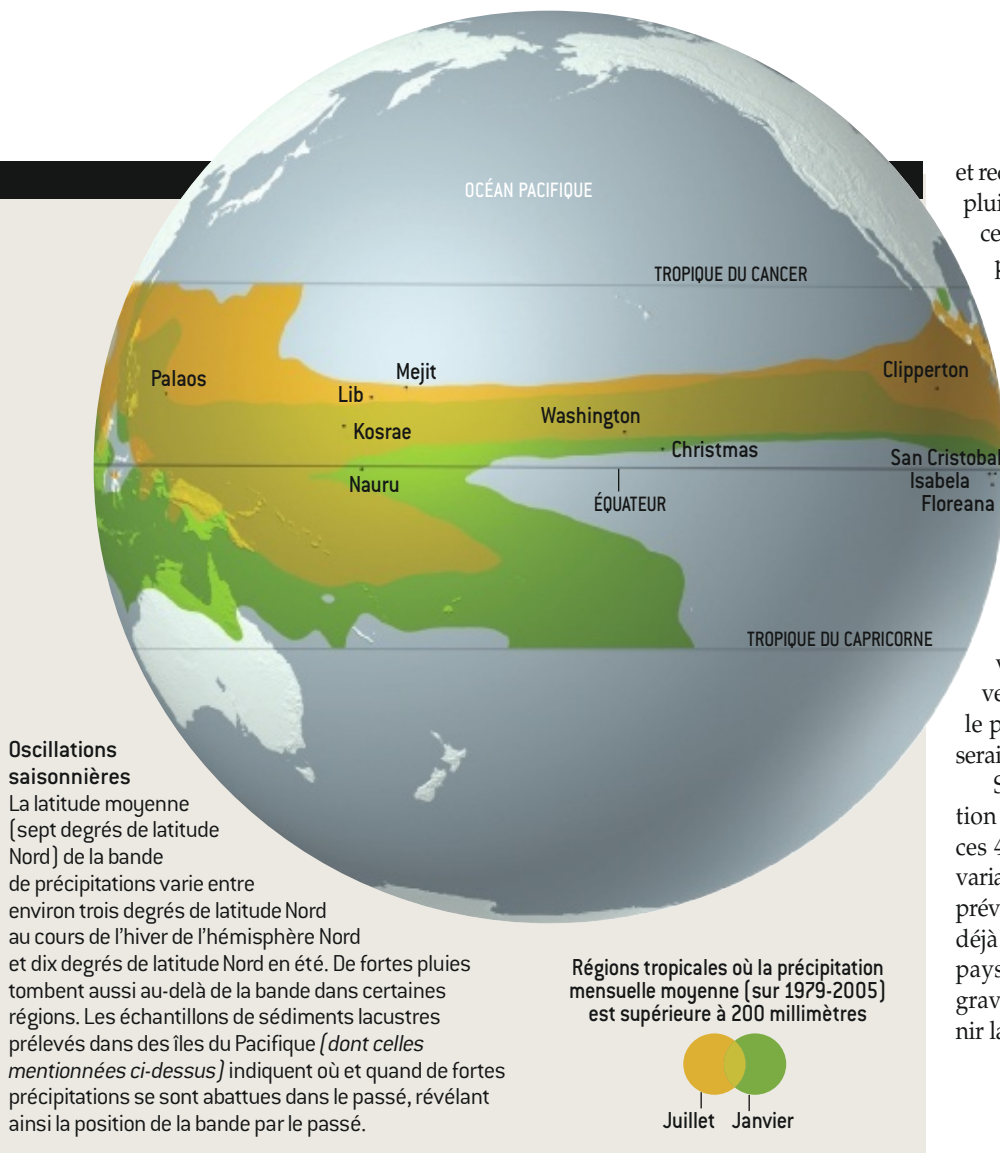




la zone de convergence intertropicale (entre 10 et 15 degrés de latitude Nord), comme le Salvador et les environs de Manille, au Nord des Philippines, connaîtraient une augmentation des précipitations annuelles. À l'inverse, des régions désormais hors de la zone d'influence de la bande de précipitations (entre trois et huit degrés de latitude Nord) deviendraient plus arides. La puissance des moussons asiatiques et indiennes compenserait-elle par endroits cet effet de sécheresse ? Les scientifiques en débattent.

Les régions humides que sont le Nord de l'Indonésie, la Malaisie, les Philippines, la Micronésie, la Thaïlande et le Cambodge seraient privées d'une grande partie des pluies qu'elles reçoivent de nos jours sous l'influence de la zone de convergence intertropicale. Les variétés agricoles adaptées aux actuelles conditions météorologiques ne seraient plus acclimatées. Par exemple, les plantations de café exigent beaucoup d'eau en début de croissance, et un total de plus de 1,8 mètre pour parvenir à maturité.

En Amérique centrale, l'Équateur et la Colombie seraient, laissés en marge de la zone de convergence intertropicale, victimes de la sécheresse. On pourrait penser que l'urbanisation continue de la Colombie l'aidera à faire face à la situation, son économie ne dépendant plus autant de l'agriculture. Or ce pays est le troisième plus gros producteur de café et, comme en Indonésie, de moindres précipitations affecteraient à terme les rendements. La plupart des régions productrices de café situées à des latitudes inférieures à huit degrés de latitude Nord pourraient bien être concernées dans la seconde moitié du XXI^e siècle. Les zones de production situées au Sud ou le long des côtes sont les plus menacées, car plus éloignées de la bande de précipitations.

L'horizon est également assez sombre pour l'industrie de la banane en Équateur. Des températures élevées conjuguées à des précipitations annuelles de 2 à 2,5 mètres sont nécessaires pour obtenir un fruit savoureux. Or l'Équateur se situe déjà bien au Sud de la zone de convergence intertropicale

et reçoit tout juste la quantité minimale de pluie nécessaire à cette culture. Un déplacement de la bande pluviale réduirait les précipitations à un mètre par an, ou moins, d'ici 2100 et mettrait un terme à l'industrie de la banane dans ce pays. Une chute drastique des rendements pourrait d'ailleurs survenir plus rapidement que prévu. Début 2010, environ la moitié des plantations des Philippines ont donné des bananes de trop petit calibre, non commercialisables, à cause d'une saison anormalement sèche.

L'agriculture vivrière serait touchée dans toutes les régions que nous venons de mentionner. L'exode rural vers les centres urbains ne résoudra pas le problème et une pénurie alimentaire serait catastrophique.

Si la bande pluvieuse poursuit sa migration vers le Nord au même rythme que ces 400 dernières années, d'importantes variations pluviométriques sont également prévisibles aux États-Unis, si elles n'ont pas déjà commencé. Ainsi, le Sud-Ouest du pays subit depuis plusieurs années une grave sécheresse qui pourrait bien devenir la nouvelle norme au XXI^e siècle.

Des modèles plus appropriés

Un tel mouvement risque-t-il d'affecter la fréquence des ouragans et des moussons ou d'en modifier l'intensité ? Les scientifiques n'ont pas encore tranché. De même, d'éventuelles conséquences sur El Niño et La Niña restent à évaluer.

Il reste beaucoup à faire avant de tirer avec certitude le signal d'alarme. Les modèles numériques du climat n'ont pas encore reproduit avec précision les schémas pluviométriques actuels ou passés pour la région tropicale. Si les simulateurs réussissent à utiliser les données fournies par les carottes de sédiments et d'autres sources pour produire des schémas plus proches de ceux que l'on connaît déjà, le monde pourra se fier davantage à leurs prévisions pour les précipitations futures.

Quant à nous, nous allons poursuivre notre étude des sédiments en provenance d'îles situées dans la zone de convergence intertropicale, ainsi qu'au Nord et au Sud de celle-ci, afin de définir avec plus de précision sa position au cours du dernier millénaire, et de prévoir où elle se situera dans les décennies à venir. ■

Premiers accouplements

John Long

Depuis quand les animaux supérieurs s'accouplent-ils pour procréer ?

La découverte de fossiles de poissons archaïques, vieux de 375 millions d'années, offre une réponse à la question et éclaire notre propre évolution.

Août 2005. Il fait chaud. Mon équipe et moi sommes partis à la pêche aux fossiles de poissons sur la formation de Gogo. Situé au Nord-Ouest de l'Australie, cet ancien récif corallien est aujourd'hui une vaste terre aride, sans vie aquatique ou presque, où l'on élève du bétail. Il y a quelque 375 millions d'années, à la fin du Dévonien (416 à 359 millions d'années), il en allait tout autrement. Une mer peu profonde recouvrait alors la région ; la vie marine grouillait dans l'immense récif tropical de Gogo.

Par chance, nombre des poissons de Gogo nous sont parvenus en bon état au sein de nodules de calcaire libérés par l'érosion des schistes argileux de la région. De la taille d'un ballon de handball, ces nodules sont éparpillés sous les buissons, où se réfugiaient pendant la journée de nombreuses vipères de la mort, une espèce australienne parmi les plus venimeuses au monde. Pour faire bonne pêche sans risquer sa vie, il faut donc faire très attention en saisissant ces pierres, avant de les ouvrir d'un coup de marteau à la recherche d'un fossile...

Les plus fréquents des poissons primitifs de Gogo étaient les placodermes. Comme

l'indique leur nom, les poissons de ce groupe disparu avant le Carbonifère (359 à 299 millions d'années) avaient des plaques sur la peau, formant une cuirasse. Ils ont été parmi les premiers animaux vertébrés dotés de mâchoires. Ils ont prospéré durant près de 70 millions d'années : ils sont l'un des plus grands succès évolutifs de leur époque.

En ce jour d'août 2005, nous étions à Gogo pour étudier la question des liens entre les placodermes et les autres vertébrés, dont les paléontologues débattent depuis longtemps. Or un poisson presque complet découvert ce jour-là s'est révélé être une trouvaille sensationnelle. Le fossile ne m'a guère semblé remarquable sur le moment : j'ai simplement pensé avoir un poisson de plus dans le filet que je ramènerai au laboratoire. Toutefois, une fois extrait de sa gangue de calcaire, il s'est révélé vivipare, ce qui bouleversait notre vision de l'origine de l'accouplement et de la fécondation interne chez les vertébrés.

La viviparité – le fait que l'embryon se développe à l'intérieur du corps de la mère – était censée être apparue pour la première fois chez les chondrich-



L'ESSENTIEL

✓ La copulation des vertébrés était supposée être apparue il y a 350 millions d'années chez les requins et autres poissons cartilagineux.

✓ Plusieurs fossiles de femelles porteuses d'embryons attestent que la fécondation interne est apparue 25 millions d'années plus tôt au sein d'une classe de poissons plus primitifs.

✓ Ces découvertes éclairent d'un jour nouveau l'origine de nos propres organes sexuels, ainsi que celle de nos membres.

Owen Gilderstein

tyens (requins, raies et autres poissons cartilagineux), il y a quelque 350 millions d'années, soit quelque 70 millions d'années après l'apparition des premiers membres de ce groupe. On pensait qu'auparavant, les femelles poissons ne faisaient que frayer, c'est-à-dire déposer leurs œufs dans l'eau, où les mâles venaient les féconder avant que les embryons ne se développent en pleine eau. Or notre découverte de Gogo montrait que la copulation et la mise au monde de jeunes entièrement formés étaient apparues des millions d'années plus tôt, chez des vertébrés plus primitifs que les poissons cartilagineux.

Quand il se révèle qu'un trait biologique aussi majeur que le mode de procréation s'est transformé bien plus tôt qu'on ne le pensait, tout paléontologue ne peut qu'être fasciné. Toutefois, l'importance de notre trouvaille tient aussi au fait que les placodermes appartiennent à la même longue lignée que celle des tétrapodes, les animaux à quatre membres dont les humains font partie.

L'appareil génital de ces anciens placodermes nous renseigne sur la façon dont

sont apparus nos organes sexuels et d'autres parties de notre corps. Ce sont en effet les nageoires pelviennes (la paire de nageoires situées à l'arrière du corps), dont se servaient les placodermes mâles pour introduire leur sperme dans les femelles, qui ont donné naissance aux organes génitaux et aux pattes postérieures des tétrapodes.

Des fossiles en 3D, non aplatis

Quant aux mâchoires, il se peut qu'elles soient apparues pour permettre aux mâles de maintenir les femelles durant l'accouplement. Ce ne serait que bien après leur apparition pour cet usage qu'elles auraient été employées aussi pour mastiquer la nourriture. Le sexe, semble-t-il, a vraiment tout changé...

Si les fossiles de Gogo sont si célèbres, c'est parce que, contrairement à la plupart des fossiles de poissons, ils sont le plus souvent très bien conservés dans les trois dimensions, et non aplatis. La mise au jour complète des squelettes prend cependant beaucoup de temps : afin d'évi-

ter d'endommager les os fossilisés, nous devons dissoudre lentement la matrice calcaire avec de l'acide acétique dilué. Cela explique que je n'aie pas trouvé le temps de dégager le poisson ramené de Gogo avant novembre 2007.

En nous fondant sur ses mâchoires et ses dents robustes, faites pour broyer, ma collègue Kate Trinajstić, aujourd'hui à l'Université Curtin en Australie, et moi-même avons déterminé que cet animal de la taille d'un maquereau appartient à la famille des Ptyctodontidés au sein des placodermes. Cette découverte était encourageante, car les Ptyctodontidés sont mal connus et notre spécimen semblait représenter une nouvelle espèce. Mais elle allait se révéler encore plus intéressante.

Pendant que je retirais le calcaire, mon attention fut attirée par des structures inhabituelles à la base de la queue. En les examinant de près au microscope, je vis de petites mâchoires à côté de quelques autres minuscules ossements. Je compris alors ce dont il s'agissait et vécus l'un de ces sublimes moments de découverte que les chercheurs – s'ils ont de la chance – ne connaissent qu'une fois dans leur vie.



CE CORDON OMBILICAL FOSSILISÉ reliait il y a environ 375 millions d'années une femelle de l'ancien poisson placoderme *Materpiscis* à l'embryon qui se développait dans son ventre. *Materpiscis* constitue le plus ancien exemple connu de vertébré qui s'accouplait et mettait au monde des petits entièrement formés.

L'AUTEUR



John LONG, paléontologue australien, est depuis 2009 vice-président de la recherche scientifique et des collections au Muséum d'histoire naturelle du comté de Los Angeles, aux États-Unis.

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. Ahlberg *et al.*, Pelvic claspers confirm Chondrichthyan-like internal fertilization in Arthrodires, *Nature*, vol. 460, pp. 888-889, 2009.

J. A. Long *et al.*, Devonian Arthrodire embryos and the origin of internal fertilization in vertebrates, *Nature*, vol. 457, pp. 1124-1127, 2009.

M. Brazeau, The braincase and jaws of a Devonian « acanthodian » and the origin of modern gnathostomes, *Nature*, vol. 457, pp. 305-308, 2009.

J. A. Long *et al.*, Live birth in the Devonian period, *Nature*, vol. 453, pp. 650-652, 2008.

J. A. Long, *Swimming in Stone*, Fremantle Press, 2006.

M. J. Cohn, Developmental genetics of the external genitalia, *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 545, pp. 149-157, 2004.

J'aurais pu supposer qu'il ne s'agissait là que des restes du dernier repas du poisson ; mais les mâchoires minuscules présentaient les mêmes caractéristiques distinctives que celles de l'animal plus grand, et étaient intactes et encore partiellement articulées. Tout indiquait que les os miniatures étaient ceux d'un embryon en cours de développement, et non ceux d'une petite proie.

En outre, une structure torsadée entourait le minuscule squelette. L'examen au microscope électronique à balayage nous permit d'affirmer qu'il s'agissait du reste minéralisé du cordon ombilical reliant l'embryon au sac vitellin (une réserve nutritive toujours présente au début de la vie des organismes). L'affaire était entendue : nous avions découvert une mère poisson vieille de 375 millions d'années et le plus ancien embryon de vertébré à ce jour.

Nous avons décidé de nommer l'espèce découverte *Materpiscis attenboroughi*, ce qui signifie « poisson mère d'Attenborough », en l'honneur du naturaliste et réalisateur britannique David Attenborough, qui fit connaître les fossiles de Gogo au monde entier grâce à la célèbre série documentaire *Life on Earth* (1979).

Materpiscis nous a permis de résoudre une vieille énigme posée par les Ptyctodontidés. À la fin des années 1930, l'anatomiste britannique David Watson avait observé que les mâles d'une espèce de Ptyctodontidés provenant d'Écosse avaient de longues extensions cartilagineuses sortant de la ceinture osseuse qui soutient les nageoires pelviennes. Ces extensions, qui devaient être recouvertes

de chair et de peau, forment des structures nommées ptérygopodes. Elles sont apparentées aux deux organes de la copulation présents chez tous les poissons cartilagineux (chondrichthyens) actuels. Durant la copulation, ceux-ci insèrent l'un ou l'autre de ces organes dans le corps de la femelle afin d'y introduire le sperme.

Cependant, les ptérygopodes des Ptyctodontidés écossais étaient recouverts de plaques osseuses, ce qui devait les rendre rigides et peu pratiques. En outre, si tous les ptérygopodes des chondrichthyens sont munis de crochets qui permettent de les maintenir en place durant l'accouplement, les crochets de ce ptyctodontidé étaient si développés qu'ils semblaient être plus un obstacle à l'accouplement qu'une aide.

La preuve d'une fécondation interne

Les mêmes caractéristiques curieuses sont apparues chez les Ptyctodontidés découverts ultérieurement. Les chercheurs se sont donc demandé si ces ptérygopodes s'inséraient vraiment dans le corps des femelles, s'ils servaient à les maintenir pendant l'accouplement, ou s'il ne s'agissait que d'ornements hérissés dont l'utilité se bornait à attirer un partenaire. Quant à décider si les Ptyctodontidés s'accouplaient ou frayaient, c'était impossible. D'où l'intérêt majeur de notre mère poisson : elle prouve que certains Ptyctodontidés au moins se reproduisaient par fécondation interne et mise au monde de petits entièrement formés.

Cette révélation nous a poussés à réexaminer d'autres fossiles de Ptyctodontidés découverts à Gogo. C'est ainsi que nous fûmes conduits à un spécimen d'*Austroptyctodus*, un autre genre de Ptyctodontidés, que j'avais préparé 20 ans plus tôt. En l'examinant au microscope avec un grossissement plus fort, je pus observer que des structures initialement interprétées comme des écailles détachées étaient en réalité des os d'embryons. Nous avons ainsi découvert une autre mère poisson, morte dans la fleur de l'âge et porteuse de triplés.

Après ces découvertes de Ptyctodontidés à embryons, nous avons entrepris d'étudier d'autres placodermes de Gogo. Nos travaux avaient mis en évidence la copulation et la viviparité chez les Ptyctodontidés, mais ces derniers ne sont que l'un des sept groupes connus de placodermes. Dans quelle mesure ce nouveau mode de