

> 350 Sch, que les vestes en Gore-Tex sont déclarées à 28000 Sch et qu'une norme DIN considère comme imperméable un vêtement qui affiche 1300 Sch. Que signifient ces chiffres en pratique?

Explicitons tout d'abord l'unité de mesure. Les valeurs données précédemment sont les valeurs de la surpression (par rapport à la pression atmosphérique) à partir de laquelle l'eau commence à traverser le tissu (voir l'encadré ci-contre). Cette surpression peut s'exprimer en millimètres de hauteur d'eau, ce qui représente autant de schmerbers. La surpression sous 10 mètres d'eau étant de 1 atmosphère, soit 100000 pascals (Pa), 1 schmerber équivaut à un seuil de pression en eau de 10 Pa.

L'imperméabilité des tissus dépend des fibres et de leur tissage. Ces fibres sont nécessairement hydrophobes: sinon, après avoir imprégné le tissu, l'eau mouillerait l'autre face, puis goutterait. Quelles valeurs d'imperméabilité doit-on atteindre? Étant donné la définition du schmerber, comme une goutte d'eau ne dépasse pas quelques millimètres de diamètre, quelques schmerbers pourraient sembler suffisants pour se protéger de la pluie. Ce n'est pas le cas.

LA PRESSION DES GOUTTES

En effet, si la pression exercée par une goutte posée sur un parapluie est à peine de quelques dizaines de pascals, celle exercée lors de l'impact de la goutte sur le tissu est bien plus élevée. À un coefficient numérique près, cette pression dynamique est égale au produit de la masse volumique de l'eau par le carré de la vitesse de la goutte. Ainsi, l'impact d'une goutte arrivant à 1 mètre par seconde (petite pluie fine) exerce l'équivalent d'une pression de 1000 Pa et cette eau ne traversera donc pas un tissu dont l'imperméabilité dépasse 100 Sch.

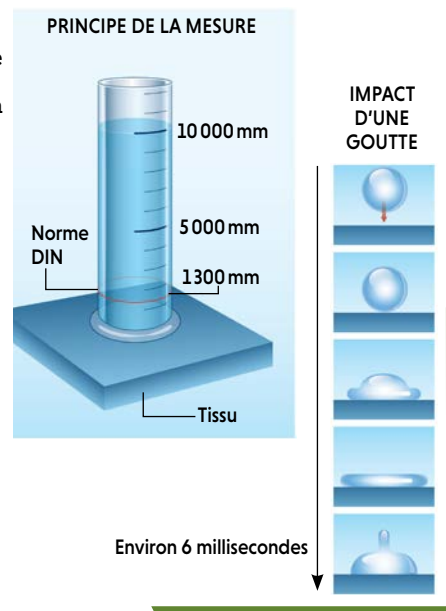
Mais dès que la pluie est modérée (gouttes chutant à 4 mètres par seconde), l'eau peut en partie traverser un tissu d'imperméabilité inférieure à 1600 Sch, ce qui est pourtant au-dessus de la norme DIN. Sous un parapluie, nous ressentons alors sur notre visage les goutelettes microscopiques qui traversent le tissu à chaque impact. À 10 mètres par seconde (grosses gouttes d'une forte pluie), mieux vaut porter une veste conçue pour le trekking. Et à moto sous la pluie, seule une combinaison étanche à coutures soudées vous évitera d'être mouillé.

À cela s'ajoute le fait que la zone d'appui des bretelles de votre sac à dos ou les plis dans le vêtement, à proximité de vos

MESURER L'IMPERMÉABILITÉ D'UN TISSU

Le principe est d'appliquer au tissu une pression d'eau et de mesurer le seuil à partir duquel l'eau traverse le textile. Si ce seuil correspond à la surpression (par rapport à la pression atmosphérique) due à une hauteur d'eau de 1 mm, l'imperméabilité est, par définition, de 1 schmerber (1 Sch). La norme DIN de 1300 Sch correspond ainsi à un seuil de 1300 mm de hauteur d'eau.

L'imperméabilité à la pluie dépend de la vitesse relative des gouttes d'eau par rapport au tissu, car l'impact d'une goutte exerce une pression d'autant plus forte que sa vitesse est élevée. L'impact d'une goutte de quelques millimètres tombant à 1 mètre par seconde (pluie fine) se déroule sur quelques millisecondes. Un tel impact exerce une pression d'environ 1000 Pa, l'équivalent de 100 mm de hauteur d'eau. Pour que le tissu ne soit pas traversé par l'eau, son imperméabilité doit donc dépasser 100 Sch.



articulations, sont autant d'endroits où le tissu peut perdre son imperméabilité, l'eau y étant comprimée comme dans un étai. C'est pourquoi on recommande aux randonneurs le port de vêtements imperméabilisés à 10000 Sch au moins.

Quelles conséquences ont ces chiffres pour notre stratégie? Sous une pluie modérée ou forte sans vent (disons avec des gouttes chutant à plus de 6 mètres par seconde), à moins d'être un athlète, l'allure choisie modifie peu la vitesse relative de la pluie: celle-ci augmente de 10% seulement quand on passe d'une marche normale, à 1 mètre par seconde, à une course à 3 mètres par seconde. Le mouillage des vêtements n'en sera pas beaucoup modifié et on peut donc conserver la stratégie optimale, c'est-à-dire courir vite. L'idée que, avec un vent arrière, on a intérêt à courir à la vitesse du vent s'en trouve aussi renforcée: on diminue la vitesse relative de la pluie, donc la pression qu'elle exerce sur le tissu et, partant, sa pénétration.

En revanche, sous une petite pluie sans vent et avec un vêtement tout juste imperméable, il faut éviter de courir, car la vitesse relative de la pluie serait alors suffisante pour tremper le vêtement. Ces cas illustrent qu'il devient difficile de conclure sans connaître de nombreux paramètres: vent, force de la pluie, imperméabilités des tissus... En attendant une application dédiée, le physicien ne peut que vous inciter à rester au sec pour éviter de trop y penser! ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Ryu et al., **Water penetration through a superhydrophobic mesh during a drop impact**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 118, article 014501, 2017.

F. Bocci, **Whether or not to run in the rain**, *European Journal of Physics*, vol. 33, pp. 1321-1332, 2012.

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université, à Paris

LE BIZARRE SONAR DU CACHALOT

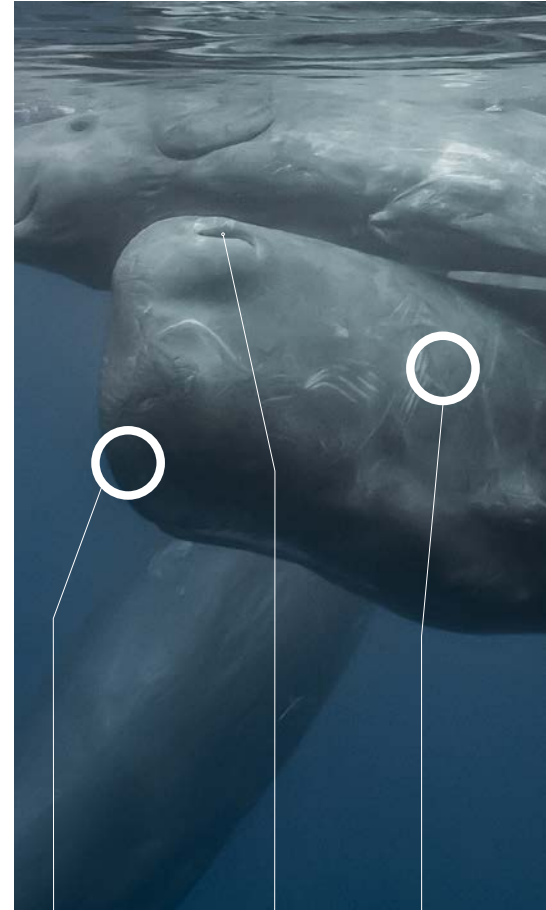
Si tous les dauphins et autres cétacés à dents ont une tête asymétrique, celle du grand cachalot est particulièrement originale. Son asymétrie le dote d'un sonar ultraperformant, même à grande profondeur.

Mis à part quelques groupes comme les éponges et les cnidaires (méduses, coraux...), tous les animaux sont des bilatériens, c'est-à-dire des organismes à symétrie bilatérale. Les zoologistes ont toutefois répertorié de nombreux cas où cette symétrie fondamentale est brisée. Citons les pinces – l'une broyeuse, l'autre coupante – de nombreux crustacés (crabes, homards...), la torsion de la masse viscérale des gastéropodes (bigorneaux, escargots...) ou, en anatomie interne, la place du cœur chez les mammifères.

L'asymétrie des cétacés est de cet ordre. Tous les cétacés à dents, ou odontocètes, ont une asymétrie anatomique du crâne: leurs narines internes sont plus ou moins décalées vers la gauche. Toutefois, si, chez les crustacés, l'avantage est évident et si, chez les gastéropodes et les

mammifères, l'explication évolutive est connue, il n'en est rien chez les odontocètes. Comme ces derniers sont dotés d'un sonar qui leur permet une écholocalisation – se situer par des ondes dans son environnement –, la facilité a longtemps été d'admettre que l'asymétrie était liée à cette fonction. Pourtant, les chauves-souris microchiroptères, qui pratiquent elles aussi l'écholocalisation, ont un crâne parfaitement symétrique! Et chez le dauphin, l'asymétrie de la tête n'intervient pas dans cette fonction (voir l'encadré page 94).

Il y a une dizaine d'années, cherchant une explication différente à l'asymétrie des odontocètes, l'équipe de Graham Pierce, à Aberdeen, en Grande-Bretagne, proposa un lien avec la nutrition. Le système pharyngien des odontocètes est particulier, avec une séparation complète des voies respiratoires et digestives: le larynx, organe respiratoire, traverse le pharynx, qui n'est plus qu'un organe digestif. De fait, ces



Émet des sons allant jusqu'à 230 décibels (le seuil douloureux pour l'homme est à 120 décibels).

Le souffle qu'il projette par son évent, incliné de 45° à gauche, atteint 15 mètres de hauteur.

Grâce à l'écholocalisation, il repère une proie à une distance de 500 mètres.

EN CHIFFRES

33

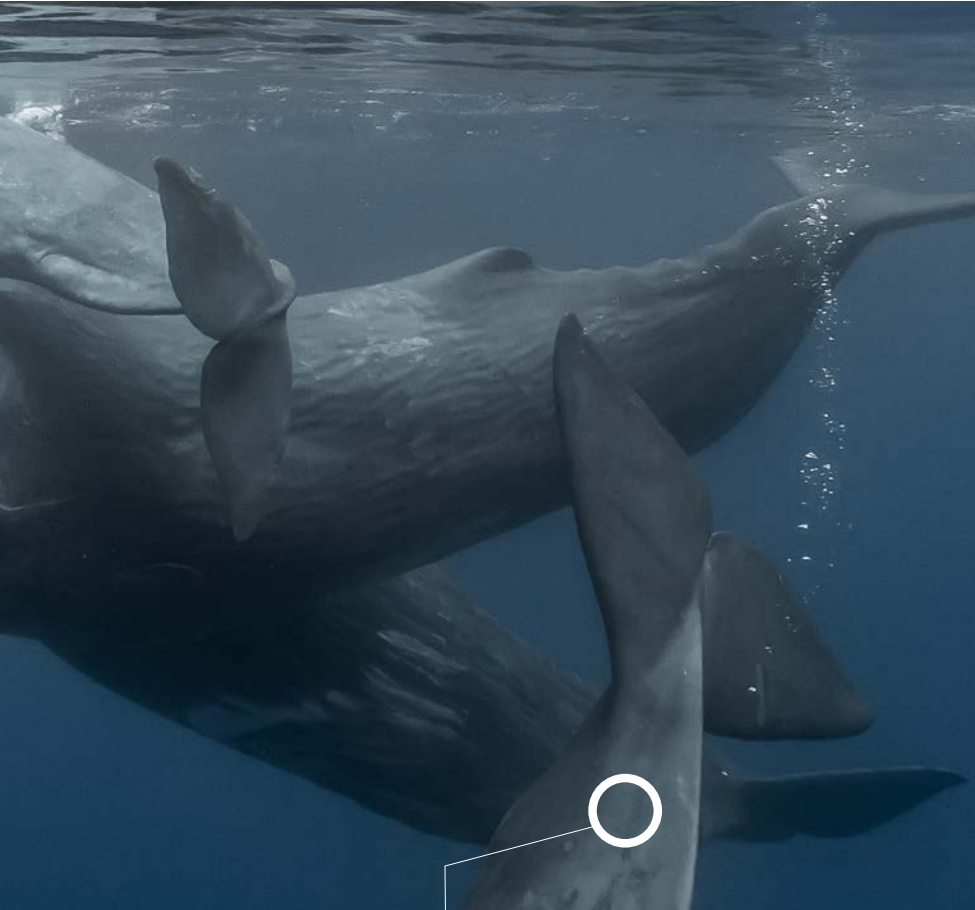
mètres et 100 tonnes : le plus grand des grands cachalots connus, Mocha Dick, avait la taille d'un demi-Boeing et le poids d'une quinzaine d'éléphants d'Afrique. Albinos, tué en août 1959 avec 19 harpons, après 100 combats et 30 marins tués, il inspira à Hermann Melville son *Moby Dick*.

360 000

C'est le nombre estimé de grands cachalots dans le monde, soit une réduction de 67% par rapport à leur population avant l'essor de la chasse commerciale, au XIX^e siècle. L'espèce est protégée depuis 1985.

3

espèces vivantes composent la famille des cachalots : le grand cachalot (*Physeter macrocephalus*), seul représentant vivant du genre *Physeter*, et les cachalots nain (*Kogia sima*) et pygmée (*Kogia breviceps*). Ces derniers ne mesurent que 3 mètres pour 400 kilogrammes.



Il est capable de plonger pendant 90 minutes à 3 500 mètres de profondeur.



Grand cachalot (*Physeter macrocephalus*)

Taille : 18 m (mâle)
Poids : 51 tonnes (mâle)
Longévité : 70 ans
Le mâle est jusqu'à 50% plus long et 3 fois plus lourd que la femelle.

animaux marins avalent en même temps qu'une proie une grande quantité d'eau, ensuite rejetée, qui ne doit en aucun cas envahir les poumons. Mais cette anatomie complexe crée un danger : une proie volumineuse peut se coincer dans le pharynx. Or le larynx se trouve rejeté vers la gauche, ménageant un conduit digestif de grande taille vers la droite. Anatomiquement, cette rupture de symétrie se répercute sur la structure du crâne, facilement mesurable par la position de l'ouverture dorsale des narines internes. En comparant treize espèces d'odontocètes, Graham Pierce est arrivé à un résultat remarquable : plus les proies ingérées sont grandes, plus l'asymétrie de la tête est importante!

De fait, l'asymétrie du grand cachalot (*Physeter macrocephalus*) est très marquée : son évent – sa narine externe, à l'extrémité du museau – est nettement décalé vers la gauche. Néanmoins, l'étude précise de l'anatomie de sa tête suggère que les choses sont plus compliquées dans son cas. En 2016, à l'aide d'un modèle informatique tridimensionnel de la tête du grand cachalot construit à partir de l'examen détaillé de deux jeunes spécimens, Stefan Huggenberger, de l'université de Cologne, en Allemagne, et ses collègues ont révélé que l'asymétrie de la tête le dote d'un sonar ultraperformant, même en grande profondeur. Il y aurait donc bien, chez lui, un lien entre asymétrie de la tête et écholocalisation...

UN NEZ À MOTEUR

«Un nez muni d'un moteur hors-bord», surnomme-t-on ce cétacé hors norme que sa queue propulse à plus de 3 000 mètres de profondeur au cours de plongées atteignant parfois 90 minutes. Le sang et les muscles stockent l'oxygène nécessaire pour chasser le calmar géant ou le calmar colossal. L'énorme melon, sans commune mesure avec celui du dauphin, repose sur un maxillaire supérieur très allongé qui, comme un berceau, reçoit deux structures adipeuses étagées : en bas, le matelas – *junk* («camelote») en anglais, à cause de la mauvaise qualité de l'huile que les baleiniers en tiraient ; au-dessus, le spermaceti qui fournissait une huile très prisée, car ne fumant pas en brûlant.

> En plongée profonde, le grand cachalot réalise son écholocalisation et communique avec ses partenaires par des « clics » ordonnés en séries décroissantes. Le premier d'une série est très puissant – jusqu'à 230 décibels –, puis l'intensité des suivants s'atténue. À 1000 mètres de profondeur, le cétacé ne peut produire ces ondes sonores en expulsant l'air de ses poumons. En effet, si, en surface, le volume des poumons d'un animal de 15 mètres est de 750 litres, à une telle profondeur, sous l'effet de la pression, il n'est plus que de 7,5 litres!

DEUX MIROIRS ET UN MATELAS

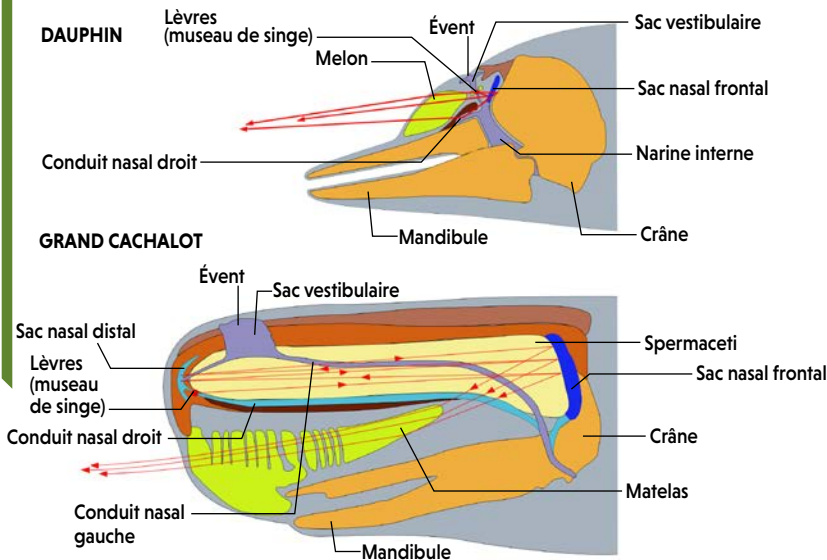
En fait, chez le grand cachalot, le site générateur des clics est à chercher du côté de son système nasal complexe et asymétrique dont l'anatomie fonctionnelle, étudiée dès 1885 grâce aux travaux pionniers de Georges Pouchet et Emmanuel Henri Beaugregard, s'est récemment trouvée détaillée par Stefan Huggenberger et ses collègues (voir l'encadré ci-contre). Le conduit nasal gauche sert à la respiration, mais le droit est original: il forme deux sacs nasaux, l'un derrière le spermaceti, comme chez le dauphin (sac frontal), l'autre devant, en avant du museau (sac distal).

Intuitivement, Pouchet et Beaugregard avaient compris la fonction capitale de ce sac distal. En décrivant l'anatomie fine du conduit nasal, ils découvrirent qu'à son arrivée sur ce sac, le conduit est doté de deux lèvres musculeuses en « museau de singe »: le site de génération des ondes sonores. Ce « museau » s'ouvre sous l'effet d'une surpression dans le conduit nasal. Les lèvres claquent et vibrent, produisant une série de sons dont la puissance et la répétition sont régulées par la pression de l'air et la tension des muscles. Les ondes rebondissent alors d'un sac nasal à l'autre, comme entre deux miroirs.

À chaque passage dans le spermaceti, une partie s'échappe à travers le matelas dont la graisse forme une succession de lentilles acoustiques, séparées par du tissu conjonctif et que des muscles peuvent déformer. Les ondes sont donc plus ou moins focalisées et guidées par le matelas jusqu'à l'avant de la tête, où elles sont émises dans l'eau. Elles forment un pinceau étroit lorsque l'animal fait de l'écholocalisation, plus large quand il s'agit de dialoguer. Et comme une partie des ondes s'échappe à chaque aller-retour dans le spermaceti, il y a une perte d'énergie. On comprend alors pourquoi le grand cachalot produit des séries de clics d'intensité décroissante.

UN SONAR ULTRAPERFECTIONNÉ

Pour se repérer, le dauphin ouvre son évent, gonfle ses poumons et ses sacs nasaux frontaux – l'analogue de nos sinus. Quand il expire, l'air fait vibrer des lèvres sous l'évent qui émettent alors des ondes sonores, lesquelles sont focalisées par le melon et émises dans l'eau. Rencontrant un obstacle, ces ondes reviennent en écho vers l'animal. Sa mâchoire inférieure joue le rôle d'antenne et les conduit jusqu'aux oreilles internes. Le dauphin localise l'obstacle grâce à l'intensité des ondes et à leur décalage par rapport à celles émises. Chez le grand cachalot, le conduit nasal gauche part du crâne et rejoint le sac vestibulaire qui débouche par l'évent: il sert à la respiration. Le droit, en revanche, forme deux sacs nasaux, l'un frontal, l'autre distal, avant de rejoindre le sac vestibulaire. Il est doté de lèvres qui vibrent sous l'effet d'une surpression, produisant des ondes sonores. Ces ondes se réverbèrent d'un sac nasal à l'autre. À chaque fois qu'elles atteignent le sac frontal, une partie s'échappe via le matelas dont la graisse forme une succession de lentilles acoustiques. Peu d'air suffit. Pas besoin, donc, de gonfler ses poumons...



Stefan Huggenberger et ses collègues montrent que la structure du dauphin est proche de l'état de l'ancêtre commun des odontocètes, tandis que celle du grand cachalot est dérivée. Analysons les processus qui ont fait passer d'un état dans un autre. Le site de déclenchement des ondes sonores, proche de l'évent, primitivement postérieur au melon, devient antérieur, nécessitant de longs canaux nasaux. Mais ainsi, chez le cachalot, ces ondes sont focalisées en suivant d'abord un mouvement rétrograde vers le crâne. Le « museau de singe » n'existe que sur un seul conduit nasal chez le cachalot, alors que son équivalent se trouve après la confluence des deux canaux nasaux chez le dauphin. Enfin, chez le cachalot, la dissociation anatomique et fonctionnelle entre les deux narines est totale, l'une servant à la respiration, l'autre à l'écholocalisation.

Ainsi, l'asymétrie, qui était d'abord liée à la déglutition de proies de grande taille chez les odontocètes, s'est trouvée ensuite utilisée dans la genèse d'un sonar ultraperfectionné adapté aux grandes profondeurs, offrant au grand cachalot une vie en maître dans un milieu obscur, mais sonore. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Huggenberger et al., **The nose of the sperm whale: Overviews of functional design, structural homologies and evolution**, *JMBA*, vol. 96(4), pp. 783-806, 2016.

C. D. MacLeod et al., **Breaking symmetry: The marine environment, prey size, and the evolution of asymmetry in cetacean skulls**, *Anat. Rec.*, vol. 290, pp. 539-545, 2007.

D. S. Houser et al., **Structural and functional imaging of bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) cranial anatomy**, *J. Exp. Biol.*, vol. 207, pp. 3657-3665, 2004.