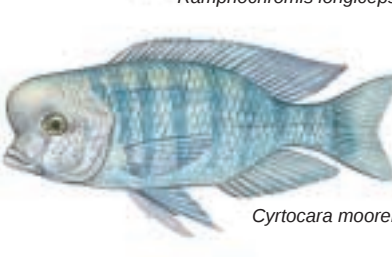
Melanochromis auratus



Pseudotropheus microstoma



Ramphochromis longiceps



Cyrtocara moorei



Placidochromis milomo

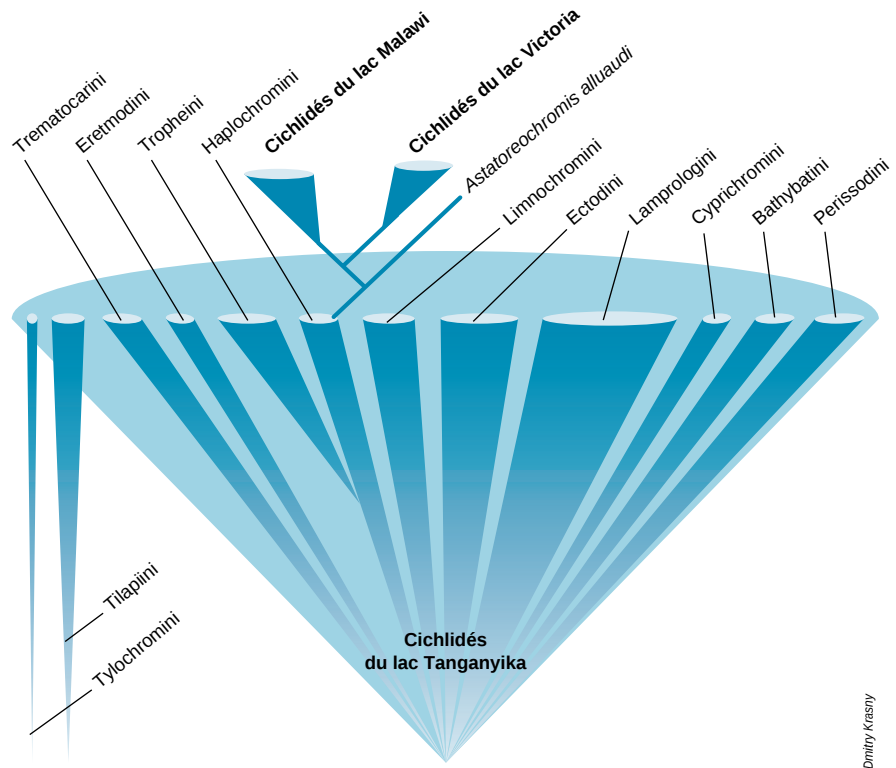
6. DES CICHLIDÉS faiblement apparentés des lacs Tanganyika et Malawi sont devenus semblables en occupant des niches écologiques similaires. Tous les cichlidés du lac Malawi sont plus étroitement apparentés entre eux qu'ils ne le sont aux cichlidés du lac Tanganyika. Les ressemblances morphologiques ne sont parfois que faiblement corrélées à la parenté génétique ou à la lignée évolutive.

quand les contraintes écologiques étaient identiques.

De surcroît, on observe que certaines caractéristiques morphologiques ont évolué à un rythme très irrégulier, et parfois indépendamment des modifications génétiques. Quelques espèces du lac Tanganyika se sont très peu transformées et ressemblent encore beaucoup aux cichlidés fossilisés, en particulier aux tilapias. Par exemple, la morphologie des *Tropheus*, à l'exception des couleurs, n'a presque pas changé. En revanche, les cichlidés du lac Victoria, présentant une grande diversité de tailles, de motifs et de formes, ont évolué en un temps très court. Il y a plus de variations génétiques au sein de la seule espèce *Homo sapiens* qu'il n'y en a entre les 400 espèces de cichlidés du lac. Les analyses génétiques indiquent que les différents cichlidés du lac Victoria sont apparus pendant ces derniers 200 000 ans.

De récentes études paléoclimatologiques restreignent encore l'origine des cichlidés du lac Victoria : le lac semble s'être asséché presque complètement il y a moins de 14 000 ans. Seuls quelques individus ont survécu : les cichlidés de ce lac présentent un taux de spéciation inégalé chez les autres vertébrés. De plus, le lac Nabugabo, séparé au Nord-Ouest du lac Victoria par un banc de sable et âgé au maximum de 4 000 ans, contient cinq espèces de cichlidés endémiques. Ces poissons sont probablement apparentés à ceux du lac Victoria, mais les mâles présentent des livrées nuptiales différentes. Sec il y a seulement 200 ans, le Sud du lac Malawi est cependant habité par de nombreuses espèces et formes colorées que l'on ne rencontre nulle part ailleurs.

Les résultats des récentes analyses d'ADN des poissons provenant du lac Tanganyika corroborent ces exemples et indiquent que les isolements répétés sont à l'origine de la spéciation des cichlidés. Les baisses successives du niveau du lac Tanganyika, qui ont parfois atteint 600 mètres, ont favorisé l'apparition des formes colorées de *Tropheus* et de tous les autres cichlidés vivant dans les rochers. Les populations habituées à échanger des gènes ont alors été isolées dans de petites poches d'eau. Elles ont évolué indépendamment et, lorsque le niveau d'eau est remonté, les populations sont à nouveau entrées en contact, mais elles n'étaient alors plus interfécondes.



7. CET ARBRE PHYLOGÉNIQUE montre que les cichlidés des lacs Malawi et Victoria descendent probablement d'une seule lignée d'incubateurs buccaux (*Haplochromini*) qui s'est échappée du lac Tanganyika. Les cichlidés de ce dernier, le plus ancien, montrent la plus grande diversité génétique. La section des cônes est approximativement proportionnelle au nombre d'espèces par groupe.

Un record plus sombre

La vitesse des extinctions d'espèces dans le lac Victoria est également très importante. Il y a 50 ans, les cichlidés constituaient plus de 99 pour cent de la biomasse ichtyologique du lac. Aujourd'hui, ils représentent moins d'un pour cent. La plupart des espèces sont déjà éteintes, et beaucoup d'autres ont des populations si réduites que leurs chances de se rétablir sont très faibles. Ces extinctions massives sont la conséquence de la destruction de l'habitat, de l'introduction de nouvelles espèces, de la pollution, de la croissance démographique et de la surexploitation.

Par exemple, dans les années 1950, l'introduction de la perche du Nil, afin d'augmenter les rendements de la pêche a divisé, en 30 ans, la population de

cichlidés d'un facteur 10 000. Un grand nombre des cichlidés que les perches chassaient se nourrissaient d'algues. En leur absence, les algues mortes se sont accumulées et se sont décomposées : l'oxygène s'est raréfié dans l'eau, et la plus grande partie du lac est devenue anoxique. De plus, des perches d'environ deux mètres ne sèchent pas de la même manière que les petits cichlidés ; elles doivent être fumées. La déforestation nécessaire au fumage a provoqué l'entraînement du sol dans le lac, par l'eau de pluie, ce qui a augmenté la turbidité et des conditions anoxiques.

Une communauté autrefois prospère est aujourd'hui extrêmement réduite. L'extraordinaire théâtre évolutif des cichlidés du lac Victoria est en passe de se fermer plus vite qu'il ne s'est ouvert.

Melanie STIASSNY dirige le département d'ichtyologie du Muséum américain d'histoire naturelle. Axel MEYER est professeur de biologie à l'Université de Constance.

Michio HORI, *Frequency-Dependent Natural Selection in the Handedness of Scale-Eating Cichlid Fish*, in *Science*, vol. 260, pp. 216-219, 9 avril 1993.

A. MEYER, *Phylogenetic Relationships and Evolutionary Processes in East African*

Cichlid Fishes, in *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 8, n° 8, pp. 279-284, août 1993.

Tijs GOLDSCHMIDT, *Darwin's Dreampond : Drama in Lake Victoria*, traduction de Sherry Marx-Macdonald, MIT Press, 1996.

Melanie L.J. STIASSNY, *An Overview of Freshwater Biodiversity : With Some Lessons from African Fishes*, in *Fisheries*, vol. 21, n° 9, pp. 7-13, septembre 1996.

Les sources de rayonnement X mou

PETER KAHABKA • EDWARD VAN DEN HEUVEL • SAUL RAPPAPORT

Des systèmes d'étoiles doubles où une naine blanche arrache les couches externes de son compagnon sont à l'origine de phénomènes variés, de l'émission intense de rayonnements X de faible énergie à des explosions de supernovae.

Depuis les années 1930, les astronomes savent que la lumière des étoiles est produite par la fusion nucléaire qui se déroule dans leur cœur. Ainsi, au centre du Soleil, 600 millions de tonnes d'hydrogène se transforment chaque seconde en hélium. Cette réaction dégage de l'énergie sous forme de rayonnements X et gamma, qui diffusent vers la surface à travers d'épaisses couches de gaz, où ils sont partiellement transformés en lumière visible.

Récemment, on a découvert une nouvelle catégorie d'étoiles où la fusion nucléaire ne se déroule pas dans le cœur, mais dans les couches externes. Ces étoiles sont des naines blanches (des étoiles denses ayant épuisé leur carburant nucléaire) en orbite autour d'étoiles ordinaires : la naine blanche attire le gaz des couches externes de son compagnon, surtout de l'hydrogène, et, quand l'hydrogène accumulé en surface est suffisamment comprimé, la fusion commence. Il en résulte une émission de rayonnement X «mou», c'est-à-dire de relativement faible énergie. En prenant du poids, ces naines blanches deviennent parfois instables, se contractent en étoiles à neutrons, encore plus denses, ou explosent.

Par ailleurs, on supposait depuis longtemps que les supernovae de type Ia étaient des explosions de naines blanches. Les sources de rayonnement X mou sont les premiers systèmes stellaires dont on sache qu'ils engendrent de telles explosions. Comme la luminosité des

supernovae de type Ia est utilisée comme référence pour la mesure des distances des galaxies lointaines et, donc, de la vitesse de l'expansion cosmique, l'analyse des sources de rayons X mous devrait préciser l'âge et la vitesse d'expansion de l'Univers.

Un satellite pour les mous

L'histoire des sources de rayonnement X mou a commencé avec le lancement du satellite allemand *ROSAT*, en 1990. Cet observatoire en orbite autour de la Terre a dressé la première carte complète du ciel en rayonnement X mou, domaine du spectre électromagnétique compris entre le rayonnement ultraviolet et le rayonnement X «dur», où l'énergie des photons est comprise entre 100 et 2 500 électronvolts. Excepté l'Observatoire *Einstein* de la NASA et un instrument de l'Observatoire européen *EXOSAT*, qui couvraient la gamme d'énergies de 200 à 4 000 électronvolts, tous les satellites précédents équipés de détecteurs X observaient dans une gamme de rayonnement X dur, d'énergie supérieure.

L'équipe de *ROSAT* a rapidement remarqué quelques astres étranges dans le Grand Nuage de Magellan, petite galaxie satellite de la Voie lactée : ces astres émettaient un rayonnement X très intense (leur puissance était 5 000 à 20 000 fois supérieure à celle du Soleil), mais à des énergies anormalement basses. Les sources de rayonnement X brillantes ont, en général, des spectres durs, dont les intensités

maximales sont réparties entre 1 000 et 20 000 électronvolts. Ces rayons X sont produits par des gaz chauffés à des températures de 10 millions à 100 millions de kelvins. Elles correspondent à des systèmes doubles : une étoile à neutrons ou un trou noir arrachent les couches externes de l'autre étoile. Or, les spectres observés des nouvelles étoiles, à des énergies inférieures à celles des autres sources X brillantes, correspondaient à des températures de quelques centaines de milliers de kelvins seulement.

En fait, après les découvertes de *ROSAT*, des recherches dans les archives ont révélé que deux de ces sources de rayonnement X de basse énergie avaient été découvertes dix ans auparavant, à l'aide de l'Observatoire *Einstein*. Ces sources, nommées CAL 83 et CAL 87, avaient été classées avec les autres sources intenses du Grand Nuage de Magellan, malgré la mollesse inhabituelle de leurs spectres.

À l'époque, des astrophysiciens avaient supposé que CAL 83 et CAL 87 étaient des systèmes doubles où un trou noir