

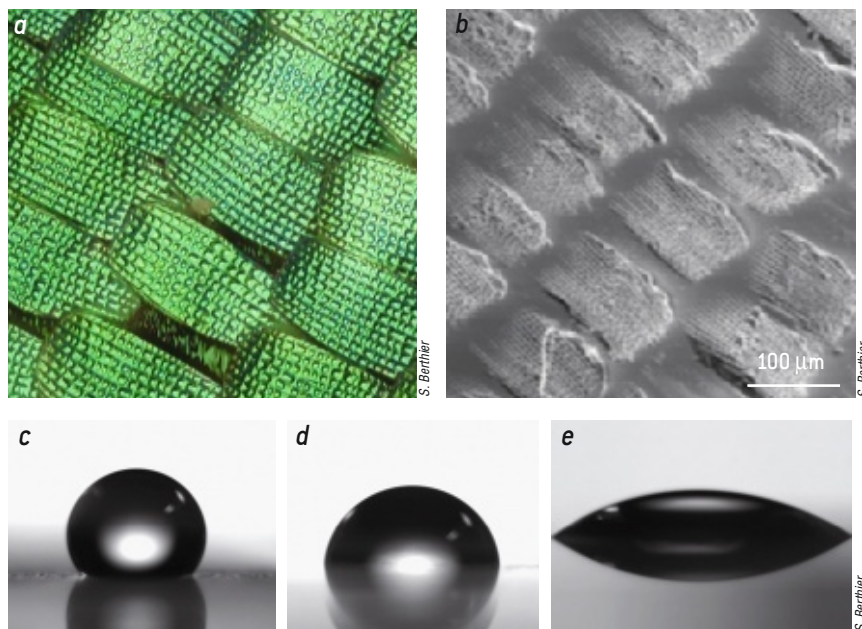
(à l'instar des mammifères, nombre d'oiseaux ne les voient pas). Les chercheurs se sont inspirés de ce phénomène pour développer des motifs antifalsification pour documents ou billets de banque.

Le champ électrique d'une onde électromagnétique est perpendiculaire à sa direction de propagation. Lorsqu'une onde électromagnétique atteint une surface plane, elle se réfléchit différemment selon que son champ électrique est parallèle à cette surface ou, au contraire, dans le plan d'incidence de l'onde (qui est perpendiculaire à la surface). En particulier, il existe un angle d'incidence – l'angle de Brewster, dont la valeur dépend uniquement de l'indice du matériau – pour lequel une onde polarisée selon cette seconde direction n'est pas du tout réfléchi (dans le cas des matériaux biologiques, l'angle est de l'ordre d'une cinquantaine de degrés). Une onde lumineuse quelconque réfléchi sous cette incidence est donc totalement polarisée dans la direction parallèle à la surface et on peut l'éteindre complètement avec un simple polariseur.

Des papillons aux billets de banque

Le phénomène est bien connu des photographes, qui utilisent ce principe pour éliminer les reflets à la surface de l'eau ou du verre. Si la surface n'est plus un simple dioptre, mais une structure multicouche engendrant une couleur par interférences, c'est cette couleur qui sera fortement polarisée et qu'il sera possible de faire apparaître ou disparaître à l'aide d'un polariseur. Sur les écailles du papillon *Papilio ulysses* (voir la figure 5a), par exemple, les côtés des alvéoles qui structurent leur surface réfléchissent une lumière bleue fortement polarisée, que l'on fait disparaître à l'aide d'un polariseur. La teinte vire alors au vert. Des structures de ce type, très délicates à reproduire et optimisées pour renforcer cet effet, sont utilisées pour faire apparaître des motifs cachés sur les billets de banque.

Dans le domaine thermique, enfin, les papillons ont développé un système d'autostabilisation de la température particulièrement ingénieux que l'on essaye de transposer sur des capteurs photothermiques, voire photovoltaïques. Les insectes, comme les capteurs, ne peuvent supporter une surchauffe prolongée et doivent maintenir leur température interne



5. IL EST AUJOURD'HUI POSSIBLE DE TRANSPOSER la structure des écailles du papillon *Papilio ulysses* (a, observées en microscopie optique) sur du verre par impression (b, microscopie électronique). Une goutte de liquide posée sur ce verre (c) est bien plus sphérique que sur un verre traité par voie chimique (d) ou non traité (e), ce qui traduit une plus forte hydrophobie.

en dessous d'une quarantaine de degrés Celsius. Cela est assuré par convection (transport de matière) et conduction vers le milieu extérieur, mais aussi par rayonnement. Par des mesures dans le moyen infrarouge, nous avons montré que la chitine, constituant majoritaire des ailes, présente un fort pic d'absorption des ondes de longueur d'onde comprise entre cinq et dix micromètres, c'est-à-dire en bordure du domaine d'émission thermique optimal de l'insecte. Ce pic agit comme un frein, une buttée pour les variations thermiques. Lorsque la température de l'insecte est optimale (vers 40 °C), le pic d'absorption de la chitine ne se superpose pas au spectre d'émission de l'aile; en d'autres termes, la chitine contribue très peu à l'émission thermique de papillon. En revanche, si l'insecte chauffe trop, le domaine d'émission thermique se décale (tout comme une barre de fer chauffée émet des ondes de plus en plus énergétiques, passant du domaine micro-onde à une lumière rouge) et se superpose au pic d'absorption de la chitine: la chitine participe alors à l'émission thermique du papillon, qui augmente, faisant baisser sa température. Lorsque le papillon est suffisamment refroidi, le spectre d'émission est à nouveau décalé par rapport au pic d'absorption de la chitine, et l'émission diminue, ce qui entraîne un réchauffe-

ment. Déplacé vers de plus hautes températures, un tel dispositif permettrait de stabiliser de façon passive la température des capteurs industriels et de prolonger ainsi leur durée de vie.

La photonique des organismes vivants n'intéresse pas seulement le biologiste. Elle fournit un chapitre de science en amont de l'ingénierie et c'est en partie cette science qui inspirera les ingénieurs. Emprunter des idées et des recettes à la nature n'est pas une nouveauté: en fait, il est rare qu'une invention ne soit pas la transposition d'une observation. L'industrie pourrait être intéressée de savoir qu'il n'est pas nécessaire de disposer de colorants pour colorer, et que la clé de cette performance est librement accessible sur les ailes de papillons, les élytres de coléoptères ou les plumes d'oiseaux. Les organismes vivants n'ont pas besoin d'une grande variété de matériaux pour nous fournir une grande variété d'effets visuels, du plus spectaculaire au plus discret. Les secrets de conception résident dans l'hétérogénéité et la complexité géométrique des matériaux.

Les processus qui sous-tendent l'évolution et la sélection naturelle sont des mécanismes puissants, qui favorisent la production d'organes d'une complexité et d'une efficacité étonnantes. De ce fait, les organismes vivants sont une source inépuisable d'inspiration pour l'ingénieur. ■

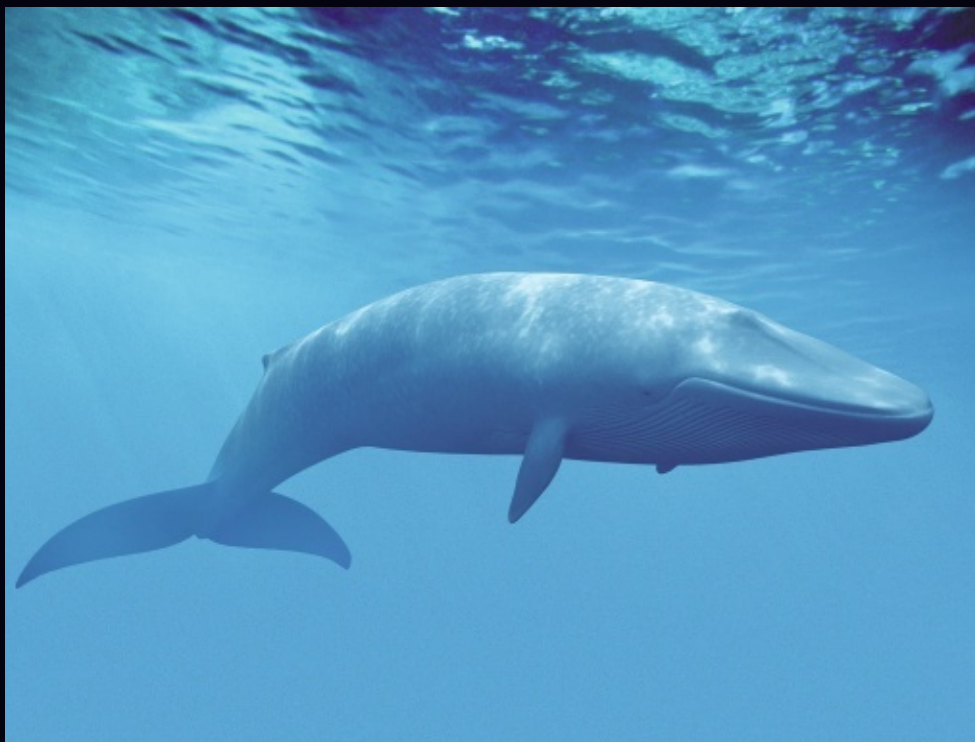
Les baleines engouffreuses

Jeremy Goldbogen

Comment certaines baleines à fanons parviennent-elles à consommer plus d'une tonne de krill par jour ? De nouveaux moyens d'observation ont révélé une biomécanique alimentaire originale.

En pleine mer, un rorqual commun affamé plonge pour effectuer une série d'accélération rapides, la gueule grande ouverte, au milieu d'un banc de petits crustacés pélagiques, le krill. À chacun de ces bonds vers l'avant, la baleine engouffre en quelques secondes une dizaine de kilogrammes de proies, contenus dans environ 70 000 litres d'eau, ce qui représente plus que son propre poids. Pour accélérer, elle fait osciller sa queue et ses nageoires. Lorsqu'elle ouvre sa gueule d'environ 90 degrés, l'eau s'y engouffre. La cavité buccale se distend grâce à des plis cutanés situés sous la tête, qui peuvent s'étirer considérablement. Quand les mâchoires sont refermées, le corps de la baleine prend la forme d'un « têtard boursoufflé ». Mais en moins d'une minute, toute l'eau engloutie est rejetée bouche fermée hors de la poche buccale, qui se dégonfle alors, les proies étant retenues par les fanons, lesquels jouent le rôle d'un tamis.

Ce comportement alimentaire, qualifié de nutrition par engouffrement (*lunge-*



© Denis Scott/Corbis

1. LES RORQUALS (telle cette baleine bleue, *ci-contre*) plongent à plus de 200 mètres de profondeur pour capturer des crustacés planctoniques et des petits poissons. Comme la baleine à bosse, ou mégaptère, ces baleines à fanons sont des « engouffreuses » procédant par accélérations successives. En augmentant leur vitesse et en ouvrant leurs mâchoires, elles emplissent leur cavité buccale extensible de tonnes d'eau de mer. Puis elles filtrent l'eau avec leurs fanons, lames cornées fixées à leur mâchoire supérieure, ce qui leur permet de retenir de grandes quantités de proies.

feeding, où l'anglais *lunge* désigne un brusque mouvement vers l'avant), permet à une baleine d'ingérer plus d'une tonne de krill en plusieurs heures de chasse ininterrompue, assez pour lui donner de l'énergie pour une journée. Paul Brodie, de l'Institut d'océanographie de Bedford, à Dartmouth, en Nouvelle-Écosse (Canada), l'a décrit comme « la plus puissante action biomécanique du règne animal ».

L'étude de ce type d'alimentation a longtemps été restreinte aux observations faites en surface. Ces dernières années, mes collègues et moi-même avons progressé grâce à la collecte de données enregistrées par des capteurs contenus dans des balises fixées sur le dos de rorquals. En particulier, et c'est ce que nous verrons ici, ces capteurs nous ont permis de mesurer les mouvements du corps lors de l'engloutissement de la nourriture. Munis de ces données, nous avons déterminé les forces mises en jeu et estimé la masse d'eau accumulée dans la cavité buccale. Ce faisant, nous avons confirmé des hypothèses reposant sur les seules connais-

L'ESSENTIEL

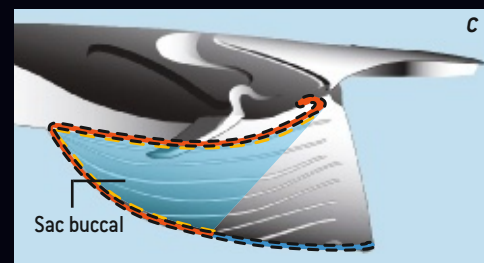
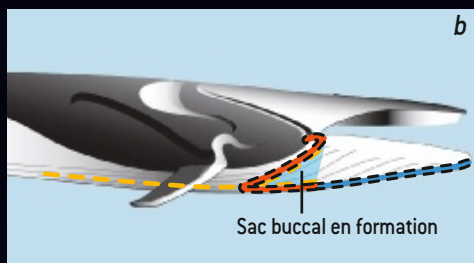
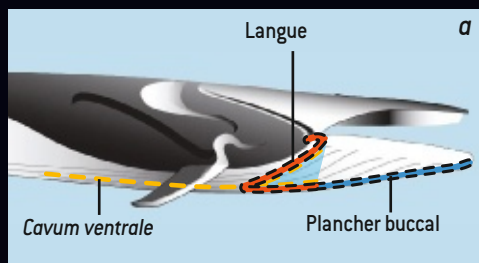
- ✓ Certaines baleines à fanons se nourrissent en profondeur de crustacés et de petits poissons.
- ✓ Elles engouffrent de grandes quantités d'eau de mer, ce qui leur permet de capturer jusqu'à une tonne de nourriture chaque jour.
- ✓ Le mécanisme d'engouffrement a été décrypté en posant sur des rorquals des balises dotées de capteurs.
- ✓ Il s'agit d'un processus actif gourmand en énergie qui oblige la baleine à limiter ses plongées en eaux profondes.

sances anatomiques et les observations en surface. En outre, nos analyses ont permis de découvrir de nouveaux mécanismes d'engouffrement, lesquels, à leur tour, nous ont conduits à étudier les remarquables adaptations morphologiques à l'origine de cet étonnant processus d'alimentation.

Des tonnes d'eau englouties

La stratégie d'alimentation par engouffrement est propre aux Balaenopteridés, une famille de cétacés à fanons, ou mysticètes, dotés d'une nageoire dorsale et qui comprennent la baleine à bosse, ou mégaptère (*Megaptera novaeangliae*), et les rorquals: la baleine bleue (*Balaenoptera musculus*), le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) et quatre autres baleinoptères.

Comme toutes les baleines à fanons, le mégaptère et les rorquals se nourrissent par filtration; ils séparent les petits crustacés et les poissons de l'eau engloutie en utilisant des lames de kératine – la protéine qui constitue les cheveux, les ongles et les



écailles de la carapace des tortues – qui pendent de leur mâchoire supérieure. Les baleines à fanons consomment de grandes quantités de proies, et certaines peuvent atteindre des tailles énormes – elles sont parmi les plus grands animaux qui ont jamais vécu, pouvant atteindre 30 mètres de longueur. Le mode d'alimentation par engouffrement est particulièrement inhabituel non seulement par la masse d'eau engloutie, mais aussi en raison de la biomécanique qui le rend possible.

De la souplesse dans les mâchoires

Nos premiers aperçus sur ce mode d'alimentation particulier sont venus des travaux des cétologues nord-américains August Pivorunas, Richard Lambertsen et Paul Brodie. Leurs recherches se sont focalisées sur les structures anatomiques en action, dont une série complexe d'adaptations morphologiques de la tête, de la bouche et de la gorge.

La tête des baleines engouffreuses apparaît plus reptilienne que mammalienne; sa forme satisfait des contraintes contradictoi-

res: l'engloutissement et la locomotion. D'un côté, on a une large bouche dilatable apte à engouffrer un énorme volume d'eau, de l'autre un corps capable de conserver une forme aérodynamique et de soutenir une nage efficace, en particulier au cours de longues plongées et migrations.

Chez les baleines les plus grandes, le crâne et les deux mâchoires inférieures (ou mandibules) sont massifs: ils constituent presque 25 pour cent de la totalité du corps. Les mandibules sont reliées à la base du crâne par de très grands coussinets articulaires constitués d'une matrice dense et élastique de fibres et de cartilage imprégnés d'huile. Ce type d'articulation est propre au mégaptère et aux rorquals, et peut-être aussi à la baleine grise (*Eschrichtius robustus*), qui se nourrit de coquillages et crustacés vivant dans la vase. Ces articulations, attaches flexibles entre le crâne et les mandibules, permettent aux mâchoires de s'ouvrir presque à 90 degrés afin d'engouffrer la plus grande quantité d'eau possible.

Chez certains mammifères, le point de jonction des mandibules à l'avant, la symphyse mandibulaire, est osseux et

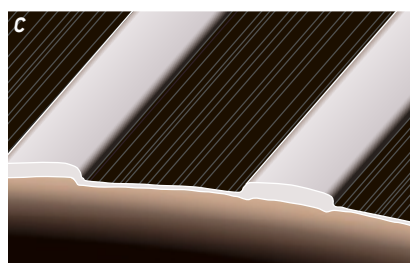
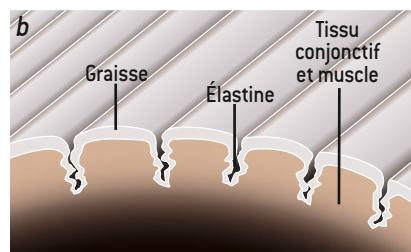
rigide. En revanche, celui des baleines engouffreuses a une composition fibrocartilagineuse qui le rend souple. Grâce à cette troisième articulation flexible, les deux mandibules incurvées peuvent pivoter ensemble vers l'extérieur et augmenter l'ouverture de la cavité buccale. La rotation mandibulaire est régulièrement observée chez la baleine à bosse et les rorquals lorsqu'ils s'alimentent en surface, et aussi chez des individus morts quand les muscles qui maintiennent la mandibule en place se relâchent.

Ainsi, l'articulation particulière de la mâchoire inférieure des baleines engouffreuses leur permet d'augmenter le flux d'eau entrant dans la cavité buccale. Un mécanisme des plus inhabituels facilite ce flux: la langue, flasque et déformable, car composée en grande partie de tissu graisseux élastique, peut s'invaginer dans un espace intramusculaire, le *cavum ventrale*, situé entre la face inférieure de la langue et les parois de la cavité buccale. De la sorte, elle recule vers le nombril pour former un grand sac qui se gonfle d'eau de mer engloutie (voir la figure 3).

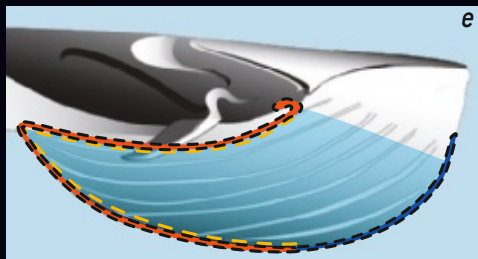
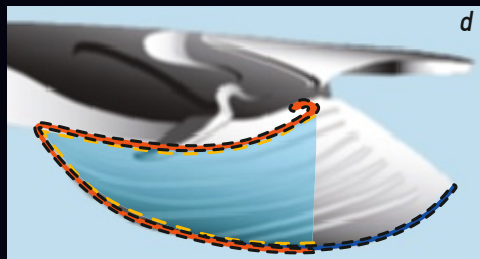
Une graisse très extensible

Cette distension extrême de la cavité buccale exerce une pression sur les parois du corps qui, chez les cétacés, sont composées de graisse ferme et de tissu conjonctif. Le mégaptère et les rorquals ont dans leur graisse ventrale une série de sillons longitudinaux, ou sillons gulaire, qui s'étendent du museau jusqu'au nombril; le nom «rorqual» vient du terme norvégien *røyrkval*, qui signifie «baleine à sillons». Cette graisse ventrale à sillons est constituée de lames de texture ferme séparées par des sillons profonds de tissu élastique (voir la figure 2).

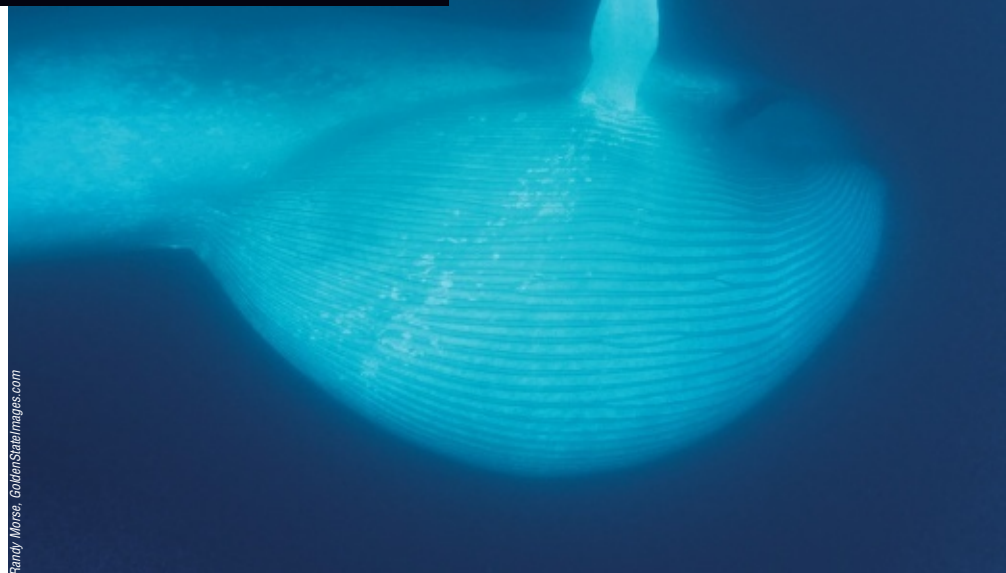
Observée en coupe, cette graisse a une architecture en accordéon qui peut facilement se déployer dès que le mus-



2. LA GRAISSE VENTRALE À SILLONS située sous la cavité buccale d'un rorqual rend cette dernière très extensible. Des lames fermes (a, blanches) sont reliées à de profonds sillons constitués de tissu élastique (a, noirs). La graisse à sillons est constituée de muscle, d'élastine et de graisse (b, en coupe). Des tests mécaniques ont montré qu'elle peut s'étirer de deux fois sa dimension au niveau des sillons élastiques (c).



Randy Morse. GoldenStateImages.com



cle sous-jacent se relâche. La formidable capacité d'engouffrement de ces baleines dépend ainsi de la morphologie exceptionnelle et du comportement mécanique de la graisse ventrale à sillons.

La première percée majeure concernant la biomécanique de l'engouffrement a été réalisée à la fin des années 1980 par Lisa Orton, de l'Université Duke, à Durham, et P. Brodie.

Ces chercheurs ont récupéré des échantillons frais de graisse ventrale à sillons d'une station de chasse à la baleine de Hvalfjörður, en Islande. À l'aide de tests mécaniques, ils ont découvert que la graisse ventrale à sillons et les couches musculaires associées peuvent s'étendre de manière réversible jusqu'à plusieurs fois leur longueur au repos. Ils ont attribué cette extensibilité extraordinaire aux grandes quantités d'élastine, une protéine élastique spécialisée, présentes dans le tissu, et au fait que celui-ci se déplie comme un parachute lorsque le muscle sous-jacent se relâche.

Mesurer la vitesse de nage

Quand la baleine accélère et abaisse ses mandibules, une pression hydrodynamique est créée dans la cavité buccale et sur son plancher. En théorie, cette pression peut à elle seule engendrer une force suffisante pour distendre la graisse ventrale à sillons et gonfler la cavité buccale, à condition que la vitesse de nage soit suffisamment élevée. L'engouffrement serait alors purement passif.

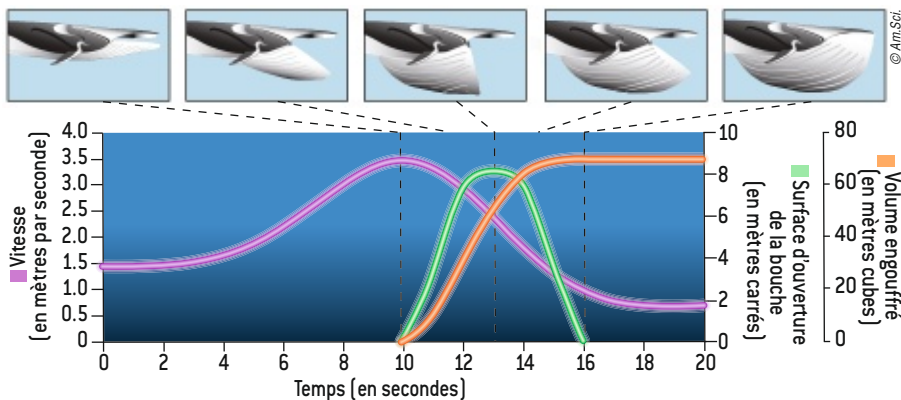
La force nécessaire pour étirer la graisse ventrale à sillons constitue donc un indice de la vitesse à laquelle une baleine doit nager pour que l'entrée d'eau soit massive et qu'un maximum de proies soient capturées. En assimilant la cavité buccale à un cylindre à parois minces, L. Orton et P. Brodie ont calculé qu'une vitesse de trois mètres par seconde suffirait pour remplir

complètement la cavité buccale d'un rorqual commun. Cette prévision concorde avec les observations de surface. Mais jusque récemment, il n'existait aucun moyen de mesurer avec précision la vitesse de nage d'un rorqual en chasse.

Tout a changé lorsque Bill Burgess, de la Société Greeneridge Sciences, à Santa Barbara, a mis au point une balise numérique à haute résolution que l'on peut fixer temporairement sur le dos de baleines lorsqu'elles font surface pour respirer (voir la figure 5). Ces balises, équipées de ventouses de fixation et d'un dispositif de flottaison permettant de les retirer, contiennent divers capteurs, dont un hydrophone, un transducteur de pression et un accéléromètre.

Les données collectées fournissent un aperçu du comportement sous-marin des cétacés : l'orientation du corps, les moments où ils nagent et ceux où ils glissent, et la profondeur de plongée. La mise en place de ces balises, à l'aide d'une longue perche en fibre de verre, n'est cependant pas aisée ; elle nécessite des années d'expérience en mer et un travail coordonné entre un navire de base et un bateau plus petit chargé de la fixation.

3. UNE JEUNE BALEINE BLEUE vient d'engouffrer une masse d'eau riche en krill. Sa cavité buccale est alors gonflée (ci-dessus). Au repos, sa langue (en haut à gauche, a, en rouge) est enroulée le long du plancher buccal (a, en bleu) et le *cavum ventrale*, un espace intramusculaire, (pointillés jaunes) est « comprimé ». Quand la baleine engloutit de l'eau, sa langue déformable s'invagine à travers le *cavum ventrale*, et le sac buccal ainsi formé commence à s'étendre et à se remplir d'eau de mer (b, en bleu). À l'ouverture maximale de la bouche, la langue est retournée et s'aplatit pour former une grande partie de la paroi du sac buccal ; le plancher buccal se distend également (c et d). Le volume de la cavité buccale devient alors maximal (e). La baleine chasse ensuite l'eau à travers ses fanons en la pressant de sa langue et de ses mâchoires.



4. LES DONNÉES FOURNIES par des balises électroniques fixées sur des baleines émergeant pour respirer ont permis de détailler les étapes de l'alimentation par engouffrement. Après avoir plongé à une profondeur de plusieurs centaines de mètres, le cétacé accélère dans un banc de krill (ligne violette), ouvre sa bouche (ligne verte), provoquant une grande force de traînée et une décélération. La cavité buccale se remplit d'eau (ligne orange), puis la baleine referme sa bouche, commence à filtrer l'eau et à se préparer pour la capture suivante.

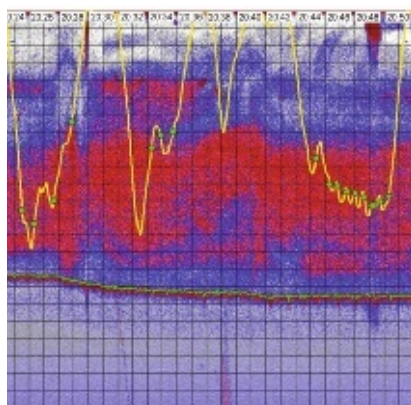
Ces opérations ont été dirigées par John Calambokidis et Greg Schorr, du *Cascadia Research Collective*, une organisation à but non lucratif d'Olympia, dans l'État de Washington, et Erin Oleson, de l'Institution d'océanographie Scripps, en Californie. Menées chaque été depuis 2002 au large des côtes californiennes et du Mexique, elles ont montré que les baleines plongent chaque jour à plusieurs reprises, dans certains cas jusqu'à 300 mètres de profondeur. Au plus profond de chaque plongée, se produit une série d'ondulations, accompagnées de mouvements de nage actifs et d'une diminution concomitante du bruit d'écoulement de l'eau, ce qui indique une réduction rapide de la vitesse.



5. FIXER UNE BALISE ÉLECTRONIQUE sur une baleine en surface n'est pas facile. Ici, une équipe de l'organisation non gouvernementale *Cascadia Research* place une balise sur un rorqual bleu grâce à une longue perche en fibre de verre. Le dispositif de flottaison rouge facilitera sa récupération quand les ventouses de la balise se détacheront du rorqual.

Une nage brusquement freinée

Ces données sont des indices d'engouffrements se produisant en profondeur. Elles ont été validées par un autre type de balise à ventouses : la *Crittercam* du *National Geographic*, conçue et développée par Greg Marshall. La caméra vidéo de cette balise est équipée d'un dispositif à infrarouge, qui filme dans l'obscurité au cours des plongées, et d'un enregistreur du temps et de la profondeur. La vidéo montre la baleine nageant en profondeur à travers des bancs denses de krill. La mandibule de la baleine s'abaisse, puis le bruit d'écoulement diminue, et la graisse ventrale à sillons s'étire. Tout cela fournit une confirmation visuelle du comportement que nous avons interprété à partir des données des balises numériques.



6. LES DONNÉES ÉLECTRONIQUES fournies par une balise fixée à une baleine à bosse montrent que celle-ci a plongé jusqu'à 140 mètres (lignes jaunes, chaque carré représentant 10 mètres) pour se nourrir de krill (en bleu : densité moyenne de proies ; en rouge : densité élevée). Cette baleine a réalisé une série d'accélération (points verts) avant de faire surface pour respirer, chaque plongée durant une dizaine de minutes.

Après des analyses plus poussées, nous avons remarqué que nous pouvions utiliser l'intensité du bruit d'écoulement enregistré par l'hydrophone pour calculer la vitesse de nage du rorqual à chaque fois qu'il se met en chasse. Ce « compteur de vitesse à bruit d'écoulement » a révélé à quel point les changements de vitesse sont rapides lorsque la baleine s'approche de ses proies. La vitesse maximale enregistrée pour les rorquals communs était de trois mètres par seconde, précisément celle qu'avaient calculée L. Orton et P. Brodie.

Les enregistrements ont également révélé qu'une décélération rapide du corps se produit, alors même que la baleine continue à nager activement ; cela indique que la baleine subit une puissante traînée lorsqu'elle ouvre largement la bouche – la traînée étant la résultante des forces s'exerçant dans la direction opposée à la progression de l'animal. De l'importance du freinage, on peut déduire non seulement la traînée subie, mais aussi la quantité d'eau engloutie par la baleine (voir la figure 4).

La taille et la forme des mandibules influent sur la taille et le gonflement de la cavité buccale, donc sur la quantité d'eau engloutie et, par conséquent, déterminent l'importance de la traînée. Afin de combiner les mesures morphologiques avec les données de mouvements obtenues grâce aux balises, Nick Pyenson, de l'Institution Smithsonian, Robert Shadwick, de l'Université de Colombie Britannique, et moi-même avons entrepris de mesurer le plus grand nombre possible de spécimens conservés dans des muséums (voir la figure 7).

Nous avons ainsi pu estimer la quantité d'eau engloutie par un rorqual commun à chaque capture de proies. Quand la gueule est ouverte au maximum, la cavité buccale se remplit à une vitesse d'environ 20 mètres cubes par seconde. À la fin d'une capture de six secondes, la masse d'eau accumulée est d'environ 60 tonnes, nouvelle confirmation de la prévision de P. Brodie. Le volume d'eau engouffrée a une masse comparable à celle d'un car scolaire, quantité colossale comparée au rorqual commun lui-même, qui pèse environ 45 tonnes.

En engloutissant un volume d'eau de masse supérieure à celle de son propre corps, la baleine subit une énorme traînée contre laquelle elle doit lutter en dépensant beaucoup d'énergie. Par rapport aux situations de nage normale, la traînée est

multipliée par cinq environ, et le travail effectué par l'animal triple.

Le coefficient de traînée mesure l'efficacité hydrodynamique d'un objet. De valeur élevée, il caractérise des formes peu hydrodynamiques. Ses valeurs basses indiquent au contraire que le corps de l'animal fend facilement l'eau. Nos calculs suggèrent que, pendant la durée d'une phase de capture, le coefficient de traînée fait plus que découpler, devenant très semblable à celui d'un parachute qui se gonfle. Cette analogie se comprend : un parachute a besoin d'une traînée pour se gonfler et ralentir sa chute, et la baleine a besoin d'une traînée pour gonfler sa cavité buccale.

Des baleines et des parachutes

Que l'alimentation par engouffrement implique la formation d'une forte traînée nous a conduits, avec R. Shadwick, à une collaboration des plus improbables avec Jean Potvin, un physicien parachutiste de l'Université Saint-Louis, dans le Missouri. Ensemble, nous avons développé un modèle détaillé de ce mode d'alimentation, inspiré de décennies d'études sur les parachutes.

Pour une morphologie et une vitesse initiale données, ce modèle prédit une décélération pour une baleine engloutissant passivement de l'eau et subissant une traînée. En comparant ses résultats aux données empiriques provenant des balises, nous avons testé des mécanismes particuliers d'engouffrement. La première question était la suivante : une baleine en train de se nourrir est-elle comparable à un parachute en train de se gonfler ? Si tel est le cas, la pression du flux d'eau nécessaire pour gonfler passivement la cavité buccale serait atteinte facilement en raison de l'extrême souplesse de la graisse ventrale à sillons.

Nos simulations ont toutefois montré que l'engouffrement passif n'est physiquement possible que pour des angles d'ouverture de la cavité buccale plus faibles et des volumes engloutis plus petits que ceux observés. Deux caractéristiques anatomiques clés ont suggéré un mécanisme d'engouffrement très différent. Plusieurs couches musculaires bien développées sont fermement attachées à la graisse ventrale à sillons des baleines. De plus, une étude réalisée par Merijn

de Bakker et ses collègues de l'Université de Leyde, aux Pays-Bas, a révélé que les muscles et les couches de graisse ventrale contiennent des nerfs sensibles à la tension mécanique. Les mécanorécepteurs sont concentrés dans chaque sillon, précisément la région du tissu qui s'étire au cours de l'engouffrement.

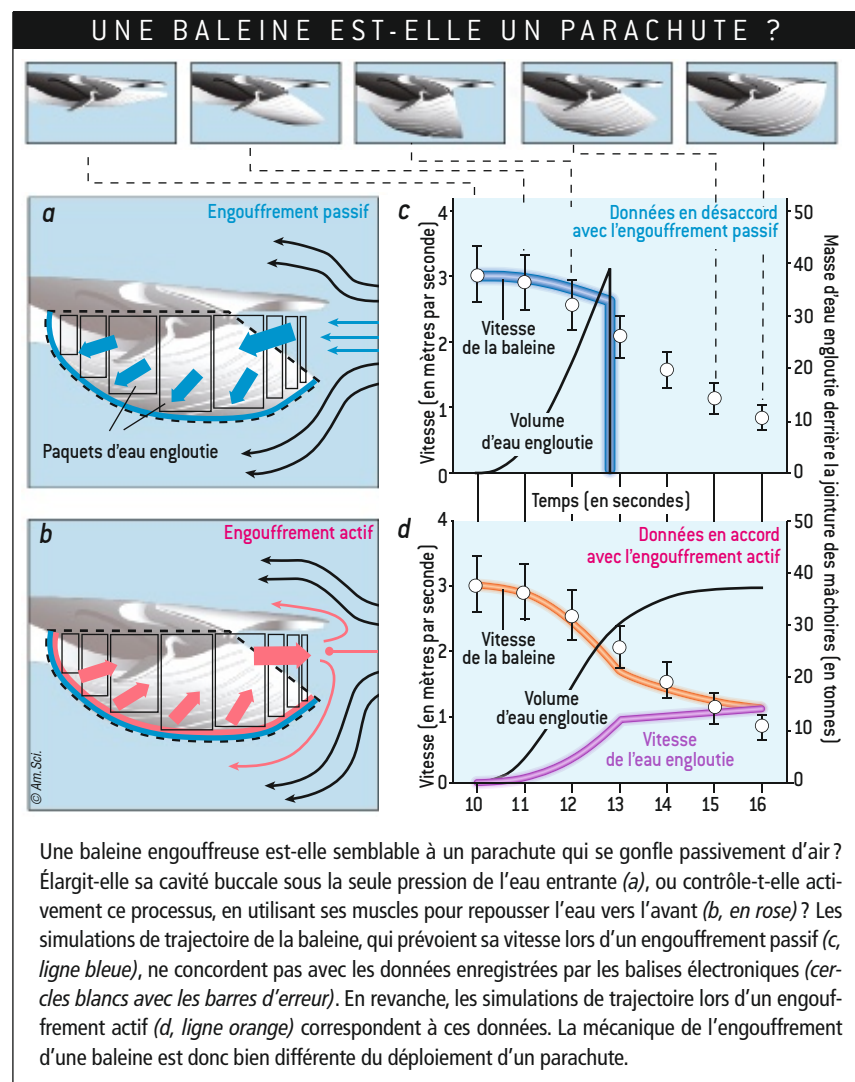
Ces deux indices suggèrent que le mégaptère et les rorquals peuvent « calibrer » la masse d'eau engloutie en fonction de l'étirement de la paroi buccale détecté par les mécanorécepteurs. Il leur est alors possible de produire une force musculaire suffisante pour repousser lentement le flux d'eau entrant. En vertu de la troisième loi du mouvement de Newton, selon laquelle tout corps exerçant une action sur un autre corps subit une réaction d'intensité égale et de sens opposé, la baleine communique sa vitesse de nage à l'eau engloutie ; l'animal ralentit tandis

L'AUTEUR



Jeremy GOLDBOGEN, cétologue, est chercheur à l'Institution Scripps d'océanographie de l'Université de Californie, à San Diego.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.



que l'eau accélère en pénétrant la cavité buccale, et finalement la vitesse de la baleine et la vitesse de l'eau s'équilibrent.

Les simulations de cet engouffrement actif concordent avec le profil de vitesse provenant des balises numériques (voir l'encadré page 45). Le mécanisme de nutrition par engouffrement diffère donc du gonflement passif des parachutes.

Bien que cela semble aller contre l'intuition, le fait de repousser l'eau vers l'avant au cours d'une capture présente certains avantages. D'abord, la force de traînée subie par la baleine est répartie dans le temps, ce qui la rend plus faible à chaque instant. L'engouffrement actif pourrait aussi accroître le rendement énergétique et mécanique de la filtration par les fanons.

Un filtre autonettoyant ?

En effet, la masse engloutie, à l'intérieur de la cavité buccale, longe la surface filtrante des fanons, et l'on peut penser que la baleine utilise un type de filtration dit tangentiel des particules contenues dans l'eau. Ce type de filtration est par exemple mis en œuvre par des procédés de purification de l'eau, de fabrication de la bière et du vin, de clarification de jus de fruits et de biotechnologies. Il a aussi été observé chez les poissons filtreurs. Par opposition à la filtration frontale, où le flux d'eau est perpendiculaire à la surface filtrante, ce

qui tend à encrasser rapidement le filtre de particules de grande taille, la filtration tangentielle éviterait que le krill ne se coince entre les fanons. Si cela advenait, on voit mal comment la baleine le détacherait de sa langue molle et peu musculeuse. Un jour, la technologie nous permettra peut-être de visualiser le mode de filtration d'un rorqual ou d'une baleine à bosse, ce qui mettrait fin à ces supputations.

La traînée élevée de l'engouffrement actif retentit sur la recherche de nourriture et la morphologie du cétacé. Non seulement la baleine doit dépenser beaucoup d'énergie pour accélérer la masse d'eau qu'elle engloutit, mais la traînée élevée lui fait perdre son énergie cinétique, stoppant presque sa progression. En conséquence, l'animal doit réaccélérer afin d'assurer la phase de capture suivante tout en continuant son apnée. Les engouffreuses épuisent ainsi rapidement leurs réserves d'oxygène et doivent revenir à la surface pour récupérer au bout d'une quinzaine de minutes. Ce laps de temps assez court est inattendu, car ces baleines sont très grandes, et chez presque tous les autres vertébrés respirant à l'air, le temps de plongée augmente habituellement avec la taille, en raison d'un métabolisme plus efficace.

Donald Croll et ses collègues, de l'Université de Californie à Santa Cruz, ont mesuré pour la première fois le temps de plongée d'engouffreuses, en l'occurrence de rorquals, au début des années 2000.

Ils ont fixé de simples enregistreurs de temps et de profondeur sur le dos de baleines bleues et de rorquals communs faisant surface. Les plongées qui impliquaient plus de phases de capture étaient suivies d'un temps plus long de récupération en surface. Ces chercheurs ont donc supposé que chaque phase de capture a un coût énergétique élevé. Cette hypothèse a été étayée depuis lors, non seulement pour les rorquals communs et les rorquals bleus, mais aussi pour les baleines à bosse.

Comme le temps de plongée est limité par son coût énergétique, ces baleines dépendent de la présence de concentrations denses de proies. De plus, on pense que leur morphologie est telle qu'elles peuvent engloutir autant d'eau que possible par plongée ; c'est sans doute pourquoi leur cavité buccale s'étend sur la moitié du corps, jusqu'au nombril, les mâchoires représentant presque le quart de la longueur du corps. Mais alors, l'appareil d'engouffrement ne pourrait-il être encore plus grand ? Quelles sont les limites à sa capacité ? Celle-ci change-t-elle avec la taille du corps ?

Ces questions m'ont conduit à consulter un ensemble de données morphométriques oubliées, provenant de la littérature consacrée à la chasse à la baleine. J'ai ainsi étudié les effets de la taille et de la morphologie sur les performances de la nutrition par engouffrement.

Que peut engouffrer une baleine ?

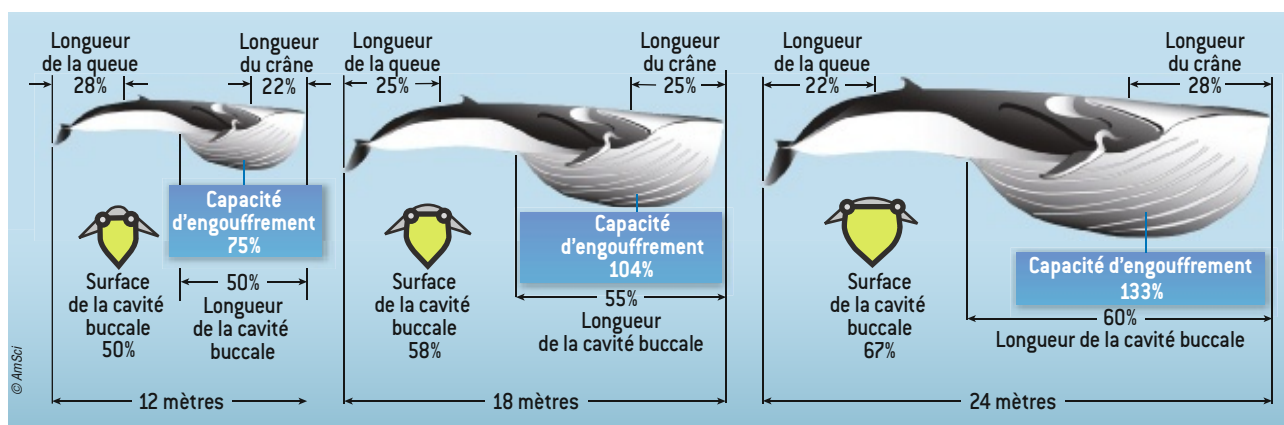
Dans les années 1920, le gouvernement britannique, cherchant à gérer l'industrie de la chasse à la baleine, a lancé une série d'expéditions, les *Discovery Investigations*, afin d'en apprendre plus sur l'histoire naturelle et la biologie des grandes baleines de l'océan Austral. Une étude particulière était consacrée aux proportions des deux plus grandes espèces de baleines, le rorqual commun et le rorqual bleu.

Ces espèces, parmi les plus grands animaux de tous les temps, présentent cependant une large gamme de tailles. Par exemple, la longueur au sevrage des rorquals communs et des baleines bleues est d'environ 12 et 16 mètres, respectivement, tandis que leur taille maximale est de 24 et 28 mètres. Lors des expéditions britanniques, des données morphométriques, dont certaines relatives à l'appareil d'engouffrement, ont été enregistrées sur des centaines de



7. LES SPÉCIMENS DE BALEINES du Muséum national d'histoire naturelle de l'Institution Smithsonian, aux États-Unis, comprennent, sur ce photomontage, les mandibules d'un rorqual bleu (de couleur grise) et d'un cachalot (de couleur jaune).

Nick Pyenson



8. QUAND UN RORQUAL COMMUN GRANDIT, sa cavité buccale ne s'accroît pas de façon linéaire, mais son rapport à la taille du corps augmente. La longueur de la cavité buccale par rapport à celle du corps passe de 50 à 60 pour cent, celle du crâne de 22 à 28 pour cent, tan-

dis que la part de la queue diminue de 28 à 22 pour cent. La surface de la cavité buccale augmente de 50 à 67 pour cent de la surface totale projetée du corps, et la capacité d'engouffrement augmente de 75 à 133 pour cent de la masse du corps.

rorquals communs et de rorquals bleus représentant ces gammes de taille.

Résultat : les baleines les plus grandes ont des mâchoires et des cavités buccales surdimensionnées par rapport à leur taille, tandis que la région située entre l'aile dorsal et la nageoire caudale devient relativement plus petite. Les auteurs de l'étude n'expliquaient pas cette morphologie, probablement parce que leurs données ont été recueillies avant que nous connaissions son importance sur les performances alimentaires.

Avec l'aide de mes collègues, j'ai repris les données britanniques concernant le rorqual commun, afin d'estimer sa capacité d'engouffrement en fonction de la taille. Comme nous l'avions prévu, la masse relative d'eau engloutie augmente avec la taille du rorqual, puisque l'appareil d'engouffrement devient plus grand.

Une question d'échelle

Question connexe : pourquoi la queue des baleines de grande taille est-elle relativement plus petite ? Peut-être parce que toutes les ressources liées à la croissance sont consacrées à la partie antérieure du corps, avons-nous suggéré. Lorsque les rorquals communs grandissent, leur capacité d'engouffrement augmente. Effectivement, le crâne devient relativement plus long et plus large par rapport au corps, et la surface d'ouverture de la cavité buccale est aussi plus grande en proportion chez les rorquals de grande taille (voir la figure 8). De plus, la longueur de la graisse ventrale à sillons augmente proportionnellement, ce qui accroît la capacité de la cavité

buccale. Étant donné que d'autres grandes baleines engouffreuses présentent aussi ce type de croissance relative, ces configurations morphologiques représentent vraisemblablement une adaptation liée à l'alimentation par engouffrement.

La taille de leur queue n'affecte pas la nage des grandes baleines, car la surface de propulsion qui engendre la poussée est généralement proportionnelle à la taille du corps. Cependant, l'accroissement de la capacité buccale a un coût. L'engouffrement étant actif, des masses d'eau plus importantes doivent être accélérées. Ainsi, les grandes baleines doivent dépenser plus d'énergie en proportion pour chaque phase de capture.

Si l'on considère que ces coûts énergétiques restreignent le temps de plongée, en comparaison d'autres animaux plongeurs, le temps de plongée des plus grandes baleines serait davantage limité que celui de leurs congénères plus petits. Une telle conséquence pourrait être préjudiciable, car les bancs de proies suffisamment denses tendent à se trouver en profondeur. En théorie, la dépense d'énergie pour se nourrir s'accroît plus rapidement avec la taille du corps que le gain d'énergie apporté par ce mode d'alimentation.

Extrapolons ce scénario à une « méga-baleine » hypothétique, une baleine beaucoup plus grande qu'un rorqual bleu. Un tel cétacé ne serait pas capable de soutenir son métabolisme en se nourrissant uniquement par engouffrement. Autrement dit, si l'évolution a sélectionné la taille de ces mammifères jusqu'à ses valeurs actuelles, il existe indiscutablement une limite supérieure que les baleines engouffreuses ne peuvent dépasser. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

J.A. Goldbogen *et al.*, *Mechanics, hydrodynamics and energetics of blue whale lunge feeding : efficiency dependence on krill density*, *J. Exp. Biol.*, vol. 214, pp. 131-146, 2011.

J.A. Goldbogen *et al.*, *Skull and buccal cavity allometry increase mass-specific engulfment capacity in fin whales*, *Proc. Roy. Soc. B*, vol. 277, pp. 861-868, 2010.

J. Potvin *et al.*, *Passive versus active engulfment : verdict from trajectory simulations of lunge-feeding fin whales *Balaenoptera physalus**, *J. Roy. Soc. Interface*, vol. 6, pp. 1005-1025, 2009.

J.A. Goldbogen *et al.*, *Foraging behavior of humpback whales : Kinematic and respiratory patterns suggest a high cost for a lunge*, *J. Exp. Biol.*, vol. 211, pp. 3712-3719, 2008.

J. Calambokidis *et al.*, *Insights into the underwater diving, feeding and calling behavior of blue whales from a suction-cup attached video-imaging tag (CRITTERCAM)*, *Marine Technol. Soc. J.*, vol. 41, pp. 19-29, 2007.

L.S. Orton *et P.F. Brodie*, *Engulfing mechanics of fin whales*, *Can. J. Zool.*, vol. 65, pp. 2898-2907, 1987.

Astronomie

Étoiles : une naissance obscure

UNE RÉGION DE FORMATION STELLAIRE
intense près du noyau de la galaxie M83, observée par le télescope spatial *Hubble*. Les théories classiques ne rendent pas compte de façon satisfaisante de l'émergence des étoiles bleues massives, ni de la façon dont elles restituent de l'énergie aux nuages de gaz à partir desquels elles se forment.