

qu'elles aient mesuré environ 50 centimètres de longueur, ces pattes ne servaient probablement pas à l'animal à nager, et encore moins à marcher sur la terre ferme. En revanche, elles pouvaient l'aider à s'accoupler dans l'eau. Quel que soit leur usage, si tant est qu'elles en aient eu un, leur présence sur ce fossile indique que des ancêtres des baleines avaient gagné les mers durant les dix millions d'années qui séparaient le *Pakicetus* du *Basilosaurus*. L'hypothèse de la baleine marcheuse devenait plausible.

Une autre découverte confirma l'hypothèse, en 1992. Une équipe menée par Hans Thewissen, de l'Université de médecine du Nord-Est de l'Ohio, découvrit au Pakistan dans des roches marines vieilles de 48 millions d'années un squelette quasiment complet d'un maillon séparant la baleine moderne de ses ancêtres terriens. Les larges pieds et la puissante queue de la créature indiquaient une grande habilité pour la nage, tandis que les os robustes de ses pattes et des articulations suggéraient que l'animal pouvait marcher. H. Thewissen dénomma la bête *Ambulocetus natans* : la baleine marcheuse et nageuse.

Adaptations évolutives

Depuis, H. Thewissen, Ph. Gingerich et d'autres paléontologues ont mis au jour de nombreux fossiles qui retracent les étapes de la conquête des mers par les baleines : le *Pakicetus* a engendré *Ambulocetus*, qui lui-même a donné les animaux à nez de marsouin, les rémingtonocétidés, et les protocétidés, qui ont été les premières baleines bien adaptées à la nage et colonisant l'ensemble des océans à partir de l'ancienne région indo-pakistanaise. Ensuite, sont apparus les dorudontines, qui avaient un aspect de dauphin et sont probablement les ancêtres des basilosaurines et des baleines modernes.

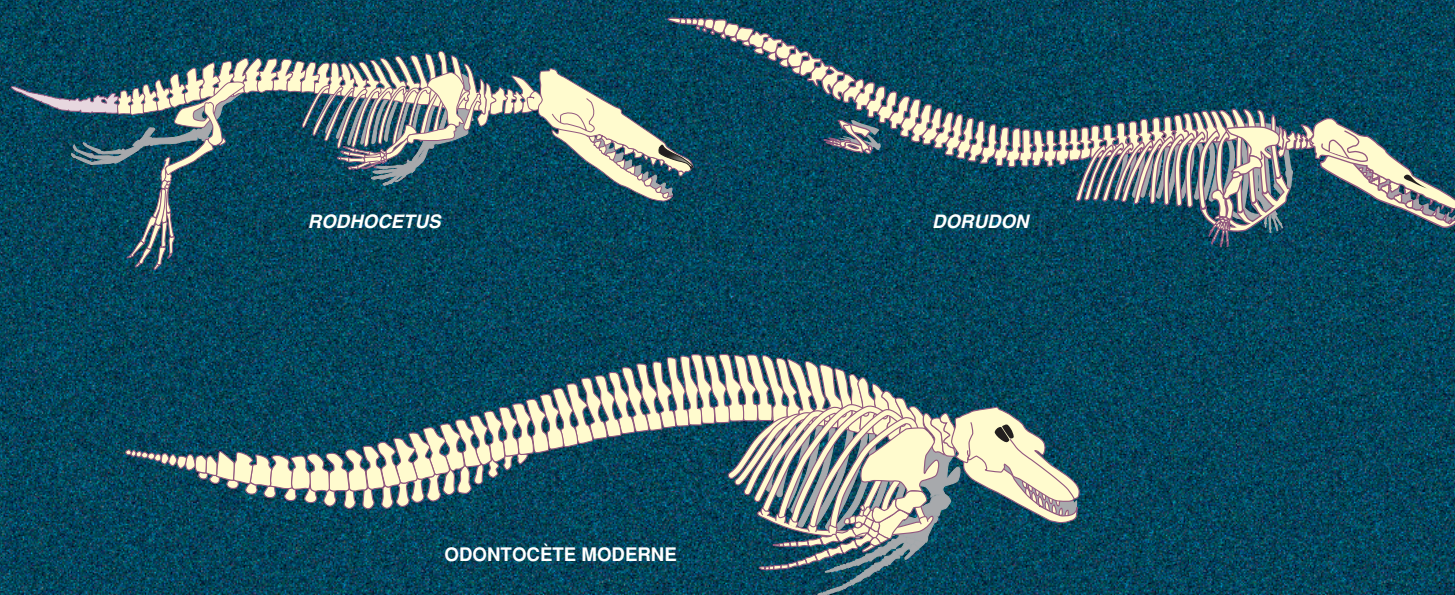
Grâce à ces fossiles, les paléontologues ont établi la généalogie des baleines, mais ils ont aussi identifié de nom-

breux changements anatomiques et physiologiques qui ont accompagné leur adaptation au milieu marin. L'une des premières modifications concerne l'ouïe. Tandis que les humains et les autres animaux terrestres ont des tympans plats et sensibles qui vibrent quand les ondes sonores les atteignent, les baleines modernes n'ont que des ligaments tympaniques, longs et épais, insensibles aux sons. À la place, un os dense, la bulla, transmet les sons de l'eau vers une région plus profonde de l'oreille.

La bulla de *Pakicetus* subit quelques modifications en ce sens, mais cet animal reste avant tout un mammifère terrestre dont le tympan était adapté à l'audition dans l'air. Alors, à quoi lui servaient ses épaisses bulla ? Selon H. Thewissen, à capter les vibrations transmises par le sol (comme les tortues qui «écoutent» par leur carapace). Ce prédateur aurait chassé en embuscade, attendant caché près d'une rivière, la tête au contact du sol, à l'affût de proies venant s'abreuver. Aujourd'hui le crocodile pratique ce mode de chasse en posant sa mâchoire sur le sol. *Ambulocetus* chassait aussi sans doute de cette façon, car il présente un début de jonction entre la mâchoire et l'oreille. Ce trait anatomique, qui a doté les premières baleines de la capacité d'entendre les vibrations du sol, leur aurait permis ultérieurement de percevoir les sons sous l'eau.

Zhe-Xi Luo, du Muséum d'histoire naturelle de Pittsburgh, a montré que du temps des premières baleines aquatiques, les basilosaurinés et des dorudontinés, les tympans avaient déjà évolué en ligaments tympaniques allongés ; les canaux auditifs s'étaient obturés pour permettre la plongée en eau profonde, et un canal rempli de graisse transmettant les sons jusqu'à l'oreille interne s'était développé à partir de la mâchoire.

La différenciation entre les baleines à dents, les odontocètes, et les baleines à fanons, les mysticètes, s'est faite après l'évolution du système auditif. Tandis que les baleines à dents développaient les traits nécessaires à la production



rieurs se sont transformés en nageoires, et la colonne vertébrale a évolué jusqu'à ce que les battements puissants de la queue autorisent la nage. Simultanément, le crâne a évolué permettant aux animaux d'en-

tendre sous l'eau, l'orifice nasal s'est déplacé vers le haut du crâne, et les dents se sont simplifiées en pinces. Puis, les dents des mysticètes ont été remplacées par les fanons des baleines.

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



University of Michigan exhibit Museum of Natural History

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.