

> de 10^9). En gros, le cas des insectes correspond à celui d'un nageur évoluant dans une huile extrêmement visqueuse...

Dans ce registre de valeurs, l'écoulement de l'air autour des ailes n'est pas turbulent, mais la relation entre la force aérodynamique et la vitesse n'est pas simple. Plus fondamentalement encore, les mouvements de l'aile sont si rapides qu'on est très loin de la situation d'un écoulement stationnaire où un objet se déplace à vitesse constante relativement au fluide. Il a fallu des années pour que les physiciens fassent l'inventaire des effets faisant varier la force aérodynamique pendant le cycle du battement de l'aile, notamment en travaillant sur des maquettes mises à l'échelle adéquate, avec le même nombre de Reynolds.

TOURBILLONS ET ASPIRATIONS

Pour faire simple, la plupart des effets proviennent de l'apparition de tourbillons transitoires dans les différentes phases. Cela se produit par exemple quand l'aile se retourne entre chaque demi-battement : la rotation entraîne le fluide visqueux environnant.

Plus étonnant, les insectes mettent à profit un phénomène bien connu des ingénieurs aéronautiques : le décrochage retardé. On constate en effet que l'inclinaison de leurs ailes (entre 20° et 40°) est notablement plus élevée que celle d'une aile d'avion ; elle va même au-delà de l'angle de décrochage. Or quand on dépasse cet angle, un tourbillon se crée au-dessus et à l'arrière du bord d'attaque de l'aile. D'habitude, il est rapidement évacué derrière l'aile, mais ici il n'en a pas le temps.

Enfin, les chercheurs se sont rendu compte que l'aile interagit avec le tourbillon du sillage créé par le précédent battement. À chaque fois, comme dans une tornade, l'écoulement de l'air dans ces tourbillons est très rapide et la pression y est très faible. Cela provoque des effets de succion-aspiration sur l'aile, qui augmentent en moyenne la force de sustentation.

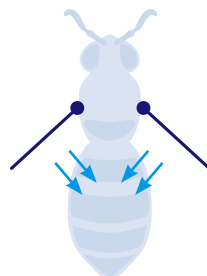
Dernière complication, pour les plus petits insectes, les effets des forces de viscosité augmentent. Or viscosité et tourbillons ne font pas bon ménage. Un tourbillon dans de l'huile se dissipe beaucoup plus rapidement que dans de l'eau. Conséquence : les tourbillons dont nous venons de parler produisent des forces moins intenses pour les petits insectes que pour les gros, et ne permettraient donc plus de compenser leur poids.

C'est pourquoi les petits insectes ont une autre façon de voler. Au lieu de

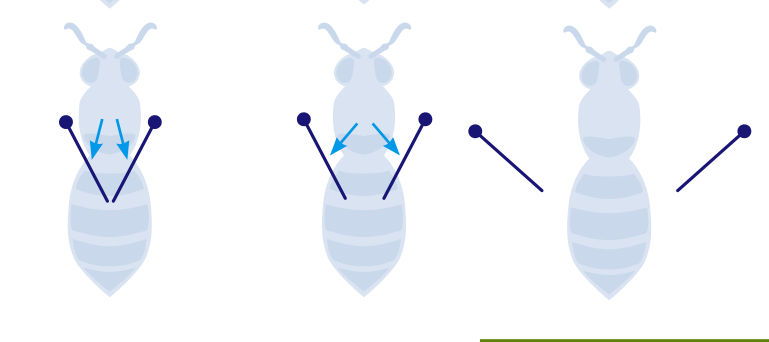
LE CLAP & FLING

Les très petits insectes claquent leurs ailes l'une contre l'autre dans une séquence où ils les ouvrent et ferment, le corps étant orienté verticalement. La propulsion de l'air vers le bas ou son aspiration depuis le haut (flèches bleues) ainsi produites contribuent à la sustentation.

« Clap »



« Fling »



conserver un mouvement alaire dans le plan horizontal, pendant la phase de retour, lorsque les ailes repartent vers l'arrière, ils les projettent fortement vers le bas, comme s'ils prenaient appui sur l'air. Durant cette phase, la traînée est alors presque verticale et contribue donc, contrairement au cas des gros insectes, à la sustentation.

CLAQUEMENTS D'AILES

À la limite, pour les insectes les plus petits, on obtient une nouvelle modalité de vol : le « clap & fling » (voir l'encadré ci-dessus). Dans ce cas, l'insecte claque les bords d'attaque de ses ailes l'un contre l'autre à la verticale à la fin de la phase de retour : c'est le « clap ». Cela chasse brutalement de l'air vers le bas et engendre donc une poussée vers le haut. Aussitôt, l'insecte rouvre les ailes et les projette vers le bas en les pivotant autour de leurs bords de fuite : c'est le « fling ». Cette ouverture aspire l'air vers le bas, créant une dépression au-dessus de l'aile qui accroît la force ascensionnelle.

Évidemment, claquer ses ailes comme dans un garde-à-vous à haute fréquence peut les endommager. C'est pourquoi certains insectes ne se livrent qu'à une séquence incomplète de telles manœuvres. ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Z. Lyu et al., **Flapping-mode changes and aerodynamic mechanisms in miniature insects**, *Physical Review E*, vol. 99, 012419, 2019.

S. P. Sane, **The aerodynamics of insect flight**, *The Journal of Experimental Biology*, vol. 206, pp. 4191-4208, 2003.

M. Dickinson, **Le vol des insectes**, *Pour la Science*, n° 286, août 2001.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 511 (mai 20)
réf. PL511



N° 510 (avril 20)
réf. PL510



N° 509 (mars 20)
réf. PL509



N° 508 (fév. 20)
réf. PL508



N° 507 (jan 20)
réf. PL507



N° 506 (déc. 19)
réf. PL506



N° 505 (nov. 19)
réf. PL505



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

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 31/12/2020 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

SUR LES TRACES DES POISSONS DES GLACES

Après la formation de l'océan Austral, des poissons se sont non seulement adaptés à ces eaux froides, mais aussi diversifiés de façon étonnante. On sait maintenant comment.

Le 11 janvier 1842, alors que les *HMS Erebus* et *Terror*, les deux navires de l'explorateur polaire britannique James Clark Ross, étaient prisonniers de la glace de mer à 66° de latitude sud, aux abords du cercle polaire antarctique, l'équipage eut la surprise de capturer un phoque de près de 4 mètres de long dont l'estomac contenait environ 13 kilogrammes de poissons. Le naturaliste à bord s'empressa d'examiner ces derniers. D'après les restes, parfois encore entiers, on estima qu'il y avait là quelque deux cents poissons, dont la plupart appartenaient à des espèces diverses d'un même genre, qui fut ensuite nommé *Notothenia*. La température de l'eau en surface était de -2°C et, même si elle avait un ou deux degrés de plus en profondeur, l'équipage ne s'attendait pas à y rencontrer autant de poissons. Comment ces poissons survivaient-ils à de telles températures ?

Aujourd'hui, cette énigme n'en est plus une. On sait que près d'un tiers des

374 espèces de poissons antarctiques connues appartiennent à la famille des nototheniidés, qui présentent l'originalité de produire dans leur sang des protéines antigels, leur autorisant une vie dans des eaux dont la température varie entre -1°C et 4°C. Ces protéines entourent les cristaux de glace naissants et empêchent leur croissance. Quant aux autres poissons, ils se débrouillent pour rester au-dessus de 0°C en nageant. En revanche, ce qui étonne toujours les scientifiques, c'est la diversité inattendue des nototheniidés, la taille de cette famille étant disproportionnée par rapport à celle des autres familles de l'océan Austral. Cependant, tout récemment, un scénario s'est dessiné, mêlant génétique et climat.

UNE GRANDE VARIÉTÉ CHROMOSOMIQUE

Les nototheniidés sont caractérisés par une grande disparité de leur garniture chromosomique : suivant les espèces, les poissons portent de 10 à 29 paires de

On rencontre ce poisson dans l'océan Austral, à des latitudes sud comprises entre 61° et 78°.



Il se reproduit une fois par an.



Hervé Le Guyader a récemment publié : **Biodiversité : le pari de l'espoir**, (Le Pommier, 2020).

EN CHIFFRES

115

Sur les 34 000 espèces décrites de poissons, seules 374 vivent dans l'océan Austral, qui représente pourtant 10% de la superficie totale des mers. Parmi ces poissons antarctiques, 115 appartiennent à la seule famille des nototheniidés.

20 MILLIONS

L'ancêtre hypothétique le plus récent de la famille des nototheniidés vivait il y a 20 millions d'années. Celui du genre *Trematomus* serait apparu 10 millions d'années plus tard.

- 1,8 °C

L'eau de mer, contenant environ 35 grammes de sel par litre, gèle à - 1,8 °C.



Il se nourrit de polychètes, de gastéropodes, d'isopodes, d'amphipodes et de quelques algues.

Il vit principalement sur les fonds marins situés entre 0 et 200 mètres de profondeur, mais on en trouve jusqu'à 700 mètres.



Bocasson émeraude
(*Trematomus bernacchii*)
Longueur moyenne : 25 cm

chromosomes. Or, depuis longtemps, les généticiens pensent que les réarrangements chromosomiques non homologues – l'échange de fragments entre deux chromosomes n'appartenant pas à la même paire – conduisent à la diversification. Toutefois, leur lien avec la spéciation est toujours fortement débattu. Pour affronter ce problème, l'équipe rassemblée par Dominique Higuët, de Sorbonne Université, à Paris, s'est intéressée au genre *Trematomus*, qui regroupe douze espèces d'une très grande diversité chromosomique (elles comptent de 12 à 29 paires de chromosomes).

En effet, si le nombre de chromosomes varie au sein de ce genre, les

quantités d'ADN des génomes restent constantes, ce qui suggère qu'il y a eu fusion de chromosomes chez les espèces qui en ont moins. Un autre indice est en faveur de telles fusions. En 2004, l'équipe de Jean Weissenbach, au Genoscope, a montré qu'il s'est produit, chez un ancêtre commun des poissons téléostéens (qui regroupent la majorité des poissons actuels, dont les nototheniidés), une duplication complète du génome : cet ancêtre possédait 24 paires de chromosomes, contre 12 pour l'ancêtre des vertébrés. Or les taxons les plus proches des nototheniidés en ont eux aussi 24 paires, ce qui suggère qu'il en était de même de l'ancêtre des nototheniidés.

Restait à prouver qu'il y avait bien eu fusion de chromosomes. Pour ce faire, l'équipe de Dominique Higuët a construit des sondes spécifiques de grandes régions chromosomiques à partir du génome de 11 paires de chromosomes d'une espèce proche déjà étudiée (et décrite lors de l'expédition Ross), *Notothenia coriiceps* (voir l'encadré page 94). Contre toute attente, le jeu des fusions ainsi révélé montre que celles-ci se sont produites indépendamment, alors que d'autres nototheniidés proches, comme le genre *Notothenia*, présentent des fusions partagées par plusieurs espèces, donc héritées d'un ancêtre commun.

> Les transposons, des séquences d'ADN capables de se déplacer dans le génome, permettent de réaliser des recombinaisons non homologues entre chromosomes. Aussi leur mobilisation a-t-elle souvent été proposée comme actrice de réarrangements chromosomiques. Seraient-ils responsables de ceux mis en évidence dans le genre *Trematomus*? Pour le tester, l'équipe de Dominique Higuët a évalué leur diversité, leur abondance puis leur localisation sur les chromosomes chez treize espèces de nototheniidés.

LE RÔLE CLÉ DES TRANSPOSONS

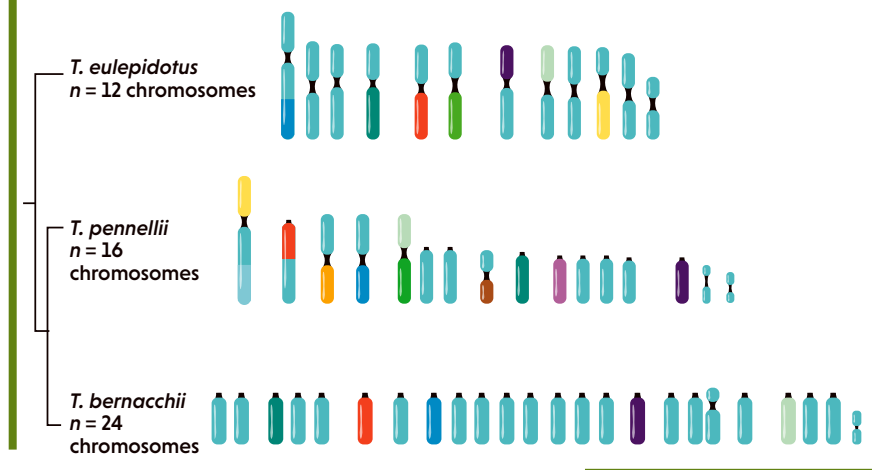
Parmi les quatre superfamilles de transposons décelées, une se distingue par son abondance: les *DIRS1* sont dix fois plus nombreux que les trois autres. De plus, ces transposons s'accumulent dans les régions proches du centromère des chromosomes (la région de contact de leurs bras), alors que les autres sont dispersés dans le génome. Enfin, les autres poissons testés, issus des deux familles les plus proches des nototheniidés, ne présentent pas une telle accumulation de transposons *DIRS1* dans leur génome.

Ainsi, vu la prédominance des transposons *DIRS1* et leur localisation près des centromères, on peut penser qu'ils ont joué un rôle dans les fusions chromosomiques des nototheniidés en facilitant des recombinaisons non homologues. Cependant, quel événement a pu activer les transposons? Généralement, des modifications chimiques, dites «épigénétiques», maintiennent les transposons inactifs. Mais en cas de stress, ce verrou peut sauter, ce qui libère les transposons. Or, justement, il s'avère que les *Trematomus* ont très probablement subi de tels stress par le passé.

Il y a 30 millions d'années, à la fin de l'Éocène, l'ouverture du passage de Drake, entre le Cap Horn et les îles Shetland du Sud, a isolé l'Antarctique des autres continents; un vaste courant circumpolaire antarctique, entraîné par le régime de puissants vents dominants d'ouest, a ainsi pu se mettre en place. Ces eaux froides en mouvement se sont peu mélangées avec les eaux plus chaudes des océans Atlantique, Indien et Pacifique, déterminant une frontière appelée «convergence antarctique». Celle-ci, située vers le 60° de latitude sud, correspond à une véritable barrière pour les organismes vivants. Parallèlement et jusqu'à aujourd'hui, l'inlandsis qui recouvre l'Antarctique a subi de nombreuses phases de régression et d'extension. Soit le plateau continental était

DES FUSIONS DE CHROMOSOMES

Pour reconstituer le jeu des fusions chromosomiques dans le genre *Trematomus*, l'équipe de Dominique Higuët a construit des sondes spécifiques de grandes régions chromosomiques – des « unités structurales » –, à partir du génome d'une espèce proche, *Notothenia coriiceps*: la plupart correspondent à des bras chromosomiques. Puis l'équipe a hybridé ces sondes avec les génomes de diverses espèces de *Trematomus*, prouvant par là même que les unités structurales sont conservées d'un genre à un autre. Elle a ainsi montré que ces unités (en couleurs ci-dessous) correspondent à de petits chromosomes chez des espèces ayant un nombre classique de chromosomes, comme *Trematomus bernacchii* (en bas), tandis que certaines ont subi des fusions chez des espèces ayant moins de chromosomes, comme *T. pennellii* et *T. eulepidotus* (en haut).



libre, en pleine eau, soit le glacier venait s'y appuyer et, en le recouvrant, laissait des anfractuosités qui isolaient les populations des poissons vivant sur les fonds rocheux. Un tel environnement changeant ne pouvait que faciliter les spéciations.

On peut supposer que les successions de réchauffements et de glaciations ont produit des stress qui ont déclenché l'arrêt de la régulation épigénétique, autorisant alors des vagues de mobilisation des transposons dans le génome. La datation de la radiation des *Trematomus* correspond à une période de refroidissement de la fin du Miocène, il y a 10 millions d'années. La fixation des fusions a dû être facilitée par la dispersion de petites populations isolées dans les refuges du plateau continental recouvert par l'inlandsis. Le réchauffement suivant a permis la recolonisation de ce dernier, mais aussi de la pleine mer par certaines espèces comme *T. borchgrevinki*. De tels bouleversements chromosomiques constituent une véritable barrière de reproduction, car l'appariement des chromosomes lors de la fécondation devient impossible. Ainsi, après un réchauffement, la mise en contact des différentes populations de *Trematomus* n'est pas suivie d'hybridations généralisées; on assiste plutôt, suivant le mot des scientifiques, à une « spéciation chromosomique ». ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Auvinet et al., **Multiple independent chromosomal fusions accompanied the radiation of the Antarctic teleost genus *Trematomus* (Nototheniidae): *Nototheniidae*, BMC Evol. Biol., vol. 20, article 39, 2020.**

J. Auvinet et al., **Insertion hot spots of *DIRS1* retrotransposon and chromosomal diversifications among the antarctic teleosts *Nototheniidae*, Int. J. Mol. Sci., vol. 20(3), article 701, 2019.**

G. Duhamel et al., **Biogeographic patterns of fish**, dans C. de Broeyer et al. (éd.), **Scientific Committee on Antarctic Research, Biogeographic Atlas of the Southern Ocean**, pp. 328-362, 2014.

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous,
l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines
de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses



CONCEPTION & RÉALISATION GRAPHIQUE : OLFA NEMSI