

la conquête des mers

KATE WONG

L'étude de nouveaux fossiles et des analyses d'ADN ont éclairé l'origine des baleines : elles descendent des mammifères terrestres, probablement de l'ancêtre de l'hippopotame.



Un jeune *Eotitanops*, qui ressemble à un tapir, s'approche de l'eau pour s'abreuver. Embusquée dans la mangrove, une bête observe la scène et salive : l'*Eotitanops* est un mets de choix. Propulsée par ses puissants membres postérieurs, elle se jette sur l'animal, enfonce ses crocs dans sa proie, puis la traîne dans l'eau. Combat inégal. Victorieuse, la bête regagne la rive pour y dévorer son festin. À première vue, ce prédateur ressemble à un crocodile : les mêmes pattes recroquevillées, la queue puissante, un long museau et des yeux vissés sur le haut du crâne. Pourtant, de plus près, sa peau n'est pas faite de cuir épais, mais recouverte de fourrure ; il n'a pas de griffes, mais des doigts, et ses dents à plusieurs pointes en font un mammifère et non un reptile. Cette créature – *Ambulocetus* – est une baleine primitive, l'un des chaînons qui relient les ancêtres des cétacés aux quelque 80 espèces de baleines, de dauphins et autres marsouins qui peuplent aujourd'hui les océans.

Les biologistes de l'évolution ont longtemps considéré l'apparition des baleines comme une énigme. Les cétacés actuels sont dépourvus de membres et incapables de vivre hors de l'eau : quels liens peuvent-ils avoir avec les mammifères ? En 1851, Herman Melville a même assimilé Moby Dick et ses congénères à des poissons ! Pourtant, les naturalistes du XIX^e siècle, et, avec eux, Charles Darwin, considéraient ces animaux au sang chaud qui allaitent leurs petits et respirent de l'air, comme des mammifères. Or, les ancêtres des mammifères étaient terrestres, de sorte que ceux des baleines devaient l'être également.

Dans son ouvrage *De l'origine des espèces*, Darwin notait qu'un ours nageant le museau hors de l'eau pour attraper des insectes aurait pu être une « idée évolutive » précédant l'apparition des baleines. La suggestion ne suscita que railleries, au point que Darwin supprima le passage dans les éditions ultérieures en se contentant de noter qu'un ours était « presque comme » une baleine.

Dans les décennies qui suivirent, ni l'étude des fossiles disponibles – incomplets ou trop tardifs – ni celle de l'anatomie des cétacés contemporains ne renseignèrent les biologistes sur l'origine des baleines. Ainsi, en 1945, dans sa classification des mammifères, le paléontologue George Simpson écrivait que la baleine a évolué dans l'océan il y a si longtemps qu'aucune trace de ses ancêtres n'a été conservée. Toutefois, durant ces 20 dernières années, des progrès considérables ont été réalisés et l'énigme est aujourd'hui partiellement résolue. Après avoir analysé des fossiles de baleines datant de l'Éocène (entre -55 et -34 millions d'années), les paléontologues pensent que les ancêtres terrestres des cétacés auraient gagné la mer durant cette période. Ils ont également découvert que les baleines à fanons ont certainement divergé des cétacés à dents durant la période suivante, l'Oligocène, et ont déduit des données fossiles et de l'étude de l'ADN des cétacés vivants, où, quand et comment les cétacés ont évolué à partir de leurs ancêtres terrestres.

Le premier indice sur l'origine des baleines fut acquis grâce à une méthode mise au point vers 1945. Alors que Simpson classait les mammifères contemporains sur des critères purement anatomiques, la nouvelle méthode consistait à comparer des animaux vivants d'après les anticorps qu'ils produisaient

en réaction à certains antigènes. Alan Boyden et ses collègues de l'Université de Rutgers appliquèrent cette technique aux mammifères, et montrèrent que les cétacés sont proches (par leurs anticorps) des mammifères à nombre pair d'orteils, ou artiodactyles, un groupe auxquels appartiennent les chameaux, les hippopotames, les cochons et les ruminants. Les baleines étaient-elles elles-mêmes des artiodactyles ? Formaient-elles une branche évolutive distincte ayant un ancêtre commun avec les artiodactyles ?

Dans les années 1960, une étude des mammifères primitifs à sabots, les condylarthes, n'ayant pas encore acquis certaines caractéristiques des artiodactyles ou d'autres ordres de mammifères fit pencher la balance en faveur de la seconde hypothèse. Leigh Van Valen, alors au Muséum d'histoire naturelle de New York, découvrit des ressemblances étonnantes entre les dents à trois pointes des quelques fossiles de baleines et celles d'un sous-groupe de condylarthes carnivore, les mésonychidés. Il trouva également des analogies entre les artiodactyles et un autre groupe de condylarthes, les arctocyonidés, proches des mésonychidés. L. Van Valen en conclut que les baleines descendent des mésonychidés et qu'elles sont liées aux artiodactyles par leur ancêtre commun, les condylarthes.

Les baleines marcheuses

Une décennie s'écoula avant qu'on ne découvre de nouveaux fossiles de baleines suffisamment proches du point de divergence, pour que l'on puisse tester l'hypothèse de L. Van Valen. En 1977, le paléontologue Philip Gingerich, de l'Université du Michigan, recherchait au Pakistan des traces de mammifères terrestres de l'Éocène dans une région où l'on en avait déjà découvertes. L'expédition était décevante : la zone ne contenait que des fossiles marins. Il n'est pas étonnant de trouver des fossiles marins au Pakistan, si loin des côtes actuelles, car, durant l'Éocène, une vaste mer, la Téthys, recouvrait régulièrement ce qui est aujourd'hui le sous-continent indien. Toutefois, parmi ces anciens poissons et des coquillages, l'équipe de paléontologues découvrit deux fragments de bassin qui semblaient provenir d'un grand animal capable de marcher. Ph. Gingerich et ses collègues s'amuserent à imaginer une « baleine marcheuse », mais sans y croire tant l'idée leur paraissait saugrenue. Ils rentrèrent dans leur laboratoire, persuadés que la plus belle pièce ramenée était une mâchoire d'artiodactyle primitif, trouvée sur un autre site.

Deux ans plus tard, dans le Nord du Pakistan, aux pieds de l'Himalaya, l'équipe de Ph. Gingerich mit au jour, parmi des restes de mammifères vieux de 50 millions d'années, un autre fossile de baleine : un fragment de crâne d'une créature de la taille d'un loup pourvu de quelques caractéristiques des cétacés (notamment en ce qui concerne l'anatomie

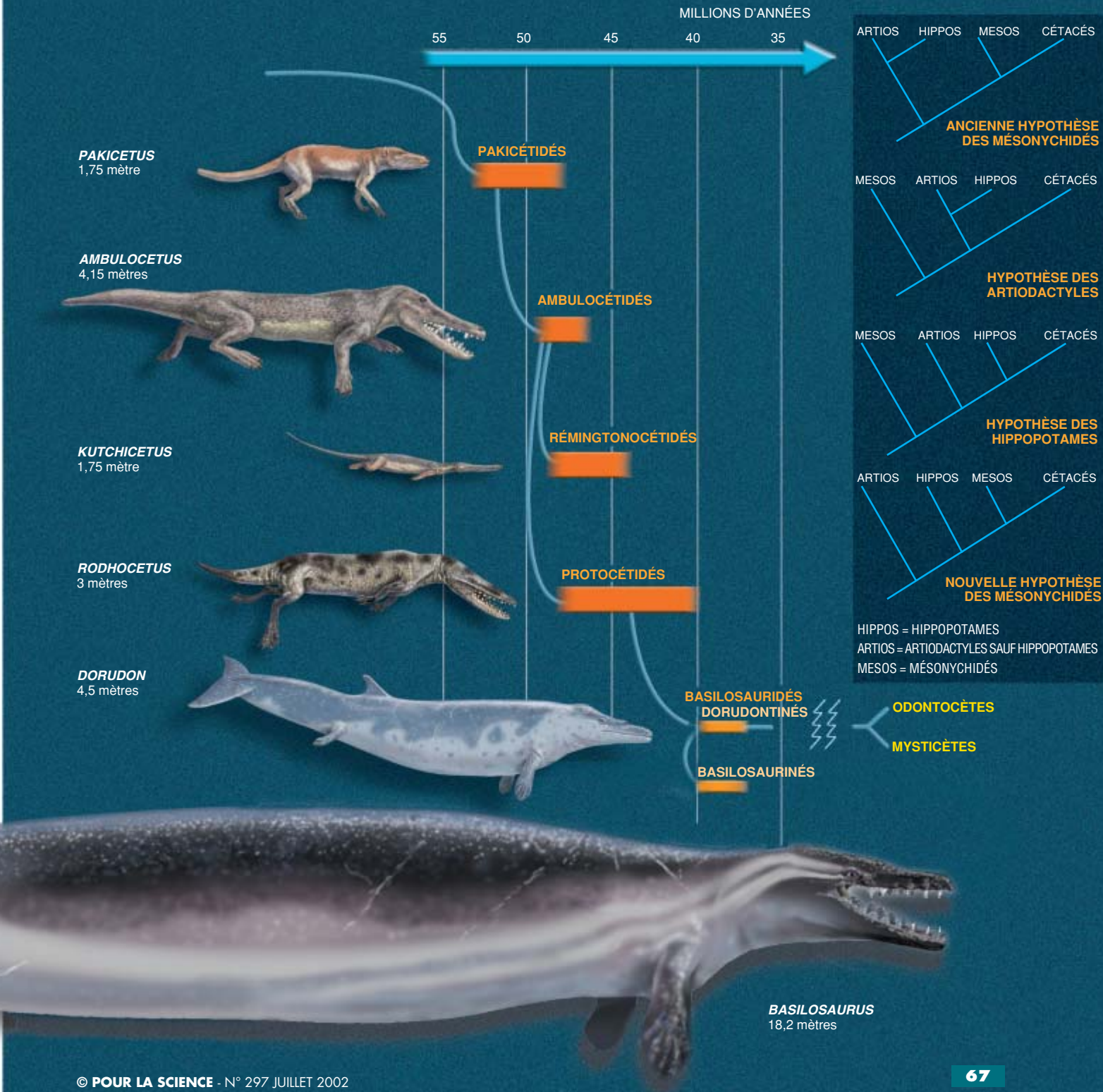


Portia Sloan et Edward Bell

L'ordre des cétacés

L'arbre phylogénique des cétacés aboutit aux deux sous-ordres modernes des baleines, les odontocètes et les mysticètes, à partir des archaeocètes éteints. On a représenté des membres de chaque famille ou sous-famille des archaeocètes (*à gauche*). Les quatre diagrammes (*à droite*) symbolisent les quatre hypothèses qui relient les cétacés aux autres mammifères. L'hypothèse la plus ancienne, selon laquelle les cétacés descendent des mésonychidés – un groupe d'animaux qui ressemblent au loup – paraît aujourd'hui improbable, à la lueur des derniers fossiles découverts (c'est l'ancienne hypothèse des mésonychidés). Les os de la cheville des baleines fossiles ressemblent

aux os de la cheville des artiodactyles : on en déduit que les baleines sont elles-mêmes des artiodactyles (hypothèse des artiodactyles). Des études moléculaires ont montré que les baleines sont plus proches des hippopotames que d'aucun autre artiodactyle. L'étude de nouveaux fossiles sera nécessaire pour valider l'hypothèse de l'hippopotame ancêtre de la baleine. Selon la quatrième hypothèse, les mésonychidés restent les parents les plus proches des cétacés, à condition qu'ils appartiennent aux artiodactyles et non aux condylarthes, ce que l'on n'admet pas encore aujourd'hui. Cela signifierait qu'ils ont perdu les os caractéristiques de la cheville des artiodactyles.





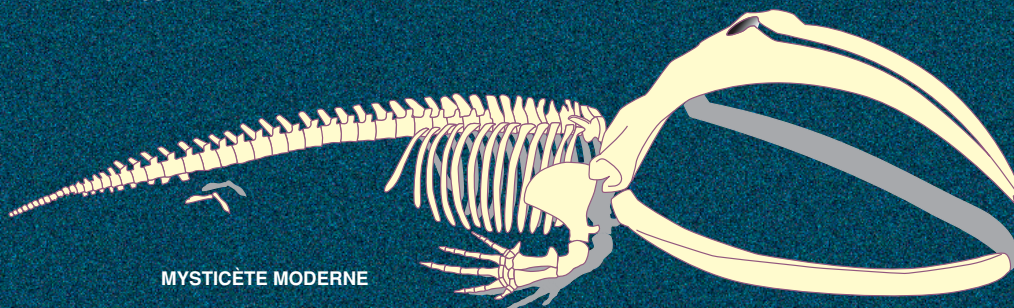
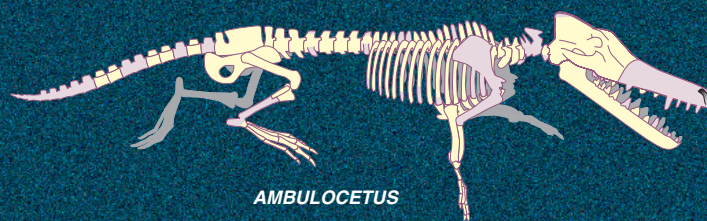
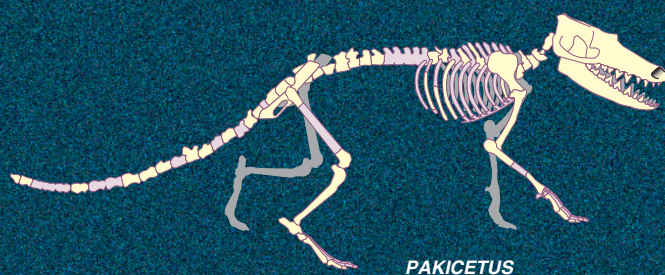
- PAKICÉTIDÉS ● AMBULOCÉTIDÉS ● PROTOCÉTIDÉS
- RÉMINGONOCÉTIDÉS ● BASILOSAURIDÉS ● LLANOCETUS

2. LA TÉTHYS était une vaste mer qui, durant une grande partie de l'Éocène (entre – 55 et –34 millions d'années), s'étendait de l'Espagne à l'Indonésie (a). L'Inde était alors une île, l'Australie ne s'était pas complètement séparée de l'Antarctique, et d'importantes régions de l'Afrique et de l'Eurasie étaient submergées. Ces eaux peu profondes, chaudes et riches en nutriments, regorgeaient de poissons. C'est pourquoi l'on trouve les fossiles d'animaux marins sur ce qui correspond aujourd'hui à des terres émergées (b). *Llanocetus* (34 millions d'années), une protobaleine de l'Antarctique, représente le maillon le plus ancien entre les ancêtres des cétacés et les cétacés modernes.

de l'oreille). L'anatomie des conduits auditifs du crâne fossile montrait que, contrairement aux baleines actuelles, l'animal ne devait pas localiser d'où venaient les sons, mais c'était à l'évidence des conduits auditifs de cétacés. L'équipe venait de découvrir la plus ancienne et la plus primitive des baleines connues, un animal qui passait sans doute une partie (si ce n'est la majeure partie) de son temps sur terre. Ph. Gingerich nomma la créature *Pakicetus* puisqu'elle avait été mise au jour au Pakistan, et se consacra désormais entièrement à la recherche d'autres ancêtres des baleines.

À la même époque, une autre équipe de paléontologues découvrit des restes de *Pakicetus* – un fragment de mâchoire inférieure et des dents isolées – qui ressemblaient beaucoup à ceux des mésonychidés. Or, il y a 50 millions d'années, à l'époque de *Pakicetus*, des mésonychidés peuplaient la région. On en conclut que les cétacés actuels descendent d'un mésonychidé ou d'un de ses proches parents. Toutefois, on ignorait encore à quoi ressemblaient ces toutes premières baleines.

Puis, en 1983, l'Union soviétique envahit l'Afghanistan, et les fouilles furent interrompues. Ph. Gingerich décida d'établir son champ de fouilles en Égypte, au Sud-Ouest du Caire dans la vallée du désert du Zeuglodon, ainsi nommée parce qu'on y a mis au jour au début du XX^e siècle les restes d'une baleine archaïque, le Zeuglodon. Comme le Pakistan, la majeure partie de l'Égypte était alors recouverte par la Téthys et les ossements des créatures primitives sont enfouis dans les sables du désert. Après plusieurs campagnes de fouilles, l'acharnement de Ph. Gingerich et de son équipe paya : ils découvrirent les membres postérieurs d'un ancêtre des baleines long de 18 mètres, le *Basilosaurus*, qui sillonnait les mers il y a entre 40 et 37 millions d'années. Auparavant, on avait retrouvé un morceau de fémur, sans pouvoir affirmer qu'il avait été fonctionnel. En revanche, les pieds et les pattes qui venaient d'être découverts étaient à l'évidence fonctionnels. Bien



3. LES PRINCIPAUX ARCHAEOCÈTES dont la lignée a abouti aux odontocètes (les baleines à dents) et aux mysticètes (les baleines à fanons) modernes révèlent quelques-unes des modifications morpholo-

giques qui ont assuré l'adaptation de ces animaux à la vie marine, en 15 millions d'années seulement (les os reconstruits sont colorés en jaune). Les membres postérieurs se sont raccourcis, les membres anté-

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.

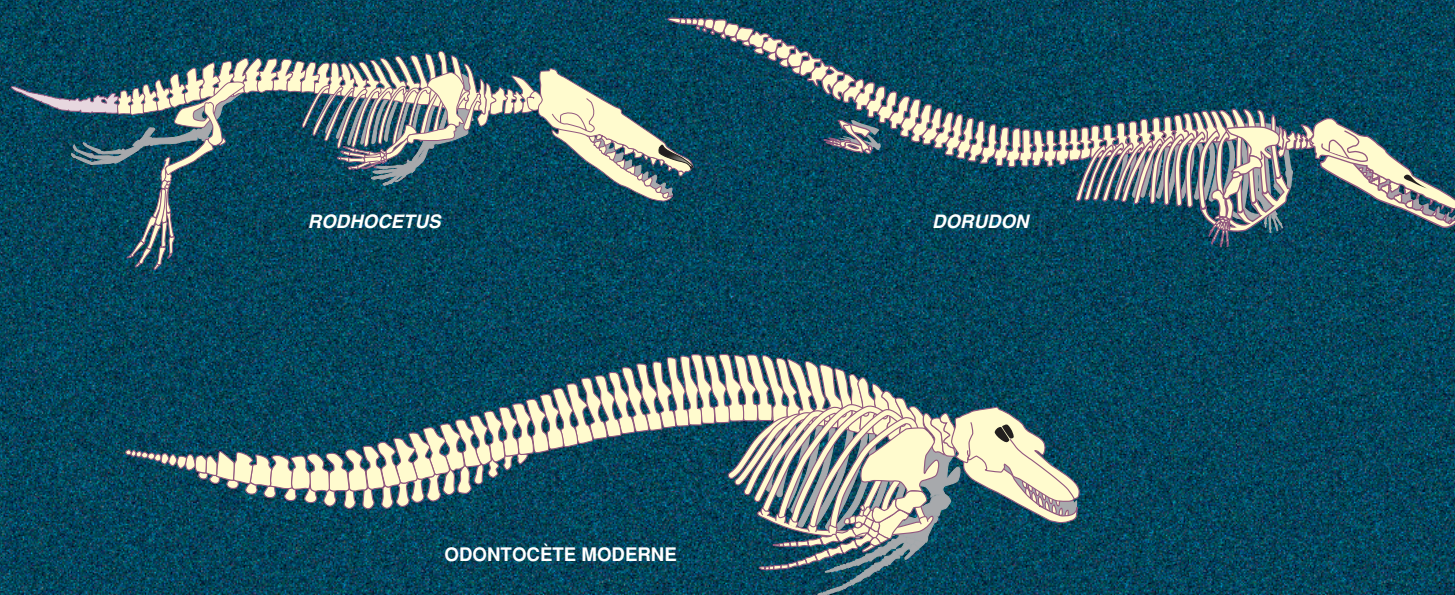
Grâce à ces fossiles, les paléontologues ont établi la généalogie des baleines, mais ils ont aussi identifié de nom-

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



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'aileeron 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.

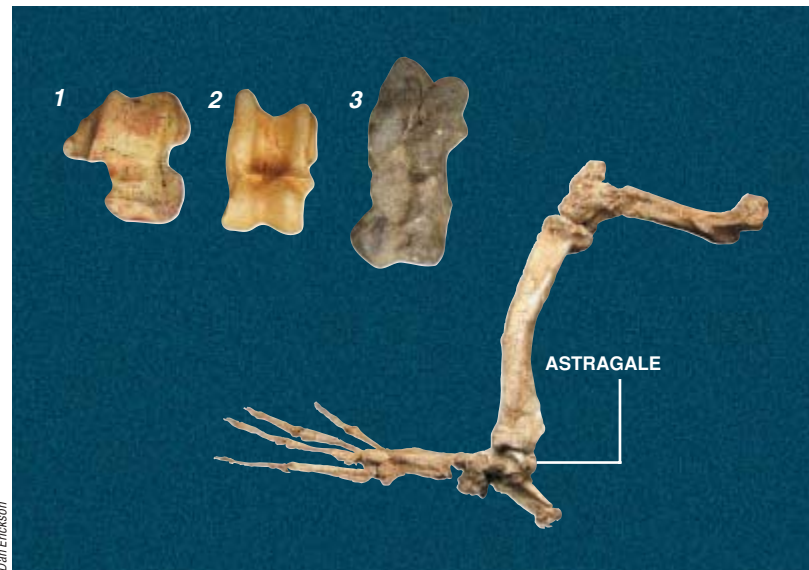
La parole à l'ADN

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 archaocètes 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.

Les constantes varient-elles?

JEAN-PHILIPPE UZAN

Deux constantes fondamentales de la physique semblent avoir varié au cours de l'histoire de l'Univers. Ces observations relancent un débat ancien sur la nature des lois physiques.

La plupart des physiciens croient que tous les électrons de l'Univers, sans exception, ont exactement la même masse, la même charge et le même spin. Ainsi formulée, cette affirmation pourrait passer pour une profession de foi. En réalité, elle est implicite dans la pratique scientifique elle-même, amplement justifiée par ses indéniables succès. Lorsque les physiciens reproduisent ou comparent des expériences pour tester les lois de la nature, ils doivent supposer que ces lois sont identiques en tout lieu et à toutes les époques. Cette hypothèse est souvent qualifiée de principe copernicien, car elle nous rappelle qu'on ne saurait justifier *a posteriori* le résultat d'une expérience en prétendant que nous occupons une place privilégiée dans l'Univers. Cette vision s'oppose à celle d'Aristote où les lois terrestres, bien qu'immuables et identiques en tout point de la Terre, diffèrent des lois célestes. Le principe copernicien est aujourd'hui au centre de nombreux débats théoriques. Les succès de la physique et de l'astrophysique modernes montrent qu'il est difficile d'envisager des lois physiques dont la structure prendrait des formes très différentes en divers points de l'Univers. En revanche, une lente variation des constantes fondamentales qui interviennent dans ces lois est envisageable sans remettre en cause l'essentiel des résultats déjà acquis. Si nous ignorons cette possibilité, nous risquons d'adopter sans le savoir une vision faussée de notre Univers. Au contraire, si nous en tenons compte, nous ouvrirons peut-être des fenêtres sur des théories physiques qui ne peuvent pas, pour le moment, être testées expérimentalement par d'autres moyens. Ainsi, cette question a fait l'objet de nombreuses études théoriques et expérimentales qui ont un point commun : elles constituent un test fondamental pour nos théories de la gravitation. Très récemment, une équipe d'astronomes a

annoncé que la constante de structure fine, une constante fondamentale, a varié au cours de la première moitié de l'histoire de l'Univers. Une autre équipe a publié des résultats indiquant une possible évolution du rapport des masses du proton et de l'électron. Avant de nous intéresser aux aspects les plus actuels de la quête d'une variation des constantes, commençons par rappeler les termes de ce débat déjà ancien.

L'ouverture de la boîte de Pandore

En 1937, le physicien et mathématicien Paul Dirac a, le premier, envisagé la possibilité que les constantes fondamentales varient, lorsqu'il proposa son hypothèse dite des grands nombres. Pour des raisons esthétiques, Dirac pensait que les lois de la nature ne devraient pas faire apparaître de constantes numériques très grandes ou très petites. Bien sûr, la valeur numérique que nous attribuons à certaines constantes, la vitesse de la lumière (299 792 458), par exemple, est due aux accidents historiques qui ont déterminé la définition de nos unités de mesure (ici la seconde et le mètre). Par conséquent, la question de Dirac n'a de sens que si l'on s'affranchit de l'arbitraire lié au choix des étalons de mesure : elle ne se pose que pour les grandeurs sans dimension, tel le rapport de la masse du proton à celle de l'électron (qui vaut environ 1836 dans tous les systèmes d'unité). Selon Dirac, certaines de ces constantes, tel le rapport de la force électrique à la force gravitationnelle entre le proton et l'électron (de l'ordre de 10^{40}), affichent des valeurs déraisonnablement élevées. En fait, cette remarque traduisait une interrogation sur le fondement de nos lois physiques. Ces lois font intervenir des constantes dont la valeur ne nous est pas donnée par la théorie, mais que