



© Projet Argo

2. PLUS DE 3 000 FLOTTEURS ont été placés sur les océans dans le cadre du réseau international Argo [la carte de gauche montre leur répartition]. Dotés de capteurs et d'un système leur permettant de plonger jusqu'à 2 000 mètres de profondeur puis de remonter, ils établissent presque en temps réel des profils de température et de salinité.

Cette eau moins salée (et donc moins dense) que l'eau de mer pourrait rester en surface et ainsi empêcher la plongée des eaux dans l'Atlantique Nord. Cela pourrait ralentir la circulation thermohaline, et donc le Gulf Stream. D'autres scénarios évoquent la possibilité que l'apport d'eau douce à de hautes latitudes dévie le Gulf Stream vers le Sud ou réduise sa puissance.

Dans les deux cas, l'Europe bénéficierait d'un moindre apport thermique pendant l'hiver. Selon de nombreuses études, une diminution de la circulation thermohaline correspondrait à un refroidissement de l'Atlantique Nord et du Nord-Ouest de l'Europe.

Toutefois, des résultats récents – et controversés – suggèrent que la majeure partie de l'eau issue de la fonte des glaces pourrait se déverser dans des courants cantonnés en bordure des côtes. Elle aurait donc peu d'influence au large, où s'effectue l'essentiel de la plongée des eaux. Et même si l'apport d'eau douce réduisait notablement la quantité d'eau plongeant dans l'Atlantique Nord, il ne provoquerait probablement pas l'arrêt du Gulf Stream. En effet, la trajectoire et la puissance de ce dernier dépendent surtout de la vitesse et de la direction des vents dominants aux latitudes moyennes. Dans la plupart des scénarios envisagés, la direction des vents dominants est peu modifiée par la fonte des glaces du Groenland, de sorte que le Gulf Stream ne change pas beaucoup. Cependant, la dérive Nord-Atlantique (un petit courant de surface qui prolonge le

Gulf Stream au Nord-Est et transporte des eaux chaudes vers les régions subpolaires) pourrait s'interrompre. En outre, si le Gulf Stream devait persister, on ignore quelle quantité d'eau chaude il charrierait vers le Nord dans le futur.

Une arrivée massive de mesures océaniques

Jusqu'à présent, l'influence du changement climatique sur les conditions météorologiques européennes a surtout été étudiée à l'aide de simulations sur ordinateur. Or celles-ci comportent un grand nombre d'incertitudes, qui ne peuvent être levées qu'en disposant de davantage de mesures dans les océans. Peu d'observations remontent à plus d'un siècle, et les mesures par satellites n'ont qu'une trentaine d'années.

La situation devrait s'améliorer grâce au réseau international Argo et à ses plus de 3 000 flotteurs. Déployé et géré par plus de 30 pays, ce réseau dresse, presque en temps réel, des cartes de température et de salinité des eaux jusqu'à 2 000 mètres de profondeur, et ce sur l'ensemble des océans. Le réseau est achevé depuis moins de dix ans et est exploité depuis peu pour étudier les interactions du changement climatique et des océans.

Ainsi, Dean Roemmich et John Gilson, de l'Institut d'océanographie Scripps, en Californie, ont comparé les données d'Argo avec les observations menées à partir des

années 1980. Ils ont montré que la couche supérieure de l'océan (jusqu'à quelques centaines de mètres sous la surface) s'est réchauffée d'environ 0,2 °C au cours des deux dernières décennies, tandis que la salinité y a augmenté de 0,1 pour cent. En revanche, à plus grande profondeur, l'eau s'est notablement rafraîchie. Reste à déterminer si ces variations sont dues au changement climatique (la variabilité naturelle est importante dans l'Atlantique Nord) et si elles suffiront à altérer localement le climat.

Les données du réseau Argo fournissent quelques indices. Pour que la planète garde une température constante, elle doit émettre vers l'espace une quantité de chaleur égale à celle apportée par le flux solaire. L'accumulation de gaz à effets de serre dans l'atmosphère semble perturber cet équilibre. Le réchauffement de 0,2 °C sous la surface de l'océan correspond à un excès de rayonnement incident d'environ un watt par mètre carré.

Ces premiers résultats permettront d'améliorer les modèles climatiques et d'entrevoir ce qui nous attend dans les prochaines décennies. Nous étudions les données de surface obtenues par satellites, les mesures effectuées par le réseau Argo dans la couche superficielle de l'océan, et les modèles numériques. Dans les dix ans à venir, nous pourrions probablement préciser l'influence du Gulf Stream sur le climat et, plus généralement, le rôle joué par les océans dans la régulation du climat. ■



La physique de la. natation



L'ESSENTIEL

- Au plus haut niveau, les performances d'un nageur dépendent de son habileté technique.
- Le mécanisme de propulsion du nageur fait encore l'objet de débats.
- Tourbillons, traînée, portance, frottements, vagues, turbulences : nombre de facteurs influent sur la vitesse du nageur. Lequel prédomine ?
- Pour le savoir, physiciens et ingénieurs décortiquent chaque mouvement des athlètes à l'aide de capteurs et de simulations numériques.

© Steve Christou/Steve Christou/Corbis

La natation est l'un des sports les plus populaires au monde. Lors des dernières Olympiades de Londres, des athlètes des cinq continents ont remporté 34 médailles d'or, et leurs performances ont captivé des centaines de millions de téléspectateurs. Et dès le 19 juillet prochain, à Barcelone, 2 500 athlètes issus de 180 pays tenteront leur chance lors de la 15^e édition du championnat du monde de natation. Si un tel engouement entoure ce sport, c'est peut-être parce qu'il requiert non seulement des qualités physiques exceptionnelles, mais aussi une technique raffinée. Les nageurs se soumettent à des entraînements exigeants : un athlète de haut niveau parcourt en moyenne 15 kilomètres par jour, répartis sur deux sessions, et suit un programme de préparation poussée. Néanmoins, sa résistance physique est inutile si elle ne s'accompagne pas d'une maîtrise parfaite de chaque geste.

La traînée, frein et propulseur

La science et la technologie s'intéressent depuis des années aux mouvements des nageurs et contribuent à l'amélioration de leurs performances. Cette synergie n'a rien d'étonnant, si l'on songe qu'une victoire ou une défaite se jouent à quelques centièmes de seconde. Nous brosserons ici un panorama des lois physiques qui peuvent s'appliquer à la natation, des théories proposées pour décrire le mode de propulsion du nageur et des techniques employées dans les centres de recherche les plus avancés. Ce qui pourrait sembler à première vue un mécanisme simple est en réalité un casse-tête passionnant, que maints chercheurs tentent de résoudre.

Aussi surprenant que cela puisse paraître, aucune théorie ne fait l'unanimité parmi les scientifiques pour expliquer le mécanisme propulsif des nageurs, c'est-à-dire la façon dont ils avancent dans l'eau. Pourtant, le mouvement des corps immergés est régi par des lois connues depuis des siècles (le principe d'action-réaction de Newton, le théorème de Bernoulli, au fondement de la mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes, qui décrivent l'écoulement des fluides, ou le théorème de Kutta-Joukowski, fondamental en aérodynamique), voire depuis des millénaires dans le cas de la poussée d'Archimède. Toute la difficulté est

Nunzio Lanotte et Sophie Lem

Le corps humain est de forme si peu régulière que l'explication physique de la propulsion d'un nageur fait toujours débat. Traînée, portance, tourbillons, etc. : plusieurs mécanismes distincts seraient en jeu.

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.

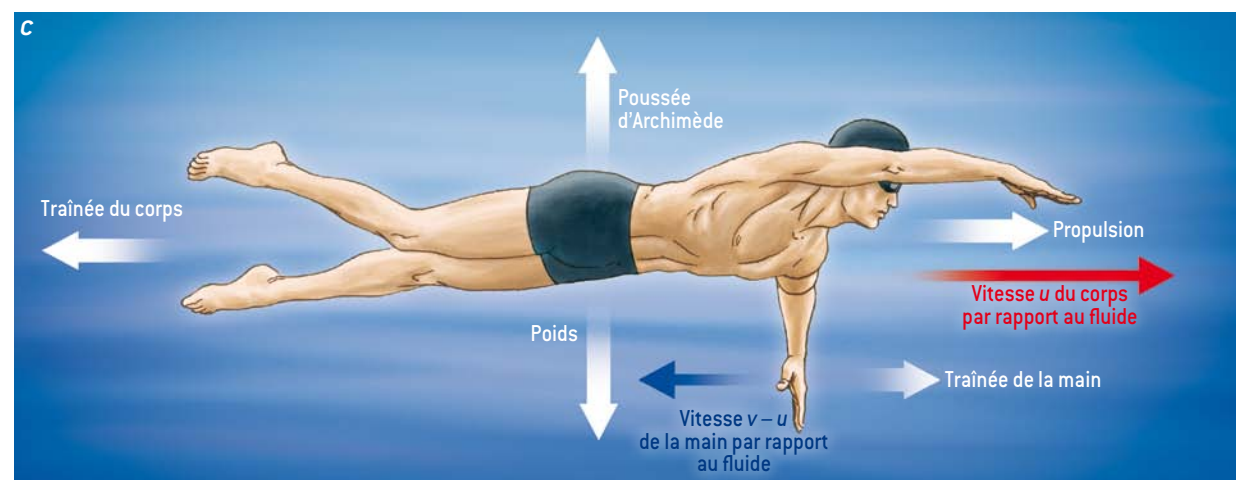
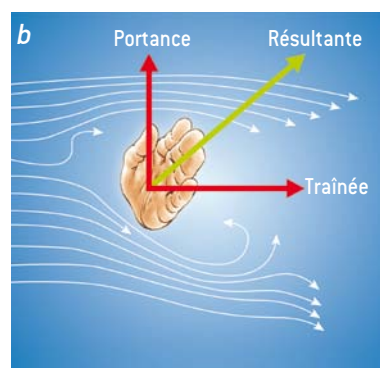
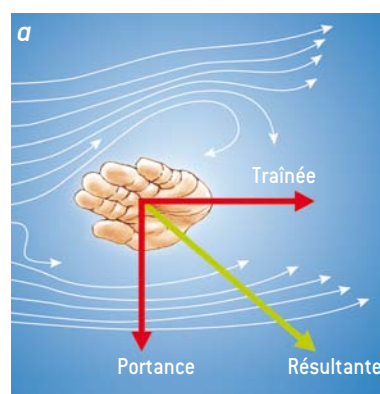
Un autre phénomène physique joue un rôle important durant la nage : la couche limite. Cette strate de particules fluides d'une fraction de millimètre d'épaisseur se forme au contact de la surface de l'objet en mouvement. À l'intérieur de la couche limite, les particules qui adhèrent à la paroi se déplacent 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.

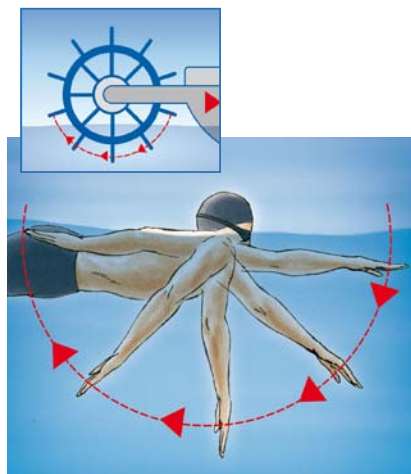
Tout le monde s'accorde cependant sur quelques principes fondamentaux. Un corps qui se meut dans l'eau à une vitesse constante est soumis à quatre forces principales : son poids, la poussée d'Archimède, la propulsion et la traînée engendrée par le mouvement. Les deux premières agissent dans une direction 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).

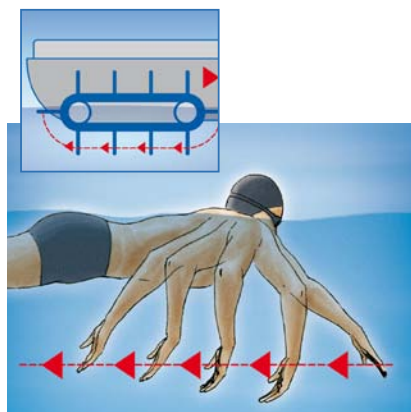
La traînée de vague est créée tant par des ondes externes (qui proviennent par exemple d'une ligne de nage voisine durant une épreuve) que par des ondes que le nageur a lui-même produites. Ce type de traînée caractérise les activités qui se situent à l'interface de deux fluides, ici l'eau et l'air. Elle 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.

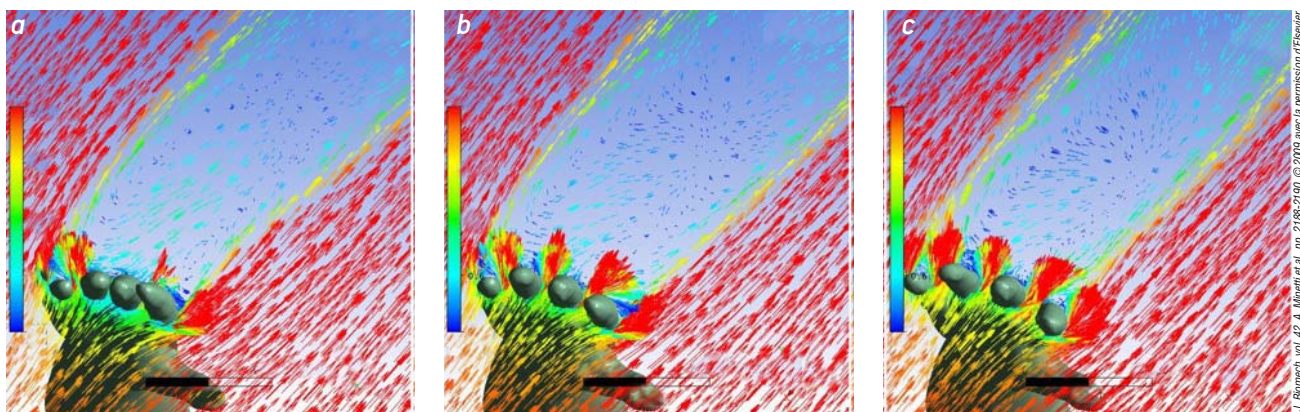
tant que dans le cas d'un coureur, qui se déplace dans l'air. Néanmoins, la traînée ne se limite pas à freiner le nageur : paradoxalement, elle l'aide aussi à avancer. Lorsque le bras se dirige vers l'arrière, il rencontre une résistance qui s'exerce en sens inverse de la vitesse du bras, c'est-à-dire 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



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 mécatronique 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

objet profilé comme une aile d'avion, si l'angle entre l'aile et la direction du déplacement devient trop important, la couche limite se décolle : c'est le décrochage. Une zone de turbulence apparaît autour de l'objet et la différence de pression s'annule. La main d'un nageur est-elle assez fuselée, et présente-t-elle un angle d'attaque assez petit pour empêcher le décollement de la couche limite ? Plusieurs expériences conduites dans les années 1990 montrent le contraire.

En 1991, en attachant des fils de laine à une main artificielle en résine immergée selon des angles d'attaque variés, Michael Ferrel, au Collège Cortland, aux États-Unis, a constaté que les fils se meuvent de façon chaotique. La couche limite s'est donc décollée, et un écoulement désordonné entoure la main. Il en est de même quels que soient la vitesse de la main ou son angle d'attaque. En 2002, l'ingénieur américain Barry Bixler a obtenu des résultats analogues en utilisant une autre technique : une simulation numérique, à l'aide des équations de la mécanique des fluides, de l'interaction eau-main.

Contester l'applicabilité du théorème de Bernoulli à la propulsion du nageur ne signifie pas pour autant nier tout rôle à la portance. L'inclinaison de la main par rapport à la direction de la vitesse donne nécessairement à la résultante des forces de pression une composante orthogonale à la vitesse. Et si un autre phénomène donnait une importance particulière à la portance ? Au moment où les bernouillistes perdent du terrain, une nouvelle idée retient l'attention : la théorie du vortex. Les enregistrements vidéo subaquatiques ont en effet mis en évidence les tourbillons importants que produisent les nageurs.

Principalement défendue par Cecil Colwin (1984), entraîneur olympique en Afrique du Sud, puis au Canada, cette théorie est fondée sur une analogie avec le mode de propulsion des poissons : il se formerait, autour de la main et des jambes de l'athlète, des tourbillons similaires à ceux produits par la nageoire caudale d'un poisson en mouvement (voir la figure 5). Le cycle du bras du nageur (ou de la nageoire caudale) est divisé en deux phases.

Durant la première, la main (ou la nageoire) se comporte comme une aile d'avion. D'après les lois de l'aérodynamique, il se forme à l'arrière de l'aile un tourbillon dit de démarrage, dû à l'écoulement de l'air de la zone de haute pression (sous l'aile) vers la zone de basse pression

(au-dessus). Ce tourbillon de démarrage engendre autour de l'aile un autre tourbillon de sens de rotation opposé, nommé tourbillon lié. En raison de son sens de rotation, le tourbillon lié augmente la vitesse de l'air situé sur l'aile et diminue celle de l'air situé sous l'aile, rendant encore plus importante la différence de pression entre le dessus et le dessous de l'aile et, par conséquent, la portance. Selon les tenants de la théorie du vortex, il se forme autour de la main du nageur un système tourbillonnaire de ce type, et la propulsion dériverait essentiellement de la portance.

...ainsi que pour le vortex

Un tourbillon lié ne peut toutefois être maintenu à l'infini. La seconde phase du mécanisme entre alors en action : lorsque la main change de direction, le tourbillon de démarrage se détache et se dirige vers l'arrière. En vertu de la troisième loi de Newton, il se produit alors, en réaction au détachement de cette masse vers l'arrière, une accélération du corps vers l'avant.

La théorie du vortex a suscité des objections. Il est difficile de démontrer la

présence de tourbillons liés autour de la main du nageur. Cette théorie implique aussi l'existence d'accélération lorsque la main change de direction. Or les mesures ont au contraire montré que le barycentre de l'athlète décélère durant les changements de direction de la main, et que les accélérations se produisent à peu près à la moitié de la phase propulsive.

Ces mesures sont effectuées à partir d'enregistrements vidéo d'athlètes, au moyen de logiciels d'analyse biomécanique, ou encore grâce à des capteurs microélectromécaniques (MEM). Ces minuscules dispositifs de mesure, qui contiennent un accéléromètre et un gyroscope triaxiaux, sont placés dans une ceinture ou un bracelet. Les données mesurées, c'est-à-dire les accélérations le long des trois axes et les vitesses angulaires autour de ces axes, sont traitées par des algorithmes complexes pour fournir d'autres informations utiles : vitesse, fréquence du cycle du bras, roulis, symétrie droite-gauche, etc.

Les profils d'accélération et de décélération obtenus par ces mesures semblent cohérents avec la théorie de la traînée : dans ce modèle, lors d'un changement de

DÉPART ET VIRAGE

Le départ, le virage et la phase de glisse subaquatique sont trois phases fondamentales et souvent décisives lors d'une compétition. Certains champions, tel Michael Phelps, se détachent de leurs concurrents grâce à leur maîtrise parfaite de ces trois gestes techniques. Les entraîneurs et les techniciens accordent donc une attention toute particulière à la mesure, l'analyse et l'amélioration de ces moments.

L'un des dispositifs les plus avancés, tel celui de Canberra, en Australie (ci-contre), comporte deux caméras synchronisées placées au-dessus et en dessous de la surface de l'eau. Le plot de départ est équipé d'une plate-forme de force, c'est-à-dire de capteurs capables de mesurer, dans les trois directions de l'espace, les forces que le nageur transmet au plot au moment du plongeon. Ces forces sont visualisées en temps réel sur un diagramme et peuvent



Le plot de départ (ici à l'Institut australien du sport, à Canberra) est équipé de capteurs de force. Des points sur le corps de l'athlète facilitent l'analyse biomécanique des enregistrements vidéo.

être superposées aux enregistrements vidéo, sous la forme d'un vecteur. Les grandeurs cinématiques telles que l'angle de pénétration dans l'eau ou la distance parcourue sont aussi mesurées directement sur la vidéo grâce à des logiciels d'analyse biomécanique. Une série de barrières magnétiques situées à intervalles réguliers dans la ligne de nage permet de mesurer les temps de passage. Au total, plus de 30 paramètres sont pris en

compte et enregistrés dans une base de données qui contient des informations sur les performances de centaines d'athlètes.

Le système prévoit enfin une visualisation en temps réel ou après un bref intervalle sur un écran en bord de piscine, afin que l'athlète puisse revoir quasi immédiatement sa performance. La mémoire exacte du geste effectué reste en effet imprimée dans le cerveau du sportif moins d'une minute.

direction, la main cesse de repousser l'eau vers l'arrière, et produit donc une traînée moins efficace pour propulser le corps, qui décélère. En outre, c'est à la moitié de la phase propulsive que la vitesse de la main est la plus élevée – et c'est bien à ce moment-là que l'on observe les accélérations.

Décrochage retardé

Une autre tentative d'explication du mécanisme de propulsion du nageur, enfin, a été proposée en 2000, en particulier par le Hollandais Huub Toussaint, du Centre de recherche sur la natation d'Amsterdam. Cette théorie part d'un constat : la dynamique des bras du nageur implique de tels changements de vitesse et de direction qu'il est impossible de l'analyser avec les lois utilisées jusqu'alors. Ces mêmes lois ont d'ailleurs montré leurs limites, se révélant incapables d'expliquer le vol des insectes (le paradoxe du bourdon, qui ne devrait pas voler d'après cette théorie, en est un exemple célèbre) et de certains

petits oiseaux. Durant les années 1990, divers travaux ont mis en évidence, lors de la natation, une série d'effets complexes dits non stationnaires, parmi lesquels le décrochage retardé et le tourbillon de bord d'attaque, qui produisent, chez certains insectes, une portance supplémentaire leur permettant de voler.

Le décrochage retardé a été observé dès les années 1930 lors d'expériences visant à étudier le vol des insectes : lorsque l'angle d'attaque d'une aile modèle placée dans un écoulement fluide est grand, le décrochage est retardé. Ce décrochage retardé entraîne la formation d'un tourbillon sur le bord d'attaque de l'aile (la partie la plus en amont) qui réduit la pression au-dessus de l'aile, augmentant ainsi la portance. Selon H. Toussaint, les mêmes effets sont à l'œuvre durant le mouvement du bras en crawl, et les meilleurs nageurs seraient ceux qui réussissent instinctivement à les exploiter pour se propulser.

Roue à aubes, godille, ailes d'avion, poissons, insectes et oiseaux : pourquoi est-il

aussi difficile de fournir une explication qui satisfasse la majorité des chercheurs ? Il y a plusieurs raisons à cela. En premier lieu, le mouvement d'un nageur est bien plus complexe que celui d'une roue, d'une hélice ou même d'un poisson ou d'un oiseau. Il suffit de penser aux degrés de liberté du bras humain pour s'en convaincre. Il est donc difficile de créer des simulations fluidodynamiques ou des mécanismes qui reproduisent avec exactitude le mouvement de l'athlète et, par conséquent, celui de l'eau.

La plupart des simulations utilisées en ingénierie sont conçues pour des corps rigides et recourent à des simplifications (vitesse constante, symétrie axiale ou planaire, etc.) qui ne conviennent pas aux dynamiques en œuvre en natation. Les méthodes de simulation numérique en mécanique des fluides étant toutefois de plus en plus raffinées et les ordinateurs de plus en plus puissants, certaines simulations se rapprochent étonnamment de la réalité. Les simulations et mesures expérimentales montreront d'ailleurs probablement, quand elles auront encore

LE SECRET DES SUPERCOMBINAISONS DE NATATION

Les combinaisons intégrales en polyuréthane, les « supercombinaisons », ont révolutionné le monde de la natation. Elles sont apparues en 2008, quelques mois avant les jeux Olympiques de Pékin. Entre 2008 et 2009, elles ont notablement amélioré les performances des athlètes : plus de 100 records mondiaux ont été battus, certains avec une marge déconcertante (le record du 4 × 200 mètres féminin en petit bassin a été pulvérisé de huit secondes !). Les supercombinaisons me-

naçaient l'essence même de la natation, au point que la Fédération internationale de natation (FINA) décida de les interdire fin 2009, malgré les énormes intérêts économiques en jeu.

Quelle est la différence entre une supercombinaison et une combinaison intégrale classique ? Quel avantage procure-t-elle au nageur ? La supercombinaison est née du travail d'ingénieurs de l'aérospatiale, de physiologistes, de biomécaniciens et de fluidodynamiciens de trois continents. Plus de 100 matériaux dif-

férents ont été testés, les corps de plus de 400 athlètes ont été scannés en trois dimensions, et les modèles ainsi obtenus ont été insérés dans des simulations numériques de mécanique des fluides (*voir la figure*). Des essais en soufflerie et en bassin hydrodynamique ont aussi été réalisés.

À l'origine, la supercombinaison était constituée de deux matériaux : un tissu semblable au nylon qui sert de base, et des inserts en polyuréthane soudés par ultrasons pour éviter les coutures, qui produisent une traînée. Depuis, certains modèles concurrents sont fabriqués uniquement en polyuréthane. Les expériences menées en bassin hydrodynamique mettent en évidence une réduction de la traînée par rapport aux combinaisons traditionnelles. À quoi est due cette différence ? Probablement à trois facteurs :

Le premier est la réduction de la traînée de frottement. Même si cette composante est moins importante que la traînée de forme, présenter au contact de l'eau la surface la plus lisse possible a une influence.

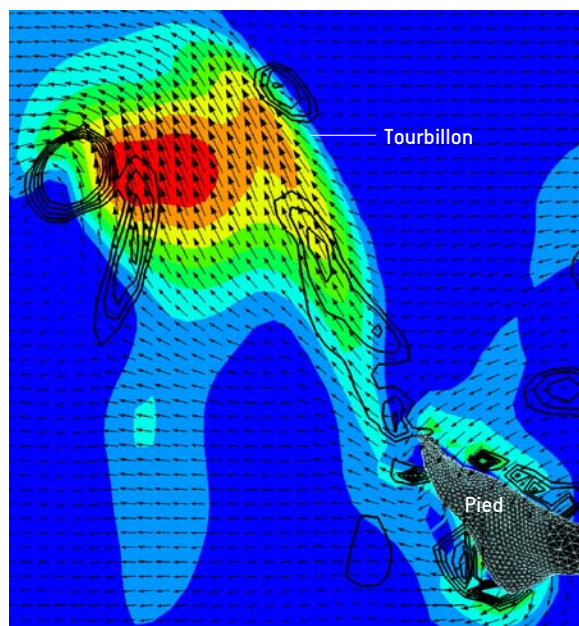
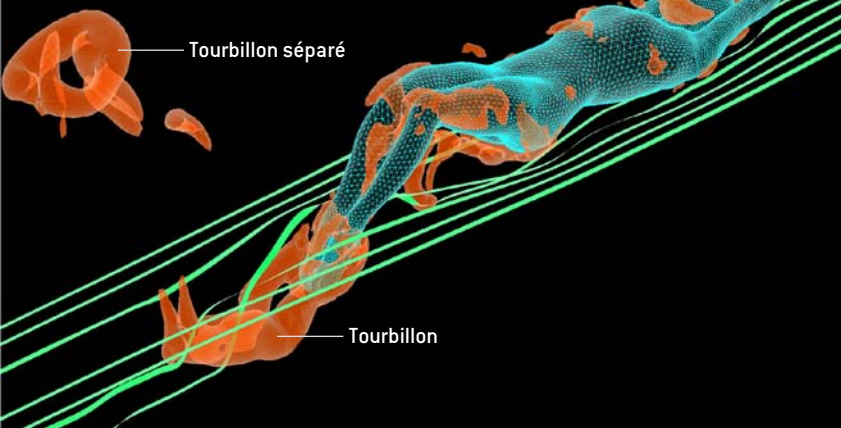
Les combinaisons en polyuréthane sont plus lisses que les autres. Le deuxième facteur est la réduction de la traînée de forme. Les supercombinaisons sont beaucoup plus serrées que les autres. Il faut près de 30 minutes pour enfiler certains modèles. Elles réduisent par conséquent la section frontale de l'athlète. Elles tendent en outre à aplatir les plis formés par les muscles en suspension dans l'eau, rendant la forme de l'athlète plus régulière et retardant le décollement de la couche limite. Des tentatives ont même été faites (sans succès pour l'instant) pour parsemer la surface des combinaisons d'irrégularités (type peau de requin) et favoriser la transition laminaire-turbulent.

Le troisième facteur est physiologique : la contention rend les muscles plus « compacts » en favorisant la circulation du sang, et diminue le temps et le coût énergétique des contractions musculaires nécessaires aux mouvements de l'athlète. Les tests de laboratoire n'ont pas mis en évidence une amélioration de la flottabilité, qui est du reste expressément interdite par le règlement de la FINA.



Test de la traînée d'une combinaison en polyuréthane. Un câble enroulé par un moteur électrique traîne le nageur à une vitesse contrôlée, tandis qu'un système électronique mesure la force de traction.

4. SIMULATION NUMÉRIQUE de la séparation d'un tourbillon durant un battement de jambes papillon [phase subaquatique]. On crée un modèle du corps en le divisant en milliers de petits éléments. La résolution numérique des équations de la dynamique des fluides, dites de Navier-Stokes, donne le comportement des principales grandeurs du fluide autour du corps, tels les vecteurs vitesse dans le tourbillon (*ci-contre*).



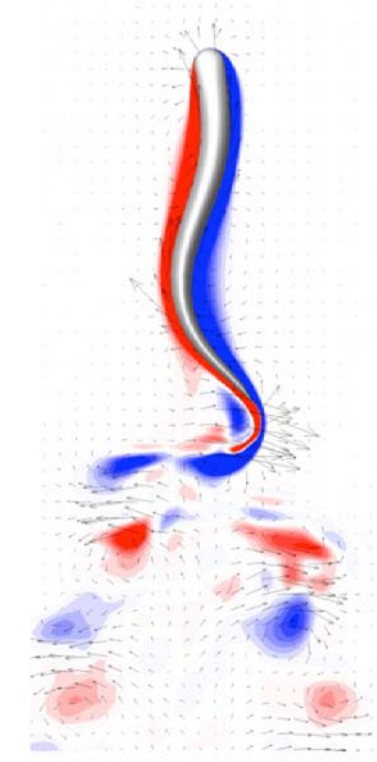
Alfred von Loebeck (Univ. George Washington), Rajat Mittal (Univ. Johns Hopkins)

gagné en finesse, que tous les mécanismes décrits ici interviennent dans la propulsion du nageur, dans des proportions variables en fonction des nages et de la division bras-jambes. Par exemple, lors de la nage papillon, les tourbillons produits par les jambes pourraient avoir un rôle prédominant, tandis que, côté mains, la traînée l'emporterait.

Si la compréhension des mécanismes de la nage est lente, c'est aussi pour des raisons pratiques : les physiciens et ingénieurs qui s'intéressent à la natation sont peu nombreux et ne disposent pas des moyens techniques et financiers des secteurs aéronautique et naval. Enfin, leurs recherches visent souvent à mesurer et à améliorer les performances des nageurs plutôt qu'à approfondir les bases théoriques du mouvement des athlètes dans l'eau.

Améliorer la théorie... et le matériel

Aujourd'hui, les scientifiques suivent deux principales lignes directrices. L'une est la mise au point de simulations plus fines et de méthodes de mesure plus précises afin de démontrer expérimentalement les diverses théories de la propulsion. En effet, aucune équipe n'a jusqu'ici pu fournir des preuves irréfutables à l'appui de ses thèses. L'autre ligne directrice consiste à appliquer des connaissances théoriques et des avancées technologiques à l'amélioration de la technique des nageurs. L'évolution des différentes théories a poussé les entraîneurs



Reproduit avec la permission de S. Kern et P. Koumoutsakos, JEB, 2009, 4041-4057, 2006

5. SIMULATION DES TOURBILLONS produits par la nageoire caudale d'un poisson vu de dessus et des vecteurs vitesse du fluide autour de l'animal. En bout de course d'un côté du corps, la nageoire amorce son mouvement vers l'autre côté. Le tourbillon bleu se détachera alors de la nageoire, tandis qu'un tourbillon dans l'autre sens (*en rouge*) apparaîtra à sa place. Ces tourbillons augmentent la vitesse du poisson. Un phénomène similaire pourrait intervenir aux pieds du nageur.

à proposer plusieurs modifications dans l'exécution du mouvement de bras, sur la longueur de la phase de glisse subaquatique, la trajectoire à adopter sous l'eau, la rotation des épaules ou la position de la tête. Enfin, malgré l'interdiction des supercombinaisons, les simulations et expériences visant à mettre au point des matériaux plus performants ont toujours le vent en poupe : costumes en fibres de carbone et lunettes intégrées au bonnet de bain pour réduire la traînée sont les dernières marottes du moment (*voir l'encadré page ci-contre*).

Les aptitudes de l'homme à se mouvoir dans l'eau semblent limitées : ses «nageoires» sont trop longues et trop fines et sa technique discutable. Son efficacité propulsive – rapport entre la puissance utile à la propulsion et la puissance totale produite (la puissance utile et celle qui s'est dissipée dans l'eau) – est faible comparée à celle des poissons. Calculée de façon indirecte à l'aide de mesures expérimentales et de modèles hydrodynamiques de l'homme dans l'eau, elle serait d'environ 50 pour cent, tandis que celle des poissons est estimée à 80 pour cent. Cela signifie que l'homme disperse la moitié de son potentiel propulsif et que sa technique, même si elle s'améliore d'année en année (les records en natation progressent bien plus vite qu'en athlétisme), n'a pas encore trouvé son point d'aboutissement. ■

Retrouvez plus d'informations sur
www.pourlascience.fr



Quand les accordent

1. LES ÉLÉPHANTS D'AFRIQUE
vivent en sociétés matriarcales.
Ils émettent des cris variés et sont
capables d'imiter des sons
entièrement nouveaux.