

Pour comprendre comment un nageur se propulse dans l'eau, il faut prendre en compte l'ensemble des forces exercées par l'eau sur le corps en mouvement. La somme – ou plus exactement l'intégrale de ces forces, nommée résultante des forces hydrodynamiques – présente deux composantes, l'une parallèle à la vitesse du corps, mais orientée dans le sens contraire, dite traînée ou résistance, l'autre dans n'importe quelle direction du plan perpendiculaire à la traînée, dite portance. Dans le cas d'une barque motorisée, par exemple, c'est la portance exercée sur les pales qui produit une poussée parallèle à l'axe de rotation de l'hélice et fait avancer l'embarcation.

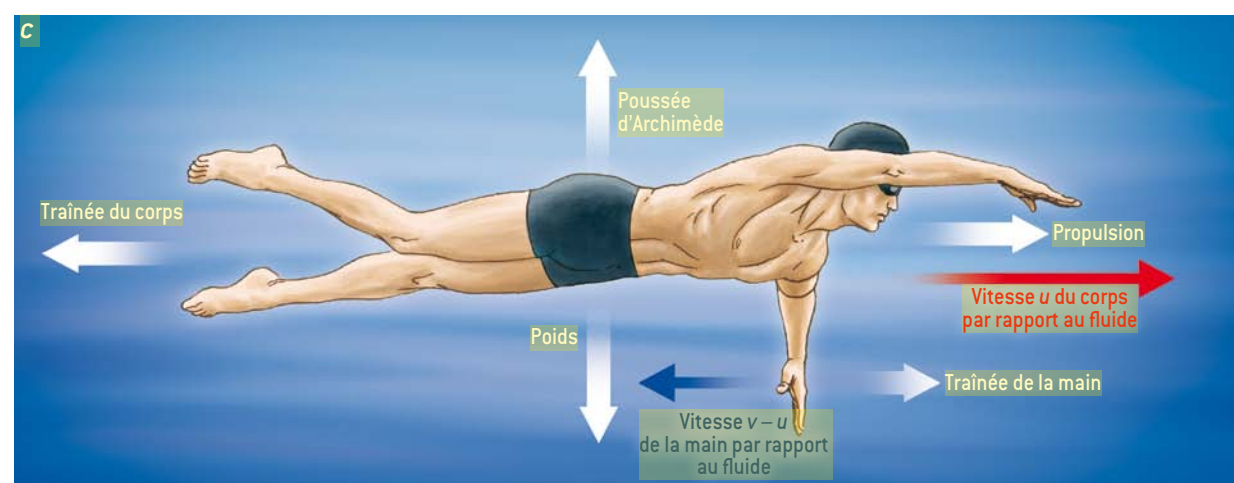
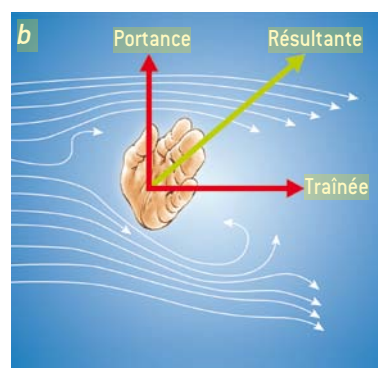
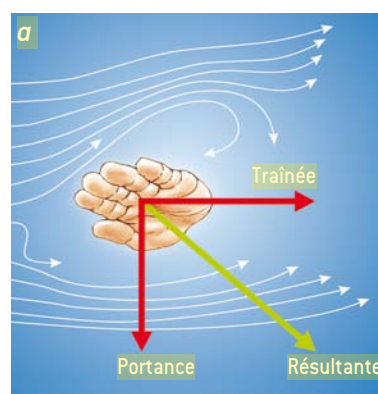
Un autre phénomène physique joue un rôle important durant la nage : la couche limite. Cette strate de particules fluides d'une fraction de millimètre d'épaisseur se forme au contact de la surface de l'objet en mouvement. À l'intérieur de la couche limite, les particules qui adhèrent à la paroi se déplacent à la même vitesse que l'objet – leur vitesse relative est donc nulle. Les particules les plus éloignées ont, elles, une vitesse proche de celle du fluide.

Si les particules de fluide se déplacent de façon ordonnée, l'écoulement est dit laminaire. Dans ce régime, les forces dues à la viscosité du fluide

prévalent. Si les particules se déplacent de façon désordonnée, l'écoulement est turbulent et, dans ce cas, les forces d'inertie prévalent sur les forces visqueuses.

En natation, le régime turbulent domine et les forces de type visqueux ont peu d'importance. Lorsque le nageur avance, la couche limite adhère à la partie antérieure de son corps, mais s'en détache en un certain point. En aval du point de décollement se forme alors une zone de basse pression dite sillage, où les mouvements des particules fluides sont désordonnés. La différence de pression entre les parties antérieure et postérieure du corps augmente, ainsi que la traînée, engendrée en grande partie par cette différence de pression. En outre, plus le décollement de la couche limite intervient tôt en amont, plus le sillage, et donc la traînée, est important.

Le décollement de la couche limite intervient plus tard si l'écoulement est turbulent. Si l'on réussit à transformer un écoulement laminaire en écoulement turbulent, on retarde ainsi le décollement de la couche limite et l'on réduit la traînée. C'est la raison pour laquelle une balle de golf va plus loin qu'une balle lisse : ses aspérités perturbent l'écoulement dans la couche limite et engendrent une turbulence.



Les principales forces qui s'exercent sur un nageur sont, outre le poids et la poussée d'Archimède, la propulsion et la traînée [c]. Lorsque la main se déplace vers l'arrière, elle produit elle aussi une traînée, opposée à celle du corps. Si la vitesse v de la main par rapport au corps est supérieure à la vitesse u du corps, la traînée de la main contribue à la propulsion. Sinon, elle freine le corps. En laissant dépasser la main par la fenêtre d'une voiture en mouvement, on obtient, outre la traînée, une portance dirigée vers le haut [a] ou vers le bas [b] selon l'orientation de la main. Sur la modélisation ci-dessus [d], une couche limite laminaire s'écoulant de gauche à droite (rouge-jaune) rencontre une perturbation et se décolle, subissant alors des instabilités tourbillonnaires. Quand la couche limite se décolle, la portance disparaît.

de déterminer quelles équations s'appliquent et dans quelle mesure.

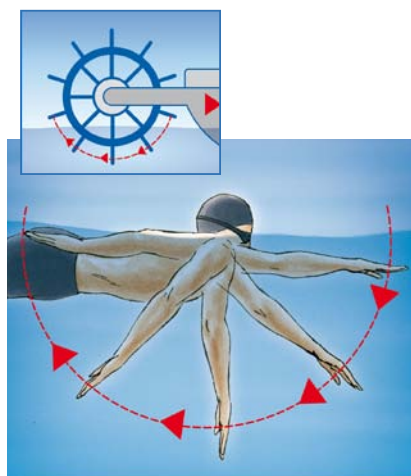
Tout le monde s'accorde cependant sur quelques principes fondamentaux. Un corps qui se meut dans l'eau à une vitesse constante est soumis à quatre forces principales : son poids, la poussée d'Archimède, la propulsion et la traînée engendrée par le mouvement. Les deux premières agissent dans une direction verticale ; elles sont liées à la masse du corps et à sa densité. Les deux autres s'exercent horizontalement et sont celles sur lesquelles le nageur peut agir : pour avancer plus vite, un athlète doit augmenter la propulsion et réduire la traînée.

La traînée, une résistance qui s'exerce dans le sens opposé à celui de la vitesse, est bien décrite. C'est un phénomène complexe, rassemblant plusieurs facteurs, dont les plus importants sont la traînée de frottement, la traînée de vague et la traînée de forme. La traînée de frottement – la plus faible des trois contributions – est due au contact entre la surface du corps et le fluide. Elle disparaît là où la mince couche de fluide qui adhère au corps – la couche limite – s'en détache (on parle de décollement de la couche limite, voir l'encadré ci-contre).

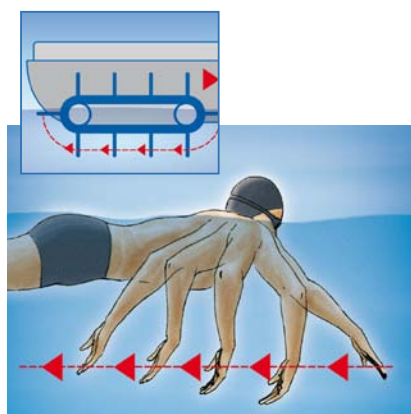
La traînée de vague est créée tant par des ondes externes (qui proviennent par exemple d'une ligne de nage voisine durant une épreuve) que par des ondes que le nageur a lui-même produites. Ce type de traînée caractérise les activités qui se situent à l'interface de deux fluides, ici l'eau et l'air. Elle augmente considérablement avec la vitesse, mais tend à diminuer lorsqu'on s'éloigne de l'interface : à un mètre de profondeur, ses effets sont déjà quasi nuls. Les nageurs cherchent donc à maximiser la phase subaquatique, qui ne doit pas dépasser 15 mètres par longueur de bassin selon la réglementation.

Enfin, le facteur le plus important est de loin la traînée de forme, qui dépend des dimensions et de la forme du corps du nageur, de son assiette, de sa vitesse et des mouvements qu'il effectue. La traînée de forme est proportionnelle à la densité du fluide, à la section frontale du corps, et au carré de sa vitesse.

Ainsi, la traînée augmente avec le carré de la vitesse. Plus le nageur avance vite, plus la résistance qu'il rencontre augmente. La densité de l'eau étant presque 1000 fois supérieure à celle de l'air, contrôler parfaitement ses mouvements afin de réduire le plus possible la traînée est bien plus impor-



1. LA PREMIÈRE THÉORIE de la propulsion, avancée au début du XX^e siècle, est fondée sur une analogie avec la roue à aubes : en pivotant, raide, autour de l'épaule, le bras déplace une masse d'eau vers l'arrière. En réaction, la masse d'eau pousse la main – donc le corps – vers l'avant.



2. DANS CETTE VERSION AMÉLIORÉE de la première théorie de la propulsion, on tient compte de la flexibilité du coude à l'aide d'une analogie avec la chenille d'un tank : le mouvement de la main n'est plus circulaire, mais linéaire.

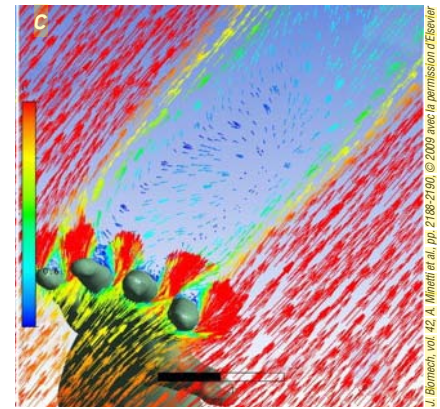
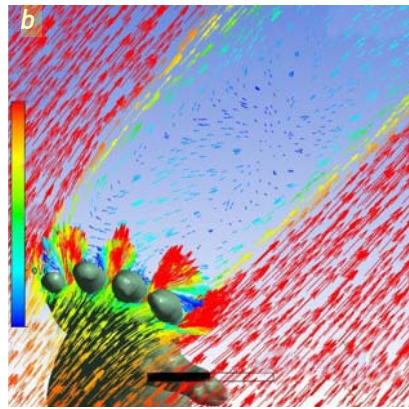
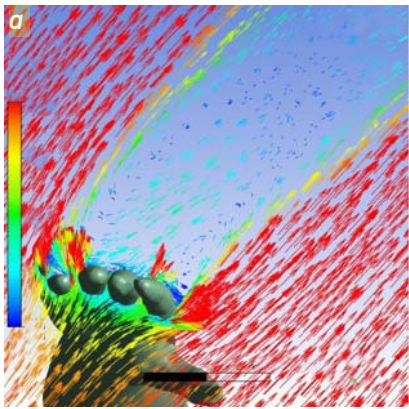
tant que dans le cas d'un coureur, qui se déplace dans l'air. Néanmoins, la traînée ne se limite pas à freiner le nageur : paradoxalement, elle l'aide aussi à avancer. Lorsque le bras se dirige vers l'arrière, il rencontre une résistance qui s'exerce en sens inverse de la vitesse du bras, c'est-à-dire vers l'avant. Dans ce cas, le nageur a intérêt à ce que la traînée soit importante : s'il essayait de la réduire, en fermant le poing ou en plaçant sa main en couteau, sa poussée vers l'avant diminuerait notablement.

En général, la traînée dépend de la vitesse relative entre le corps et le fluide. Il n'y a donc pas de différence entre un corps qui se déplace dans un fluide immobile et un corps immobile dans un fluide qui s'écoule. Cette propriété permet d'analyser les mouvements des nageurs dans un bassin de nage à contre-courant, un type particulier de bassin hydrodynamique où l'eau circule en boucle à une vitesse contrôlée (en général, la vitesse maximale de l'eau y est de trois mètres par seconde) grâce à des hélices actionnées par des moteurs électriques. Le bassin de nage à contre-courant est à l'eau ce que la soufflerie est à l'air. Il permet d'effectuer des tests fluidodynamiques, mais également des prises de vue de bonne qualité ou des mesures métaboliques difficiles à réaliser dans une piscine classique.

La main : roue à aubes ou aile d'avion ?

Une autre force, négligée dans le bilan des forces s'exerçant sur le corps, mais qui pourrait avoir un impact plus important lors du mouvement de certaines parties du nageur, est la portance – la composante perpendiculaire à la vitesse de la force exercée par le fluide sur le corps. Dans le bilan global des forces, la portance intervient peu, car elle ne se manifeste qu'en présence de la couche limite. Or le décollement de cette couche est presque immédiat dans le cas du corps humain, tant sa forme est irrégulière. Néanmoins, certains physiciens, nous le verrons, s'interrogent sur le rôle de la portance dans la propulsion, à l'échelle de la main ou du pied.

De façon générale, les divergences entre chercheurs sur le mécanisme de la propulsion se résument ainsi : le nageur avance-t-il en exploitant la traînée ou la portance ? S'il utilise les deux, dans quelles proportions ? Comment cette traînée ou cette portance sont-elles produites ? Pour simplifier, les



J. Bonnich, vol. 42, A. Minetti et al., pp. 2188-2190, © 2009 avec la permission d'Elsevier

3. QUELQUES SIMULATIONS NUMÉRIQUES DE LA MAIN DU NAGEUR. Selon une étude réalisée en 2009 par Alberto Minetti, de l'Université de Milan, en Italie, et ses collègues, l'écartement optimal des doigts – de 12 degrés (b) – est celui qui trace le sillage le plus large.

physiciens s'intéressent principalement aux mouvements des bras, qui fournissent jusqu'à 80 pour cent de la propulsion.

La première théorie de la propulsion en natation, qui remonte au début du XX^e siècle, repose sur une analogie simple : la roue à aubes (voir la figure 1). Dans cette hypothèse, le bras, raide, pivote autour de son axe (l'épaule) et la main, en repoussant une masse d'eau vers l'arrière, crée une traînée vers l'avant : selon le principe d'action-réaction ou troisième loi de Newton, la masse d'eau déplacée repousse la main, donc le corps du nageur, vers l'avant. La chenille est une variante qui tient compte de la flexion du coude du nageur et réduit la dispersion d'énergie vers le bas lorsque la trajectoire du bras décrit un arc de cercle (voir la figure 2).

Aujourd'hui encore, la plupart des physiciens admettent que la traînée produite lorsque le bras se dirige vers l'arrière joue un rôle fondamental dans le mécanisme de la propulsion. Mais d'autres hypothèses ont aussi été émises pour expliquer certaines observations. James Counsilman, entraîneur à l'Université de l'Indiana, aux États-Unis, dans la seconde moitié du XX^e siècle, fut le premier à mettre en doute la théorie newtonienne. En 1968, il réalisa une série d'expériences qui sont entrées dans l'histoire. Il a placé de petites sources lumineuses entre les doigts de nageurs de haut niveau et filmé leur évolution dans une piscine plongée dans le noir. Il a ainsi visualisé la trajectoire subaquatique des mains de l'athlète.

Cette trajectoire est bien loin de s'inscrire dans un plan, comme pour la roue à aubes ou la chenille. Elle présente au contraire une série de mouvements latéraux – de godille – dirigés vers l'extérieur ou l'intérieur. Cela poussa Counsilman à proposer une théorie

■ LES AUTEURS



Nunzio LANOTTE est ingénieur en mécanique de l'Université de Rome La Sapienza. Il dirige à Rome le bureau d'études APLab, spécialisé dans les technologies appliquées au sport. Sophie LEM est auteur d'articles et d'ouvrages de vulgarisation scientifique.

■ BIBLIOGRAPHIE

N. Lanotte et S. Lem, *Sportifs high tech*, Belin, 2012.

G. Gatta et al., *Power production of the lower limbs in flutterkick swimming*, *Sports Biomech.*, vol. 11, pp. 480-491, 2012.

S. Parnell, *Slippery business*, *The Australian*, 31 mai 2008.

R. Arellano, *Hydrodynamics of swimming propulsion*, dans M. Sidney et al., *Actes des IV^e Journées spécialisées de natation*, Université de Lille, 2008.

J. M. Stager et D. A. Tanner, *Swimming*, Blackwell Science, 2005.

de la propulsion des nageurs qui donne un plus grand rôle à la portance : durant ces mouvements latéraux, les mains se comporteraient comme les ailes d'un avion.

Le profil d'une aile d'avion est tel que, lorsque l'avion avance, l'écoulement de l'air autour de l'aile crée une force verticale dirigée vers le haut, la portance, qui permet à l'avion de voler. Cette force est due à l'asymétrie de l'aile : lorsque l'aile avance, les particules d'air s'écoulent au-dessus et au-dessous. Toutefois, la courbure plus élevée de la face supérieure fait accélérer les particules qui la longent par rapport à celles qui passent sous l'aile. L'accélération diminue la pression exercée sur la face supérieure de l'aile. Cette différence de pression est une manifestation d'une propriété de la dynamique des fluides observée et quantifiée dès le XVII^e siècle par le savant italien Evangelista Torricelli, puis formalisée au XVIII^e siècle par le physicien suisse Daniel Bernoulli : lorsque la vitesse d'un fluide augmente, sa pression diminue, et *vice versa*. Cette loi porte aujourd'hui le nom de théorème de Bernoulli.

Un rôle pour la portance...

La différence de pression entre les faces supérieure et inférieure de l'aile se traduit en une force verticale : la portance. La théorie bernoulliste de la propulsion des nageurs est séduisante : élégante, elle explique les résultats observés lors des expériences et s'appuie sur une loi physique connue de tous. Jusque dans les années 1990, les physiciens de la natation se sont divisés entre newtoniens et bernoullistes.

Le théorème de Bernoulli ne s'applique qu'à une condition : la couche limite doit adhérer au corps. Même dans le cas d'un