

s'étaient modifiées de telle sorte que la forme activée par la lumière était devenue plus stable et donc plus efficace. J'ai émis l'hypothèse que ce changement a également bloqué la voie biochimique par laquelle la rhodopsine activée revient à sa forme inactive, voie qui pour les rhodopsines rhabdomériques requiert l'absorption d'un second photon. Il fallait donc une autre réaction biochimique pour que la molécule redevienne activable. Je pense que les photorécepteurs ciliés auraient présenté un autre avantage par rapport aux photorécepteurs rhabdomériques dans des environnements tels que l'océan profond, où l'intensité lumineuse est très faible.

Dès lors, certains chordés primitifs (ancêtres des vertébrés) ont pu coloniser des niches écologiques inaccessibles aux animaux qui n'avaient que des pho-

va devenir l'œil forme un renflement donnant naissance à deux vésicules. Chacune d'elles se replie sur elle-même pour donner une rétine en forme de croissant, qui tapisse l'intérieur de l'œil. L'évolution a probablement suivi la même stratégie. Nous avons postulé qu'un proto-œil de ce type (avec une rétine en forme de croissant, à deux feuillets, composée de photorécepteurs ciliés à l'extérieur et de neurones de sortie issus des photorécepteurs rhabdomériques à l'intérieur) aurait évolué chez un ancêtre des vertébrés entre 550 et 500 millions d'années. Il aurait assuré le réglage de l'horloge interne et peut-être aidé l'animal à détecter les ombres et à s'orienter.

Au stade suivant du développement embryonnaire, la rétine se replie sur elle-même vers l'intérieur, le cristallin se forme à partir d'un épaississement de l'ectoderme

bipolaires de la rétine ressemblent tant aux cônes et aux bâtonnets, même si elles sont dépourvues de rhodopsine et qu'elles reçoivent des informations non pas de la lumière, mais d'une substance chimique – un neurotransmetteur – libérée par les photorécepteurs.

Quelques erreurs...

Bien que les yeux de type caméra fournissent un vaste champ de vision (de l'ordre de 180 degrés), notre cerveau ne peut analyser qu'une fraction des informations disponibles à un instant donné, en raison du nombre limité de fibres nerveuses reliant l'œil au cerveau. Les premiers yeux de type caméra comprenaient vraisemblablement encore moins de fibres nerveuses. Ainsi, une pression de sélection considérable a probablement favorisé l'apparition de muscles permettant aux yeux de bouger. Ces muscles devaient sans doute exister il y a 500 millions d'années, car ils sont présents chez la lamproie, dont la lignée a divergé à cette époque, et arrangés à peu près comme chez les vertébrés à mâchoires, dont nous faisons partie.

À côté des caractéristiques qui rendent l'œil des vertébrés si performant, certaines sont moins adaptées. Par exemple, l'agencement des couches de cellules constituant la rétine : il faut que les rayons lumineux traversent toute l'épaisseur de la rétine, si bien que les prolongements et les corps cellulaires des neurones de sortie dispersent la lumière et dégradent la qualité de l'image. C'est seulement après avoir traversé cet amas de neurones que la lumière atteint les photorécepteurs. De surcroît, les vaisseaux sanguins recouvrant la surface interne de la rétine projettent des ombres parasites sur la couche des photorécepteurs. Enfin, la rétine présente un point aveugle, l'endroit où les fibres nerveuses se rassemblent pour former le nerf optique, traversent la rétine et ressortent à l'arrière (voir l'encadré page 37).

Ces défauts ne sont pourtant pas inévitables. En effet, l'œil de type caméra des poulpes et des calmars, apparu indépendamment, ne les présente pas. En considérant l'œil des vertébrés dans le contexte de l'évolution, ces défauts apparaissent comme des conséquences d'une séquence d'étapes évolutives, chacune ayant conféré un bénéfice à nos ancêtres vertébrés, avant même qu'ils aient pu voir. ■

L'ŒIL DES VERTÉBRÉS, si performant soit-il, présente des défauts : l'évolution ne conduit pas forcément à la perfection.

torécepteurs rhabdomériques. Non pas parce que la rhodopsine des photorécepteurs ciliés leur conférait une meilleure vision (les autres composants essentiels de l'œil de type caméra n'étaient pas encore apparus), mais parce qu'elle permettait de mieux capter la lumière et de synchroniser les horloges circadiennes et saisonnières.

Pour ces anciens chordés des grandes profondeurs, les photorécepteurs rhabdomériques peu sensibles, qui coexistaient avec les photorécepteurs ciliés, étaient quasi inutiles et, par conséquent, libres de remplir un nouveau rôle, celui de neurones transmettant des signaux au cerveau. La rhodopsine n'était plus nécessaire et aurait été éliminée par sélection naturelle de ces cellules.

Un œil est né

Ayant formulé une hypothèse plausible sur la façon dont les composants de la rétine des vertébrés étaient apparus, nous avons voulu comprendre comment, il y a environ 500 millions d'années, l'œil a évolué d'un organe captant la lumière, mais non destiné à la vision, en un organe formant des images. Là encore, nous avons trouvé des indices chez des embryons en cours de développement. À un stade précoce du développement, la structure neuronale qui

(les cellules de la surface externe de l'embryon), qui bourgeonne dans le creux du croissant rétinien. Ce bourgeon se sépare ensuite du reste de l'ectoderme pour devenir un élément flottant librement. Une séquence similaire de modifications se serait produite au cours de l'évolution. Nous ignorons quand cette modification a eu lieu, mais dans les années 1990, Dan-Eric Nilsson, de l'Université de Lund en Suède, a montré que les composants optiques de l'œil ont pu évoluer en un million d'années seulement. Si tel est le cas, l'œil formant des images serait apparu à partir du proto-œil en... un clin d'œil à l'échelle des temps géologiques.

Avec l'apparition du cristallin focalisant la lumière, la capacité de l'œil à collecter des informations a notablement augmenté. Des pressions de sélection auraient alors favorisé l'émergence d'un meilleur traitement des signaux dans la rétine, au-delà de ce que permettait la simple connexion des photorécepteurs à des neurones de sortie. Le processus de maturation des cellules de la rétine se serait alors modifié, de sorte que certaines cellules en cours de développement, au lieu de former des photorécepteurs ciliés, seraient devenues des cellules rétinienues bipolaires s'insérant entre le feuillet de photorécepteurs et le feuillet de neurones de sortie. C'est pourquoi les cellules



L'ESSENTIEL

✓ La température globale de la Terre s'est élevée de cinq degrés il y a 56 millions d'années en réaction à une augmentation notable des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

✓ Ce réchauffement ancien est souvent étudié pour comprendre le réchauffement actuel.

✓ Mais à l'époque, le dégagement de gaz était dix fois plus lent que celui qui se produit aujourd'hui.

✓ Or plus un changement climatique est rapide, plus les différentes formes de vie s'y adaptent difficilement.

Ron Miller



Le dernier grand réchauffement

Lee Kump

De nouveaux indices suggèrent que le plus brutal des réchauffements climatiques préhistoriques s'est fait à un rythme modéré comparé à celui que nous connaissons aujourd'hui. Cet épisode est riche d'enseignements pour notre futur.

La plupart des visiteurs du Spitzberg, la plus grande île de l'archipel norvégien du Svalbard, sont attirés par les ours polaires. Nous l'étions par ses roches. Durant l'été 2007, avec mes collègues, tous géologues et climatologues, nous avons débarqué sur cette île arctique avec l'espoir d'y trouver des preuves de ce que l'on considérait alors comme l'épisode de réchauffement global le plus brutal de tous les temps. Deux heures de marche en terrain accidenté nous séparaient encore des affleurements rocheux susceptibles de renfermer ces indices. Tandis que nous avançons sur des poches de neige glissante et des plantes rabougries, j'imaginai l'époque où des palmiers, des fougères et des alligators peuplaient probablement cette région.

En ce temps-là, il y a quelque 56 millions d'années, j'aurais été ruisselant de sueur. Les recherches ont montré qu'à cette époque, en l'espace de quelques milliers d'années (un bref instant à l'échelle des temps géologiques), les températures glo-

bales ont augmenté de 5 °C – une fièvre planétaire que les scientifiques nomment le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène. Les zones climatiques se sont décalées vers les pôles, sur terre et en mer, obligeant plantes et animaux à migrer, à s'adapter ou à mourir. Certaines des régions les plus profondes de l'océan se sont acidifiées et ont été privées d'oxygène, tuant nombre des organismes qui y vivaient. Il a ensuite fallu près de 200 000 ans pour que les mécanismes tampons naturels de la Terre fassent baisser la fièvre.

Le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène présente quelques ressemblances avec le réchauffement climatique d'origine humaine qui se déroule aujourd'hui. En particulier, le coupable était une libération massive, dans l'atmosphère et les océans, de gaz à effet de serre piégeant la chaleur, comparable en volume à ce que libérerait notre combustion des ressources énergétiques fossiles si elle se poursuivait pendant plusieurs siècles au rythme actuel. La connaissance de ce qui

s'est exactement passé durant le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène pourrait nous aider à anticiper notre avenir. Mais jusque récemment, plusieurs interrogations demeuraient. Aujourd'hui, des réponses apportent une vision peu réjouissante : elles suggèrent que les conséquences du dernier grand réchauffement global de la planète n'étaient rien comparées à ce qui pourrait nous attendre, et elles confortent les prédictions selon lesquelles l'humanité souffrira si nous ne modifions pas notre comportement.

Le point de départ : des gaz à effet de serre

Les paléoclimatologues pensent aujourd'hui que le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène s'est déroulé selon le scénario suivant. Il aurait commencé, en quelque sorte, par la combustion de ressources fossiles. À l'époque, la Pangée, le