



spécifiques: elles n'étaient pas partagées avec la population non adaptée.

Nous avons ensuite analysé les gènes modifiés à l'aide d'une base de données listant les fonctions et les interactions génétiques. Il en est ressorti que, même si les gènes modifiés varient d'une population de poissons à l'autre, la plupart d'entre eux sont impliqués dans la régulation des mêmes voies métaboliques (des chaînes de réactions chimiques dont l'organisme vivant est le siège). En ce sens, le terme de métabolisme désigne ici non seulement la façon dont les poissons trouvent de l'énergie dans la nourriture, mais aussi de façon générale l'ensemble des rôles joués par les myriades de protéines dans la machinerie biochimique qui maintient un organisme en vie. Ces rôles pourraient être impliqués dans tous les types d'adaptations. Nos données suggèrent qu'il existe de nombreuses voies génétiques pouvant conduire, face à un certain stress environnemental, à des adaptations similaires.

Une étude récente de Joanna Kelley, de l'université d'État de Washington, Michael Tobler, de l'université d'État du Kansas, et leurs collègues soutient cette idée. Ces chercheurs ont découvert que chez les mollus

Ce schéma d'activité des gènes reflète ce que nous observons directement dans l'ADN: les poissons ont suivi différentes voies moléculaires vers les mêmes solutions au problème posé par la vie dans des eaux sulfureuses.

L'étude des Poeciliidés adaptés aux eaux sulfureuses nourrit aussi la discussion sur une autre question fondamentale de la biologie évolutive. Certains généticiens pensent que des populations exposées aux mêmes facteurs de stress évoluent de façon comparable. Mais d'autres soutiennent que le déroulé précis d'un processus d'évolution peut influencer sur son résultat. Le point de vue sous-jacent à cette dernière idée est que si certaines mutations apparues aléatoirement produisent des adaptations clés, elles devraient se répandre rapidement dans la population adaptée au sulfure correspondante. Des jeux initiaux d'adaptations clés différents affecteront alors de différentes façons la trajectoire évolutive d'une population donnée, en altérant les avantages adaptatifs des mutations apparues à un stade tardif.

Nos résultats confortent cette idée. En étudiant trois populations de mollusques adaptés au sulfure, nous avons découvert qu'au sein de deux d'entre elles, la résistance au H_2S a évolué dans un gène qui code une protéine clé appelée cytochrome c-oxydase (COX), impliquée dans la production d'énergie par la cellule. La troisième population n'avait pas acquis cette adaptation clé initiale; elle avait donc dû développer une autre solution pour protéger du H_2S sa production d'énergie.

DES FOYERS D'ÉVOLUTION ACCÉLÉRÉE

Les défis posés à la vie par la colonisation de milieux aussi infernaux sont si grands que l'on peut se demander pourquoi la sélection naturelle l'a facilitée. Il y a une raison évidente: les eaux sulfureuses sont en quelque sorte des refuges où tous les prédateurs aquatiques et tous les poissons concurrents sont absents, ce qui constitue un avantage majeur. Dans les cours d'eau chargés en H_2S du sud du Mexique, on observe en effet seulement des Poeciliidés spécialisés, et aucune des nombreuses autres espèces de poissons présentes dans les eaux ordinaires de la région.

Ainsi, pour toxiques que soient les eaux sulfureuses, elles favorisent aussi la vie en faisant apparaître de nouvelles formes. La vision habituelle de la spéciation – c'est-à-dire de l'ensemble des phénomènes de sélection qui font apparaître une nouvelle espèce – veut qu'une séparation prolongée entre deux populations autrefois connectées entraîne leurs évolutions sur deux trajectoires évolutives différentes.

Dans ce scénario classique, la séparation résulte en général de l'apparition d'une

Les eaux sulfureuses sont des refuges où l'absence de prédateurs aquatiques et de poissons concurrents est un avantage majeur

taupes tolérants au sulfure du sud du Mexique, les schémas d'expression des gènes – en d'autres termes leurs différentes façons de fabriquer des protéines – différaient d'une population à l'autre. Toutefois, les niveaux d'expression des gènes impliqués dans la régulation des voies métaboliques considérées sont tous comparables.

> barrière géographique. Le cas des bassins-ver-sants mexicains où coulent des eaux tantôt normales, tantôt sulfureuses suggère que des conditions différentes régnant dans des zones différentes du même biotope suffisent parfois à déclencher une spéciation, en l'absence de barrière géographique.

Nos observations sur les Poeciliidés adaptés au H_2S vont-elles dans ce sens? Nous pensons que oui, puisque nous avons découvert que l'adaptation à un habitat donné, qu'il soit sulfuré ou non sulfuré, limite les capacités qu'ont les poissons à passer aisément dans l'autre type d'habitat. Cette forme de sélection naturelle conduit essentiellement à la présence de poissons adaptés au sulfure dans les sites sulfureux, et inversement, même quand les deux habitats ne sont séparés que de quelques dizaines de mètres.

UNE SPÉCIATION EN MOINS DE 100 000 ANS

D'autres facteurs vont dans le même sens, par exemple le fait que hors de leur habitat sulfureux, les poissons spécialisés sont plus facilement victimes de prédateurs. Par ailleurs, si une migration entre habitats se produit, ou si des individus d'un écotype (forme issue d'un certain écosystème) rencontrent des individus d'un autre écotype dans les zones intermédiaires, ils ne se reproduiront pas ensemble. Des expériences sur le choix des partenaires ont en effet montré que les femelles vivant dans les eaux non sulfureuses préfèrent s'accoupler avec des mâles de leur propre écotype.

L'existence et le degré de cette préférence semblent dépendre de la force de la sélection naturelle: nous avons découvert que les préférences des femelles pour leur propre écotype sont plus fortes quand la sélection naturelle des mâles migrants adaptés au sulfure est faible. Il semble que plus une femelle a la possibilité de rencontrer un mâle issu d'un autre écotype et donc de donner naissance à une progéniture hybride, plus elle développe d'aversion envers les étrangers. Au contraire, quand la sélection naturelle des migrants est forte et donc que la probabilité de les rencontrer est faible, les femelles ont moins d'aversion à l'égard des mâles étrangers.

On ignore combien de Poeciliidés ont évolué pour former de nouvelles espèces adaptées aux sources sulfureuses parce que, dans de nombreux cas, nous ne savons pas encore jusqu'où la différenciation génétique a été ou si des croisements avec les populations voisines se produisent encore. Toutefois, certaines des lignées adaptées aux eaux sulfureuses présentant toutes les adaptations sont âgées d'environ 100 000 ans – ce qui est très peu à l'échelle de l'évolution.

Le fait que ces espèces aient pu développer des traits distinctifs en un temps assez court et atteindre, par rapport à leurs voisins vivant dans des eaux non toxiques, un certain degré d'isolement reproductif, suggère que les conditions extrêmes des eaux sulfureuses accélèrent la spéciation. L'une de nos études récentes corrobore cette idée: nous avons découvert que le degré d'isolement reproductif chez les Poeciliidés adaptés au sulfure est corrélé à la concentration de H_2S régnant dans leur écosystème.

La rapidité avec laquelle les Poeciliidés se sont adaptés à cet agent toxique naturel qu'est le H_2S signifie-t-elle que ces poissons seraient aussi capables de s'adapter à une pollution due aux activités humaines? Une étude publiée l'année dernière par Noah Reid, de l'université du Connecticut et des collègues montre que les fondules (des poissons d'une famille différente de celle des Poeciliidés, quoique proche) qui vivent dans certains sites pollués d'Amérique du Nord ont réussi des adaptations évolutives rapides et répétées à la pollution toxique provenant de complexes industriels.

Ces chercheurs suggèrent que cela pourrait résulter de l'existence chez les fondules de nombreuses variations génétiques, parmi lesquelles ils pourraient « piocher » afin de faire face aux pressions de sélection dues à la pollution. On ne sait pas encore bien si les Poeciliidés sont ou non équipés de la même façon, bien que nos recherches suggèrent que chez ces poissons des mutations de l'ADN nouvelles jouent un rôle adaptatif plus important que l'existence ancienne et permanente de nombreuses variations génétiques.

UNE ADAPTABILITÉ MÊME AUX CHANGEMENTS RADICAUX D'ORIGINE ANTHROPIQUE ?

Considérées dans leur ensemble, ces recherches sur les fondules et nos propres découvertes suggèrent que certaines espèces de petits poissons ayant une faible longévité, mais qui produisent plusieurs générations par an, pourraient, sous certaines conditions, s'adapter même aux changements environnementaux radicaux imposés par les activités humaines.

De nombreux points restent à explorer. Par exemple, nous ne comprenons pas pourquoi la présence de H_2S a conduit à des adaptations et à un isolement reproductif dans certains écosystèmes, mais pas dans les autres. Avec le progrès continu du séquençage de l'ADN, la baisse de ses coûts ainsi que la publication récente des génomes de plusieurs espèces de Poeciliidés, nous devrions bientôt comprendre beaucoup mieux les mécanismes génétiques à la base de l'évolution dans l'enfer des eaux sulfureuses. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Meyer, **Cichlidés : les clés d'une spectaculaire évolution**, *Pour la Science*, n° 463, mai 2016.

M. Pfenninger et al., **Unique evolutionary trajectories in repeated adaptation to hydrogen sulphide-toxic habitats of a neotropical fish (*Poecilia mexicana*)**, *Molecular Ecology*, vol. 24(21), pp. 5446-5459, 2015.

R. Riesch et al., **Colonisation of toxic environments drives predictable life-history evolution in livebearing fishes (*Poeciliidae*)**, *Ecology Letters*, vol. 17(1), pp. 65-71, 2014.

M. Pfenninger et al., **Parallel evolution of COX genes in H_2S -tolerant fish as key adaptation to a toxic environment**, *Nature Communications*, vol. 5, art. 3873, 2014.