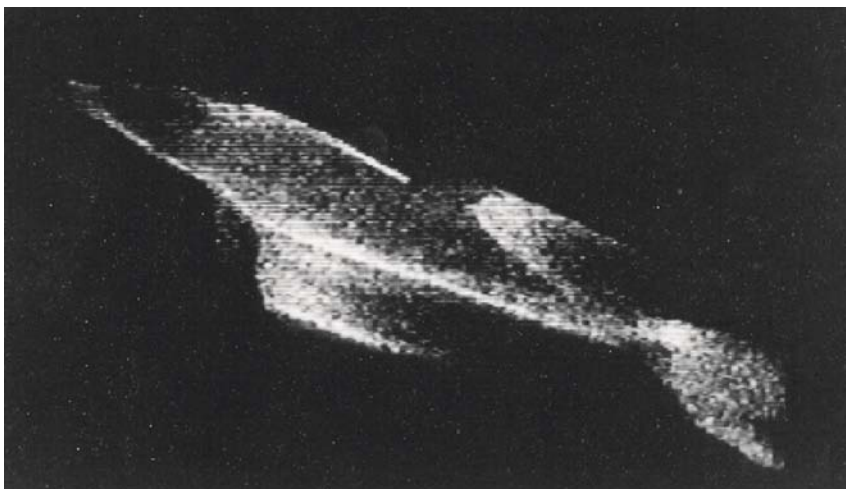




**LA SILHOUETTE LUMINEUSE DE CE GRAND DAUPHIN (*Tursiops truncatus*)** est créée par du plancton luminescent. L'intense cisaillement du fluide, aux endroits où il y a décollement de la « couche limite » de l'écoulement, provoque l'émission de lumière par le plancton. La micro-turbulence à l'origine de la luminescence est forte sur les bords des nageoires et dans le sillage.

## Léonard de Vinci et le profil des poissons

L'observation de l'écoulement autour d'un animal aquatique remonte à Léonard de Vinci. Il fut le premier à identifier les avantages procurés au poisson par sa forme profilée. Il affirma que le poisson peut se déplacer dans l'eau sans rencontrer beaucoup de résistance — donc en ne développant qu'une faible traînée —, car grâce à sa forme, l'eau s'écoule plus régulièrement autour de lui.

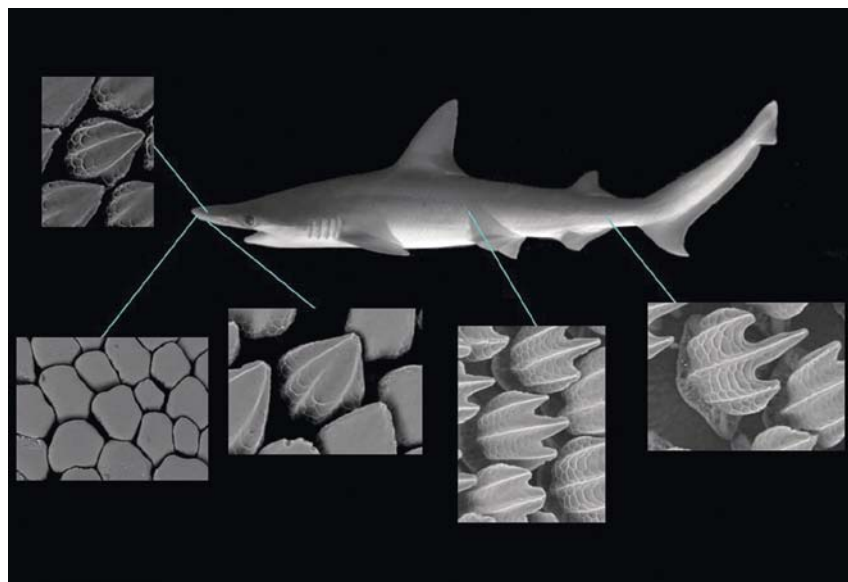
tensio-actives, c'est-à-dire qu'elles réduisent la tension superficielle du fluide. Or depuis la fin des années 1940, les ingénieurs navals ont établi que l'ajout à l'écoulement de solutions diluées de polymères à longues chaînes réduit efficacement la traînée de frottement. De même, le mucus enrobant le corps des poissons réduit la viscosité du fluide dans la couche limite. Par exemple, le mucus du barracuda (*Sphyrna argentea*), réduit de 66 % la traînée de frottement, de sorte que ce poisson est capable de pointer à 40 kilomètres par heure.

L'autre type de traînée, la traînée de forme, découle de la chute de pression entre l'avant et l'arrière du corps. Son origine se comprend aisément à l'aide du principe de Bernoulli. Publiée en 1738 par le Suisse Daniel Bernoulli, cette loi de l'hydrodynamique stipule que la pression et (le carré de) la vitesse varient en sens inverses l'une de l'autre : quand l'une augmente, l'autre diminue et *vice-versa*. Ainsi, là où le fluide entre en contact avec la partie antérieure du corps, l'écoulement ralentit et la pression augmente ; ce phénomène est facile à observer quand, assis dans un bateau, on plonge sa main dans l'eau.

Le fluide doit ensuite longer le corps. Il accélère et sa pression diminue, jusqu'à ce que le fluide atteigne l'arrière du corps. À cet endroit, la pression du fluide réaugmente, mais pas autant qu'elle avait augmenté à l'avant ; on a donc une différence de pression entre l'avant et l'arrière du corps, dont résulte la traînée de forme.

## Empêcher le décollement de la couche limite

Plus le sillage est large, plus la traînée de forme est importante. Les sillages larges résultent d'une forte interaction des variations de pression avec la couche limite. Quand la couche limite a une énergie cinétique insuffisante, les changements de pression peuvent entraîner



**LA FORME DES DENTICULES D'UN REQUIN** varie suivant l'endroit de la peau considéré, même si la structure rainurée à trois pointes est présente presque partout [ici des denticules d'un requin-marteau *Sphyrna tiburo*, vus au microscope électronique]. Ces denticules réduisent la traînée hydrodynamique lors de la nage. Ils augmenteraient aussi la poussée de l'animal.

son décollement de la surface du corps. Là où cela se produit, des tourbillons se forment et élargissent le sillage. La traînée est donc réduite si la couche limite reste attachée à la surface du nageur.

Si la forme des poissons, des cétacés ou des sous-marins est celle d'une larme étirée, ce n'est pas un hasard. Ce type de profil sélectionné au fil de l'évolution confère le minimum de traînée pour un volume donné. Il minimise les différences de pression et facilite donc l'adhérence de la couche limite, ce qui maintient un sillage étroit. Des images réalisées sur des dauphins par Jim Rohr et Michael Latz, du Spawar (*Space and Naval Warfare Systems Center*) à San Diego aux États-Unis, l'illustrent (voir la figure page ci-contre, en haut). Les contraintes de cisaillement au sein du fluide perturbent le phytoplancton, qui réagit en émettant de la lumière. Sur le corps profilé, le cisaillement de la couche limite est faible, d'où une émission lumineuse minime; en revanche, sur les arêtes et les bords de fuite des nageoires, là où le cisaillement est bien plus fort, l'émission lumineuse est intense.

Au vu de ce que nous avons expliqué, on pourrait croire qu'une peau lisse réduit la traînée. Pourtant, le contraire peut aussi être vrai, comme l'atteste la peau rugueuse des requins. Pourquoi? *A priori*, les aspérités d'une surface microstructurée créent de la turbulence, qui augmente la traînée de frottement. Toutefois, les microtourbillons ont aussi pour effet de communiquer de l'énergie cinétique à la couche limite. Cette énergie aide cette dernière à surmonter les sauts de pression et la stabilise: il y a moins de risques de décollement de la couche limite, qui augmenterait la traînée de forme.

## Des denticules sur la peau

Le même phénomène explique pourquoi les balles de golf présentent des alvéoles: la turbulence qu'elles engendrent près de la surface a pour effet de retarder le décollement de la couche limite, ce qui atténue leur sillage. Pour cette raison, ces balles alvéolées volent plus vite et plus loin.

Les poissons présentent à leur surface toute une variété de structures complexes qui pourraient agir de façon similaire aux alvéoles des balles de golf. Par exemple, le rostre de l'espéron (*Xiphias gladius*)

est couvert de petits creux et bosses susceptibles d'engendrer de la turbulence dans la couche limite. Bien que peu de recherches aient été effectuées sur le rôle hydrodynamique de ces structures, les spinules et autres denticules qui tapissent de nombreux poissons osseux modifient sans doute l'écoulement dans la couche limite de façon à réduire la traînée.

Pour sa part, la structure remarquable de la peau des requins (des «poissons» cartilagineux) est étudiée depuis de nom-

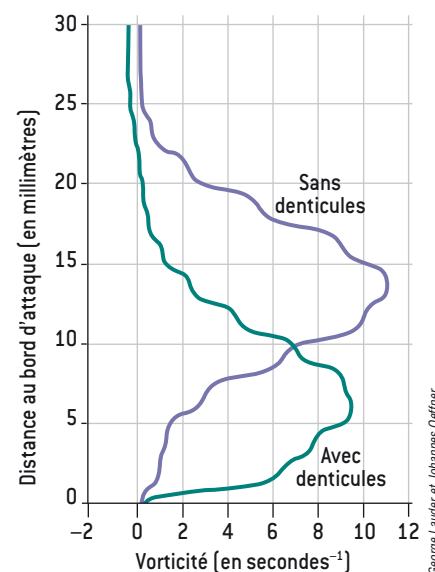
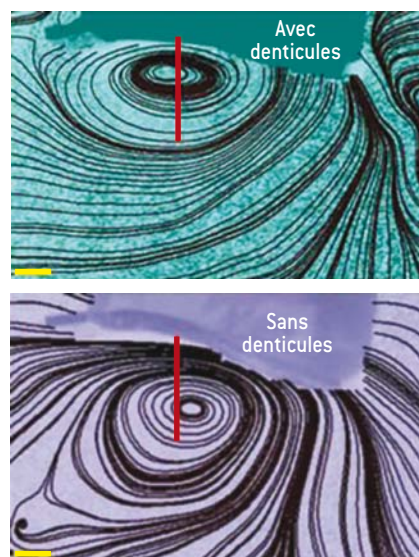
## Les denticules de la peau créent de la turbulence dans la couche limite et diminuent la traînée.

breuses années. Cette peau présente un réseau serré de denticules, de «petites dents» faites de dentine recouverte d'émail et même dotées d'une cavité pulpaire, exactement comme nos dents. La plupart de ces denticules ont trois crêtes, suffisamment saillantes pour atteindre la couche limite et se terminant par trois pointes dirigées vers l'arrière (voir la figure page ci-contre, en bas). La structure exacte des denticules varie selon l'espèce de requin et la région du corps considérées. Ainsi, dans le cas du

requin-marteau tiburo (*Sphyrna tiburo*), les denticules proches de la tête évoquent des pavés, tandis que les denticules proches de la queue sont surmontés de trois crêtes bien marquées et se terminant par de longues pointes.

Quelle est la fonction hydrodynamique de ces structures? L'étude en laboratoire d'un requin vivant n'étant pas facile, l'un de nous (G. Lauder) a conçu de petits robots imitant les mouvements de nage d'un tel animal. Pour l'essentiel, il s'agit d'un plan flexible imitant la queue qui ondule dans l'écoulement. Placé dans un bassin d'essai à recirculation, ce dispositif permet de mesurer les écoulements qui s'établissent sur des échantillons flexibles de peau munie ou non de denticules, dans des conditions proches de celles de la nage. Cette approche a révélé que la présence de denticules augmente notablement (de plus de 10%) la vitesse de nage. Le gain de vitesse observé résulte d'abord d'une diminution de la traînée due, pense-t-on, à la turbulence créée dans la couche limite par les denticules. Remarqué depuis des années, cet effet est très discuté, mais reste mal compris.

Plus étonnant, les données recueillies suggèrent aussi que la modification de l'écoulement par les denticules pourrait



**LES TOURBILLONS FORMÉS PRÈS DE LA PEAU** créent une aspiration qui contribue à la poussée quand la surface de l'animal aquatique (ici un requin mako) est assez courbée, par exemple sur un bord d'attaque. Cet effet diminue quand le tourbillon s'écarte de la surface (*située en haut sur la figure*), ce qui est davantage le cas si la peau est privée de denticules. Le graphique indique les valeurs de la vorticité, qui mesure la rotation du fluide, le long du segment marqué en rouge sur les images à gauche.