

Eau douce ou eau salée ?

La plus part des mammifères – notamment les plus grands – ne peuvent vivre sans eau douce. Les mammifères marins ont souvent des difficultés à en trouver. Les phoques et les otaries tirent leur eau douce des poissons qu'ils consomment (certains mangent de la neige), et les lamantins vont en chercher dans les rivières. Les cétacés tirent de l'eau de leur nourriture et avalent des gorgées d'eau salée.

Quand les baleines, issues d'un environnement terrestre, dépendant de l'eau douce, se sont-elles adaptées à l'ingestion d'eau salée ? L'étude de la concentration en isotopes de l'oxygène (^{16}O et ^{18}O) dans les fossiles a apporté des éléments de réponse. L'eau salée contient plus de ^{18}O que l'eau douce : les masses d'eau salée étant supérieures à celles d'eau douce, l'évaporation est supérieure pour les océans. Comme l'isotope 16 est plus léger que le 18, il s'évapore préférentiellement, de sorte que les océans sont plus riches en isotope 18 que les étendues d'eau douce. Or, l'oxygène de l'eau que l'on voit se fixer dans les dents et dans les os en développement, de sorte qu'en fonction des rapports isotopiques de l'oxygène, on sait si l'ani-

mal a plutôt consommé de l'eau douce ou de l'eau salée. L'analyse de la concentration en isotopes dans les restes de *Pakicetus*, la baleine la plus primitive, montre que l'animal buvait de l'eau douce ; il devait passer l'essentiel de son temps sur la terre, comme l'indiquent d'autres données morphologiques. Certains fossiles d'*Ambulocetus* semblent avoir aussi consommé de l'eau douce. L'animal aurait été marin, puisque les fossiles ont été retrouvés dans des roches sédimentaires marines, mais devait rejoindre la terre pour s'abreuver. Peut-être restait-il à terre dans sa jeunesse, durant la formation des dents, puis, plus âgé, vivait-il exclusivement en mer.

Les protocétidés, dont le squelette montre des adaptations plus prononcées à la vie aquatique, présentent des concentrations en isotopes de l'oxygène qui correspondent à celles de l'eau de mer. Ainsi, quelques millions d'années après l'apparition des premières baleines, leurs descendants étaient adaptés à l'eau de mer. Cette innovation physiologique a certainement joué un rôle important dans la colonisation de toutes les mers par les protocétidés.

et à la réception de sons hautes fréquences (autorisant la chasse par écholocalisation), les baleines à fanons acquéraient la possibilité d'émettre et de recevoir les sons basses fréquences, pouvant ainsi communiquer à longue distance. Il y a quelque 28 millions d'années, les premiers odontocètes avaient déjà certaines des structures osseuses nécessaires à l'écoute de sons hautes fréquences et, par conséquent, se repéraient déjà partiellement par écholocalisation. Quant aux mysticètes, dont les premiers représentants datent de 34 millions d'années, on ignore comment ils ont acquis la capacité de détecter les basses fréquences.

Une autre modification notable du crâne est le déplacement des cavités oculaires : chez *Pakicetus* et *Ambulocetus*, elles sont au sommet de la tête, comme chez le crocodile, tandis qu'à partir des protocétidés elles se déplacent vers les côtés. L'orifice nasal migre de l'avant du museau chez *Pakicetus* vers l'arrière de la tête chez les cétacés modernes, se transformant en évent. La dentition, elle aussi, évolue d'une multitude de molaires pointues et tranchantes chez les ancêtres des mammifères, vers une série de dents ressemblant à celles des odontocètes modernes, qui avalent leur nourriture sans la mâcher. Les mysticètes, quant à eux, ont perdu toutes leurs dents en même temps et ont acquis des fanons en peigne implantés dans la mâchoire supérieure et qui filtrent le plancton de l'eau de mer.

La principale adaptation des baleines à la vie aquatique fut l'acquisition de la forme allongée et de la maîtrise de la nage qui en découle. Certaines formes amphibiennes étonnantes ont pavé le chemin de cette voie évolutive. Par exemple, *Ambulocetus* a hérité de ses ancêtres terrestres ses épaules flexibles et ses articulations du coude, du poignet et des doigts ; son bassin était assez solide pour supporter son poids sur la terre. Planté sur ses puissants membres postérieurs et sur des pieds en forme de pagaies, il devait avancer d'une démarche maladroite. Au contraire, dans l'eau, il devait retrouver toute son aisance.

La nage en haute mer a imposé des modifications supplémentaires, dont la plupart sont apparues avec les protocétidés. L'étude de *Rhodocetus* montre que l'os du membre inférieur était raccourci et qu'il commençait à devenir efficace pour la nage. Les pieds de l'animal, longs et fins, étaient probablement palmés. Le bassin de *Rhodocetus* présente également quelques modifications : certaines vertèbres du sacrum ne sont plus soudées, libérant le bas de l'épine dorsale, qui pouvait renforcer le battement de la queue. *Rhodocetus* nageait sans doute en surface comme un chien, et sous l'eau en utilisant ses membres postérieurs et sa queue. Quand il sortait de l'eau pour s'accoupler ou pour se réchauffer au soleil, *Rhodocetus* avançait probablement en se dandinant, tel un phoque ou un éléphant de mer moderne.

Avec *Dorudon* et *Basilosaurus*, les baleines sont devenues exclusivement aquatiques. Comme chez les cétacés modernes, leur épaule était mobile, contrairement au coude et au poignet, qui formaient des sortes de nageoires, leur permettant de se diriger et d'assurer leur équilibre. Seules de minuscules pattes postérieures persistaient, de sorte que le bassin était notablement réduit. Mark Uhen, de l'Institut des sciences de Cranbrook, a trouvé que l'une des vertèbres de la queue du *Dorudon* était arrondie. Les baleines modernes ont un os semblable à la base de l'aile, la petite structure plate et horizontale qui recouvre la queue. On en déduit que *Dorudon* et *Basilosaurus* avaient des ailerons arrière et nageaient comme les baleines modernes, grâce aux oscillations de la queue ; ce mode de propulsion est très efficace, car tous



4. LE DORUDON, qui mesurait environ 4,5 mètres, était un archaécète ressemblant aux dauphins. Il sillonnait les mers il y a quelque 40 à 37 millions d'années, et serait l'ancêtre des baleines modernes.

les points de la colonne vertébrale participent aux battements et l'aileron allège la queue.

On ignore précisément à quelle période les baleines ont perdu leurs pattes. Lawrence Barnes, du Muséum d'histoire naturelle de Los Angeles, a récemment mis au jour dans l'état de Washington le squelette d'une baleine datant de 27 millions d'années qui avait des membres postérieurs développés : les membres ont persisté plus longtemps qu'on ne le pensait. Toujours est-il qu'aujourd'hui, 50 millions d'années après leurs ancêtres quadrupèdes, les cétacés n'ont plus que de minuscules vestiges de membres postérieurs, invisibles de l'extérieur, et que leur bassin est notablement réduit au point qu'il n'est relié qu'à quelques petits muscles qui ne servent plus à la locomotion.

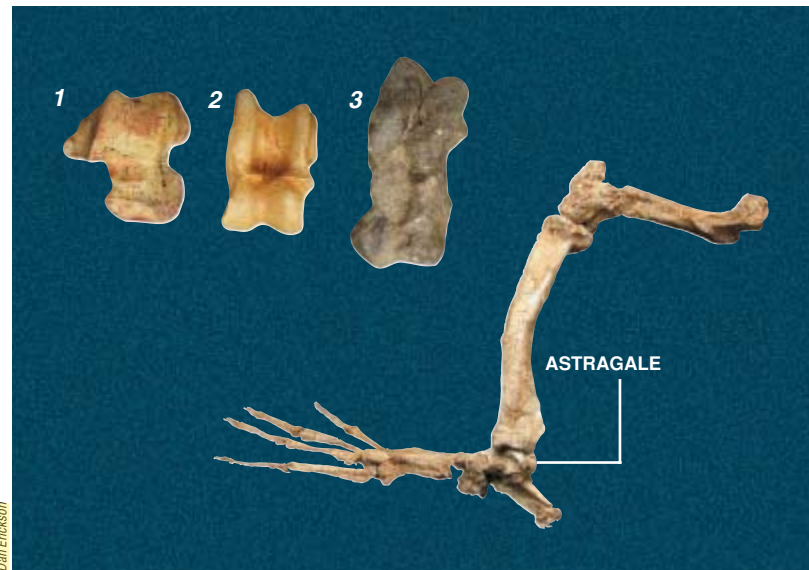
La parole à l'ADN

Dans les années 1980 et 1990, tandis que les paléontologues étudiaient la morphologie des fossiles et en déduisaient que les baleines descendent des mésonychidés, les biologistes retraçaient l'histoire évolutive des cétacés en analysant l'ADN des baleines modernes. Ces études moléculaires confirmèrent les conclusions de Boyden faite dans les années 1960 : les baleines sont plus proches des artiodactyles que de tout autre mammifère vivant, et, qui plus est, elles seraient des artiodactyles, l'un des nombreux rameaux sur cette branche de l'arbre des mammifères. De surcroît, ces études ont révélé l'existence d'un lien étroit entre les baleines et les hippopotames. Les diverses études de l'ADN, notamment celle de Norihiro Okada et de ses collègues de l'Institut de technologie de Tokyo, étaient convaincantes, mais comment pouvait-on concilier l'hypothèse de l'hippopotame, ancêtre des baleines et les conclusions des paléontologues ?

Les paléontologues décidèrent que la seule façon de le savoir était d'étudier les os de la cheville des anciennes baleines. On définit les artiodactyles sur la base d'un de ces os, l'astragale, qui favorise la mobilité. L'unique astragale des artiodactyles présente des gorges qui le font ressembler à une poulie à gorge double (voir la figure 5). L'une est reliée au tibia et l'autre à des os plus éloignés de la cheville. Si les baleines descendent des artiodactyles, leurs ancêtres encore mal adaptés à la vie aquatique devaient avoir un astragale en forme de poulie.

La dernière pièce du puzzle fut trouvée en automne 2001 par Ph. Gingerich et par H. Thewissen qui annoncèrent simultanément avoir découvert de nouveaux fossiles de baleines primitives. Dans l'Est de la province du Béloutchistan, l'équipe de Ph. Gingerich a mis au jour des squelettes articulés partiels de *Rodhocetus balochistanensis* et un nouveau genre de protocétidé, *Artiocetus*. Dans les collines Kala Chitta du Pakistan, H. Thewissen et ses collègues ont trouvé un fragment de *Pakicetus* et un autre d'un membre plus petit de la famille des pakicétidés, *Ichthyolestes*. Chacun de ces squelettes présente un astragale caractéristique des artiodactyles.

Ces découvertes ont renforcé les convictions des partisans de l'hypothèse selon laquelle les baleines descendent des artiodactyles. Bien que les hippopotames eux-mêmes soient apparus bien après les baleines, leur ancêtre présumé (l'antracothère, un animal dont la taille variait entre celle d'un chien ou celle d'un cheval et qui était inféodé aux marais) vivait au milieu de l'Éocène (peut-être même avant) et aurait un ancêtre commun avec les cétacés.



5. LES MEMBRES POSTÉRIEURS d'une baleine primitive, *Rodhocetus*, sont pourvus d'un os de la cheville nommé astragale. On a regroupé un astragale de mésonychidé (1), un astragale d'artiodactyle moderne (2) et l'astragale de *Rodhocetus* (3). Ils présentent la même forme de poulie à deux gorges qui caractérise tous les astragales d'artiodactyles. On en déduit que les baleines descendent non pas des mésonychidés, comme cela était admis, mais d'un ancien artiodactyle.

Si les artiodactyles semblent bien être les ancêtres des cétacés, pourquoi s'est-on si longtemps tourné vers les mésonychidés ? Les spécialistes de l'évolution pensent aujourd'hui que les ressemblances avec les mésonychidés reflètent une évolution convergente plutôt qu'un ancêtre commun, et que l'ordre des mésonychidés a représenté un cul-de-sac évolutif. Toutefois, cette opinion ne fait pas l'unanimité. Selon Maureen O'Leary, de l'Université de Stony Brook, les données morphologiques et moléculaires n'excluent pas que les mésonychidés appartiennent à la lignée des baleines. Les mésonychidés seraient d'anciens artiodactyles dont l'évolution de la cheville se serait inversée, et resteraient les plus proches parents des cétacés ; aujourd'hui, les hippopotames seraient leurs plus proches parents vivants. Certaines critiques se sont toutefois élevées contre l'inclusion des mésonychidés dans les artiodactyles : la validation de l'hypothèse des mésonychidés nécessiterait de renoncer à l'idée bien ancrée que l'astragale définit le groupe des artiodactyles.

Paléontologues et biologistes s'accordent à dire que seuls de nouveaux fossiles préciseront le lien entre les baleines et les artiodactyles, notamment des fossiles d'artiodactyles primitifs et surtout d'hippopotames primitifs. La prochaine étape sera de préciser comment les archaécètes ont évolué vers les mysticètes et vers les odontocètes, et quand ces derniers ont acquis leurs caractères « modernes ». Si les recherches avancent au même rythme que les 20 dernières années, la famille des cétacés sera bientôt au grand complet.

Kate WONG est écrivain et journaliste à *Scientific American*.

M. BENTON, *L'épopée des mammifères*, Édimages, 1991.

The Emergence of Whales : Evolutionary Patterns in the Origin of Cetacea, sous la direction J. Thewissen, Plenum Press, 1998.

J.-L. HARTENBERGER, *Une brève histoire des mammifères*, Belin-Pour la Science, 2001.