

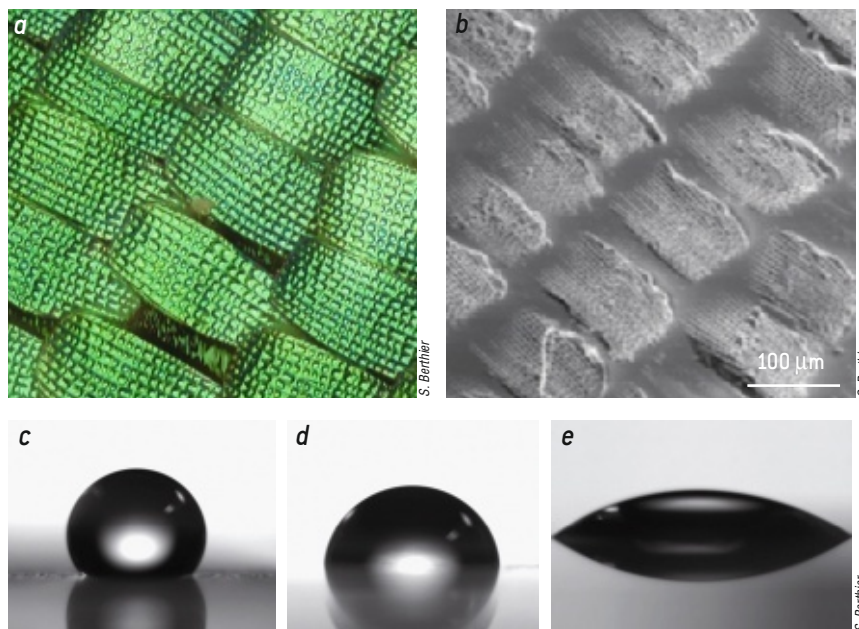
(à l'instar des mammifères, nombre d'oiseaux ne les voient pas). Les chercheurs se sont inspirés de ce phénomène pour développer des motifs antifalsification pour documents ou billets de banque.

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 côtes 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

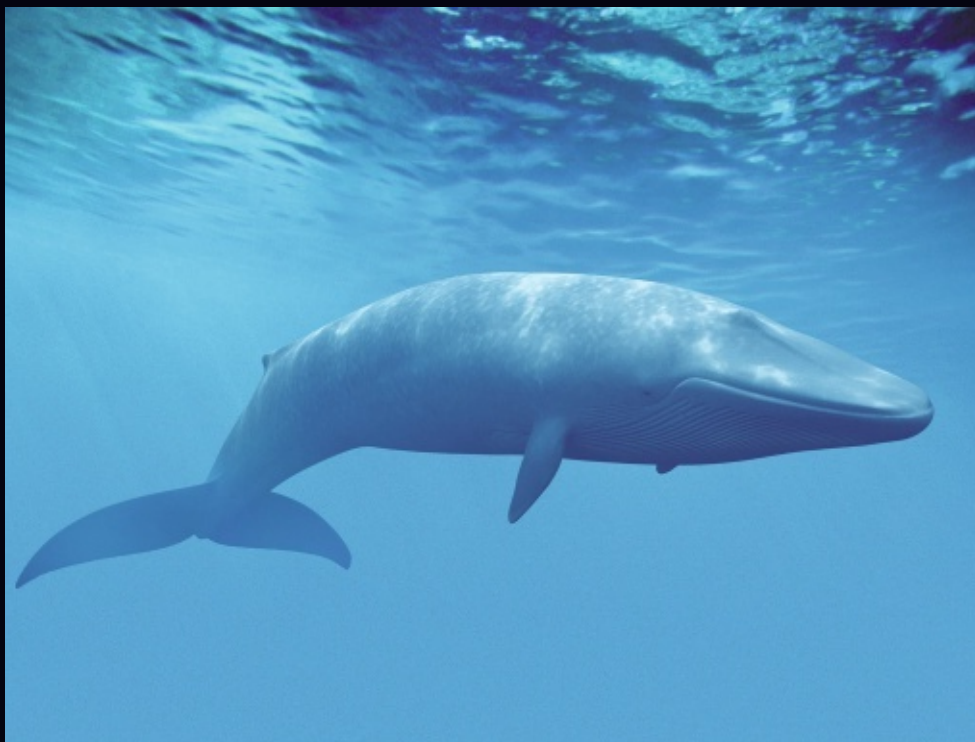
Jeremy Goldbogen

**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.**

**E**n 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

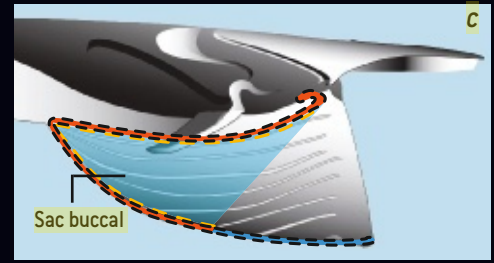
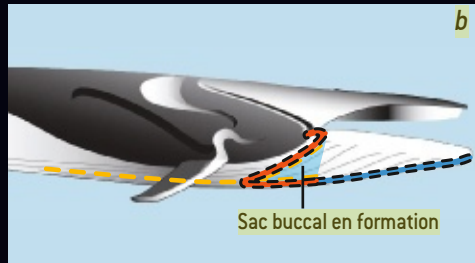
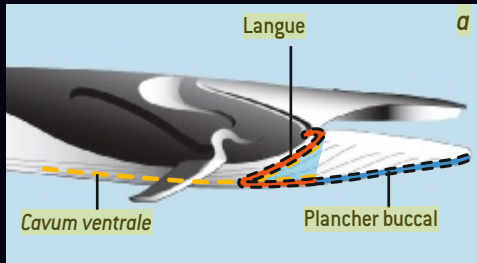
- ✓ Certaines baleines à fanons se nourrissent en profondeur de crustacés et de petits poissons.
- ✓ Elles engouffrent de grandes quantités d'eau de mer, ce qui leur permet de capturer jusqu'à une tonne de nourriture chaque jour.
- ✓ Le mécanisme d'engouffrement a été décrypté en posant sur des rorquals 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

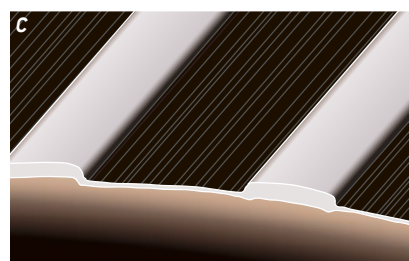
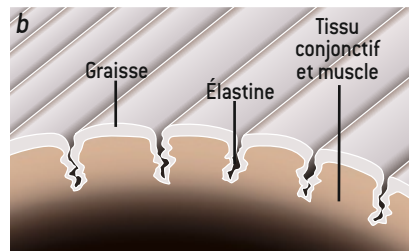
rigide. En revanche, celui des baleines engouffreuses a une composition fibrocartilagineuse qui le rend souple. Grâce à cette troisième articulation flexible, les deux mandibules incurvées peuvent pivoter ensemble vers l'extérieur et augmenter l'ouverture de la cavité buccale. La rotation mandibulaire 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).