

En plus des recherches de matière noire que nous venons de décrire, et qui conviennent à la fois pour trouver des wimps et de la matière noire complexe, certaines approches visent plus spécifiquement le secteur sombre complexe. Celles-ci ciblent en particulier le photon sombre qui, dans certains modèles, peut spontanément se transformer en photon ordinaire et se retransformer en photon sombre en vertu des lois de la physique quantique. Or le photon ordinaire est détectable.

De plus, si le photon sombre a une masse non nulle (le terme de « photon » est alors un peu abusif puisqu'un photon n'a *a priori* pas de masse), le photon ordinaire produit peut avoir assez d'énergie pour créer une paire constituée d'un électron et de son homologue d'antimatière, le positron, ou une paire muon-antimuon (le muon étant un cousin, plus lourd, de l'électron).

Partant de ce scénario, plusieurs collaborations expérimentales, dont une à laquelle participe l'un de nous (Don Lincoln), étudient la production de paires électron-positron ou muon-antimuon dans des accélérateurs de particules. Si des photons sombres existent et interviennent dans le processus, les caractéristiques des paires seront altérées. Des études de ce genre sont en cours au LHC et dans d'autres accélérateurs, tel le projet *KLOE-2*, en Italie, les expériences *HPS* et *BaBar*, aux États-Unis.

Le Fermilab, près de Chicago, offre une autre piste intéressante. Les physiciens y produisent actuellement des faisceaux intenses de neutrinos dirigés vers des détecteurs lointains. Les neutrinos sont des particules très légères, qui interagissent avec les électrons des détecteurs par l'interaction faible (en échangeant un boson *W*). Il est possible de calculer la probabilité d'interaction selon ce processus. Mais, si les photons sombres existent, les neutrinos interagissent aussi avec les électrons du détecteur en échangeant un photon sombre. Et cela modifie les probabilités d'interaction. Il serait possible de mesurer ces interactions neutrino-électron dans les détecteurs *MiniBooNE*, *MINOS* ou *NOvA* du Fermilab.

Enfin, les scientifiques recherchent des indices astrophysiques de l'interaction de la matière noire dans des situations telles que les collisions de galaxies. Quand la matière noire d'une galaxie heurte celle d'une autre galaxie, les particules devraient se repousser en échangeant des photons

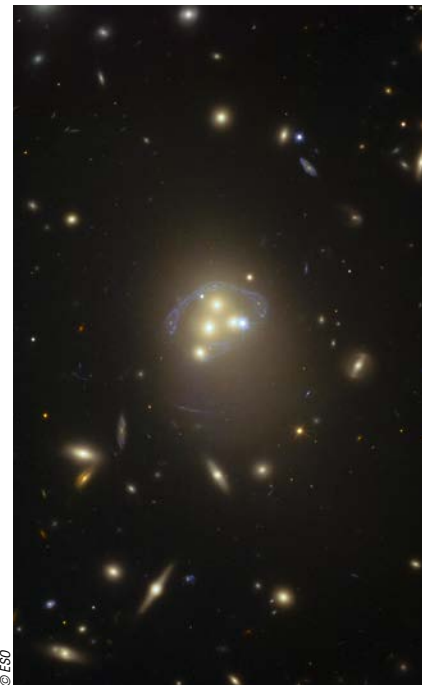
sombres. Plusieurs études de collisions de galaxies n'ont pas permis de trouver d'indices de ce phénomène, mais, en 2015, l'observation de l'amas Abell 3827, particulièrement proche de la Terre et bien orienté, a suggéré un tel motif. C'est un premier indice en faveur d'une matière noire complexe, mais des observations complémentaires de ces galaxies et d'autres seront nécessaires pour le confirmer.

Nous sommes indiscutablement confrontés à une énigme profonde. À grande échelle, de nombreuses observations s'expliquent par la présence de matière noire, sous une forme ou sous une autre. L'échec de la détection directe de matière noire souligne l'urgence qu'il y a à identifier la nature de la matière noire. Là où les modèles de wimps ont du mal à expliquer cette non-détection, les modèles complexes s'en accommodent plus naturellement, dans la mesure où ils reposent sur un nombre plus grand de paramètres à ajuster.

Épicycles du XXI^e siècle ?

On pourrait adresser une critique à cette approche : on se donne beaucoup de mal à maintenir en vie l'hypothèse de la matière noire. La situation est-elle analogue à celle des épicycles, quand les astronomes du XVI^e siècle tentaient à tout prix de sauver le géocentrisme en ajoutant une série constante d'ajustements à une théorie fatalement défectueuse ? Ce n'est pas notre avis : la matière noire explique remarquablement bien de nombreuses énigmes astronomiques, et il n'y a *a priori* pas de raison pour que la matière noire soit aussi simple que dans le modèle des wimps – le plus répandu car le plus simple à étudier.

Par ailleurs, les modèles de matière noire complexe apportent des solutions à certaines difficultés théoriques des wimps. Par exemple, dans les simulations numériques de formation des galaxies, les modèles de wimps prévoient des halos ayant une densité très élevée au centre, ce qui ne s'accorde pas avec les observations. Les modèles de matière noire complexe aplanissent, eux, la distribution au centre. Il y a donc plus d'un intérêt à explorer ces modèles complexes. En outre, tant que nous ne trouverons pas la solution au mystère de la composition du cosmos, nous devons être ouverts à la multitude d'explications possibles. ■



LES QUATRE GALAXIES au sein de l'amas Abell 3827 sont entrées simultanément en collision. Les halos de matière noire ne devraient pas être perturbés par cette rencontre si la matière noire n'interagit pas avec elle-même autrement que par la force gravitationnelle. Or une équipe d'astrophysiciens aurait trouvé des signes d'une telle interaction. Des indices à confirmer.

■ BIBLIOGRAPHIE

K. Freese, *The cosmic cocktail : Three parts dark matter*, Princeton University Press, 2014.

JiJi Fan *et al.*, *Dark-disk universe*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110(21), article 211302, 2013.

J. Feng et M. Trodden, *Matière noire, un univers caché*, *Pour la Science*, n° 399, janvier 2011.

D. E. Kaplan *et al.*, *Atomic dark matter*, *JCAP*, vol. 2010(5), article 21, 2010.

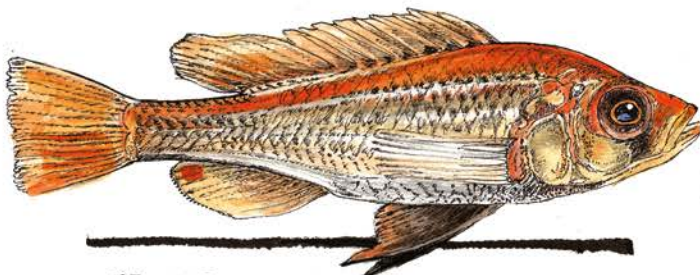
L. Ackerman *et al.*, *Dark matter and dark radiation*, *Phys. Rev. D*, vol. 79(2), article 023519, 2009.

Cichlidés

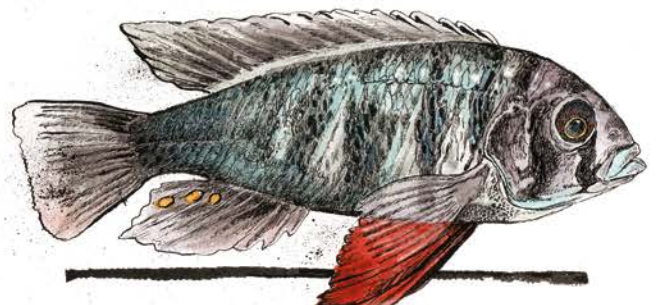
les clés d'une spectaculaire évolution

Axel Meyer

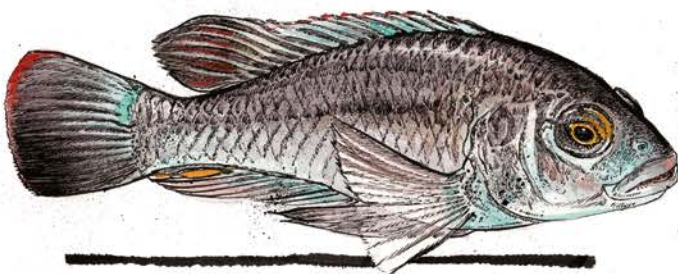
Les poissons cichlidés comptent plus de 2 500 espèces, dont beaucoup sont apparues en moins de 15 000 ans. Chez les vertébrés, il s'agit d'un record absolu, dont les ressorts sont tapis dans le génome.



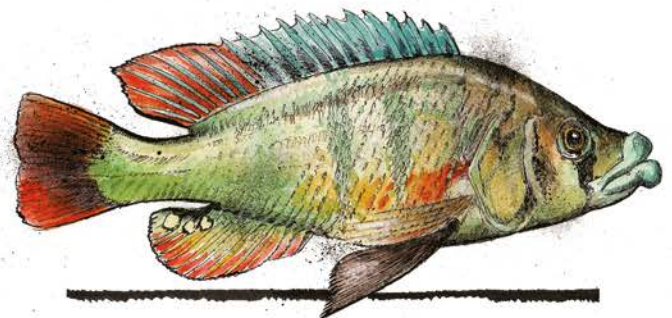
Yssichromis pyrrhocephalus



Neochromis omnicaeruleus



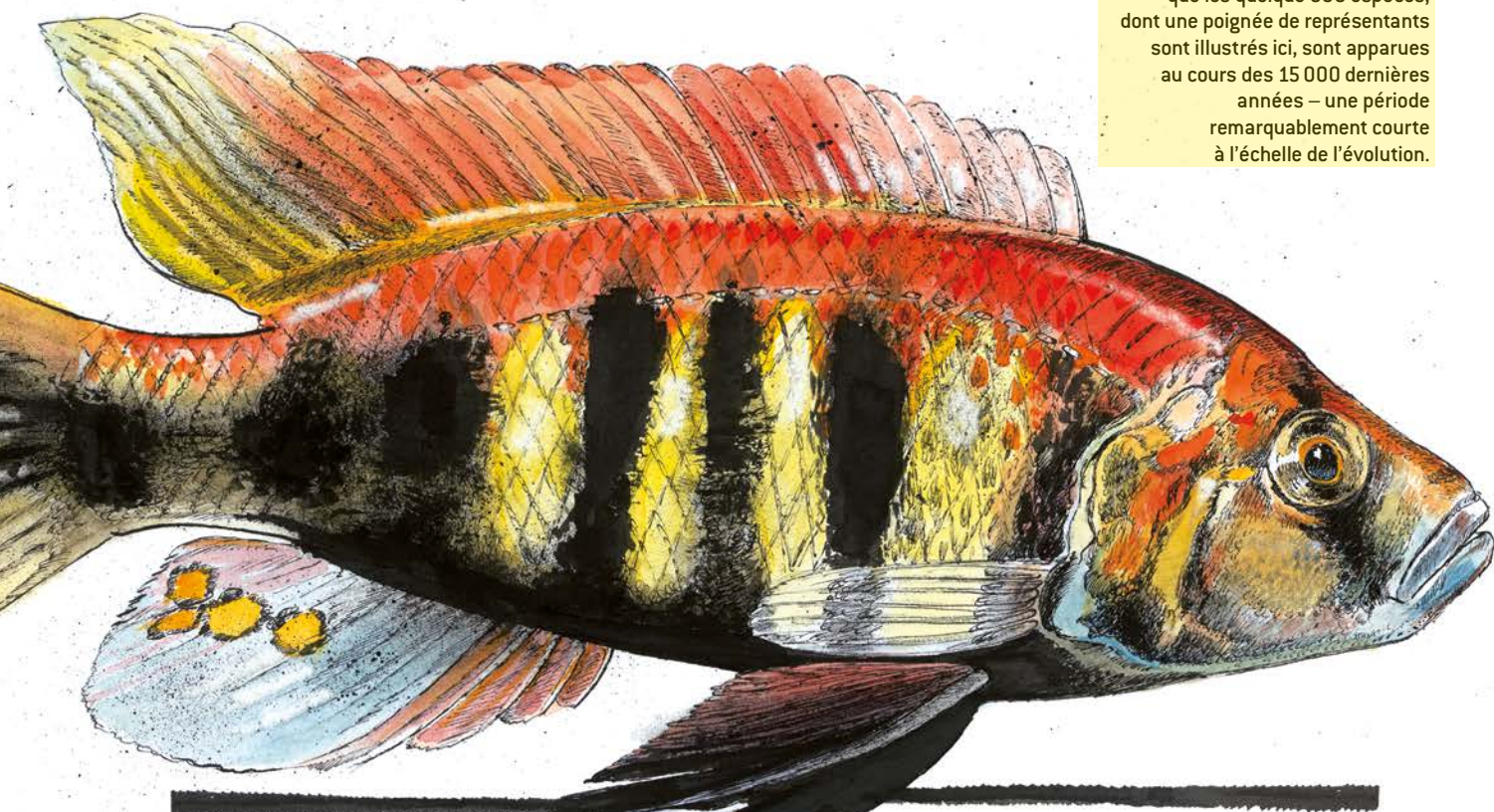
Macropodus bicolor



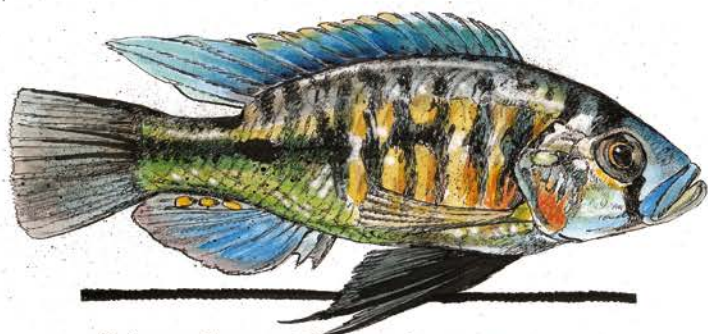
Paralabidochromis chilotes

© Toutes les illustrations sont de Jack Linth/Purnaise et carte du titre : iStockphoto

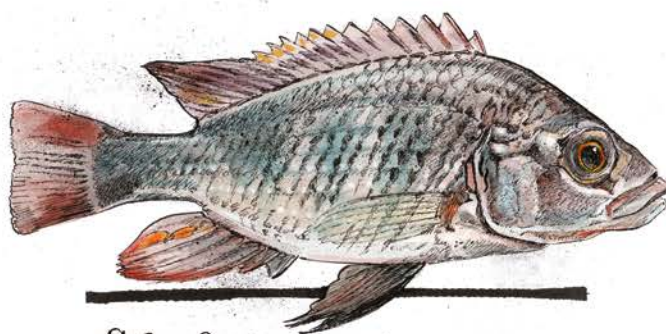
UNE EXTRAORDINAIRE VARIÉTÉ
de poissons cichlidés vit dans le lac
Victoria, en Afrique de l'Est. On estime
que les quelque 500 espèces,
dont une poignée de représentants
sont illustrés ici, sont apparues
au cours des 15 000 dernières
années – une période
remarquablement courte
à l'échelle de l'évolution.



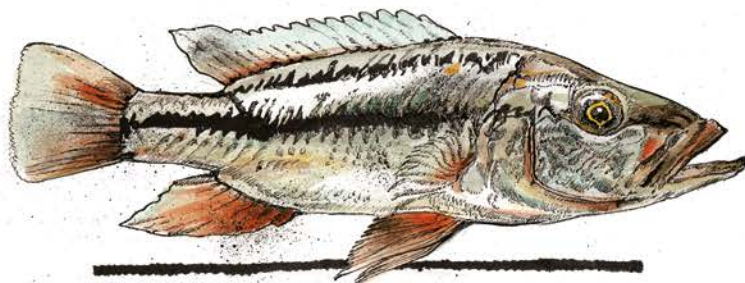
Pundamilia nyererei



Lipochromis melanopterus



Schubotzia eduardiana



Prognathochromis macrognathus



Thoracochromis pharyngalis

Le lac Victoria, en Afrique, héberge l'une des plus grandes expériences de l'évolution. Une lignée unique de poissons appartenant à la famille des Cichlidés y a donné naissance, au fil du temps, à une myriade de formes.

Rappelez-vous les pinsons étudiés par Charles Darwin : isolés sur des îles différentes de l'archipel des Galápagos, ces pinsons ont acquis des becs distincts, adaptés en taille et en forme aux diverses sources de nourriture disponibles. Ils représentent un exemple classique de ce que les biologistes nomment une radiation adaptative ou évolutive – le phénomène par lequel une lignée engendre de nombreuses espèces qui développent des spécialisations répondant à une série de rôles écologiques.

Cependant, les cichlidés du lac Victoria surpassent de loin les pinsons de Darwin par la vitesse stupéfiante à laquelle ils se sont diversifiés : les quelque 500 espèces qui vivent exclusivement dans ce lac africain sont toutes apparues au cours des 10 000 à 15 000 dernières années, un bref instant à l'échelle géologique. Les 14 espèces de pinsons de Darwin ont, elles, émergé au fil de plusieurs millions d'années.

Le lac Victoria n'est pas le seul endroit où l'on trouve des cichlidés. D'autres lacs et cours d'eau tropicaux en Afrique, sur le continent américain et à la pointe du sous-continent indien, abritent leurs propres cichlidés. En tout, on estime que la famille compte plus de 2 500 espèces, et il reste à en décrire formellement de nombreuses. Certains de ces poissons, tels les tilapias, sont élevés à des fins alimentaires et figurent parmi les espèces les plus importantes de l'aquaculture. La plupart des cichlidés, tels les oscars et les scalaires, sont appréciés des aquariophiles pour leur beauté et leurs comportements nuptiaux et parentaux, à la fois variés et intéressants.

Les cichlidés partagent leurs lacs avec d'autres familles de poissons, mais ils sont les seuls à avoir connu une spéciation aussi étendue et aussi rapide. Aucun autre groupe de vertébrés ne rivalise avec les cichlidés en termes de nombre d'espèces et de variété dans les formes, les colorations et les comportements. Cependant, l'évolution s'est souvent répétée chez ces poissons : curieusement, plusieurs adaptations identiques sont apparues dans des lignées distinctes.

De nombreux scientifiques, dont je fais partie, s'étonnent depuis longtemps de la multiplicité de formes des cichlidés et se

demandent quels facteurs ont permis à ce groupe de se diversifier de façon aussi spectaculaire.

Les nouvelles techniques de séquençage du génome nous ont permis d'étudier de près leur ADN pour tenter de dissiper le mystère de cette exubérance évolutive. Nous sommes encore loin d'avoir résolu l'énigme de la diversité des cichlidés, mais nous avons identifié des particularités dans leurs génomes, qui pourraient les prédisposer à se diversifier aussi rapidement tout en faisant apparaître certains traits à plusieurs reprises. L'exploration des fondements génétiques du succès de cette famille de poissons laisse entrevoir les rouages les plus intimes de l'évolution, ce qui aidera les chercheurs à décoder les origines de toutes sortes d'espèces.

Des racleurs d'algues aux prédateurs

Pour se faire une meilleure idée de l'extraordinaire diversité des cichlidés, il suffit de se pencher sur les formes que l'on trouve dans le lac Victoria et dans les deux autres lacs où les principales radiations de cichlidés est-africains se sont produites : le lac Malawi, qui héberge 800 à 1 000 espèces, et le lac Tanganyika, avec ses quelque 250 espèces issues de lignées plus anciennes, dont l'une a colonisé les deux autres lacs, plus jeunes, où elle a connu des radiations évolutives.

Ces cichlidés présentent toutes les couleurs de l'arc-en-ciel et leur taille va de quelques centimètres à un mètre. Ils se sont en outre adaptés de façon à exploiter toutes les sources de nourriture offertes par leur environnement. Les racleurs d'algues ont des dents plates similaires aux incisives humaines, avec lesquelles ils grignotent les excroissances nutritives à la surface des roches. Les insectivores ont des dents longues et pointues qui les aident à explorer les anfractuosités rocheuses. Les prédateurs chassant à l'affût ont d'énormes mâchoires extensibles avec lesquelles ils s'emparent de leurs proies en quelques millisecondes.

Il ne s'agit là que de quelques-unes des plus grandes catégories de spécialisation. Parmi les racleurs d'algues, par exemple, certaines espèces sont adaptées à la recherche de nourriture dans les zones de brisants, d'autres dans un amas de roches bien particulier et nulle part ailleurs, tandis que d'autres encore ne se nourrissent qu'en abordant les rochers

L'ESSENTIEL

- Les Cichlidés constituent la famille de vertébrés la plus diversifiée, avec plus de 2 500 espèces.
- Grâce à l'étude de leurs génomes, le mystère de la diversification stupéfiante de ces poissons commence à s'éclaircir.
- Les génomes de cichlidés présentent des particularités, auxquelles l'évolution accélérée de ce groupe serait due.
- D'autres caractères génétiques expliqueraient l'apparition répétée, dans plusieurs lignées de cichlidés, des mêmes adaptations.