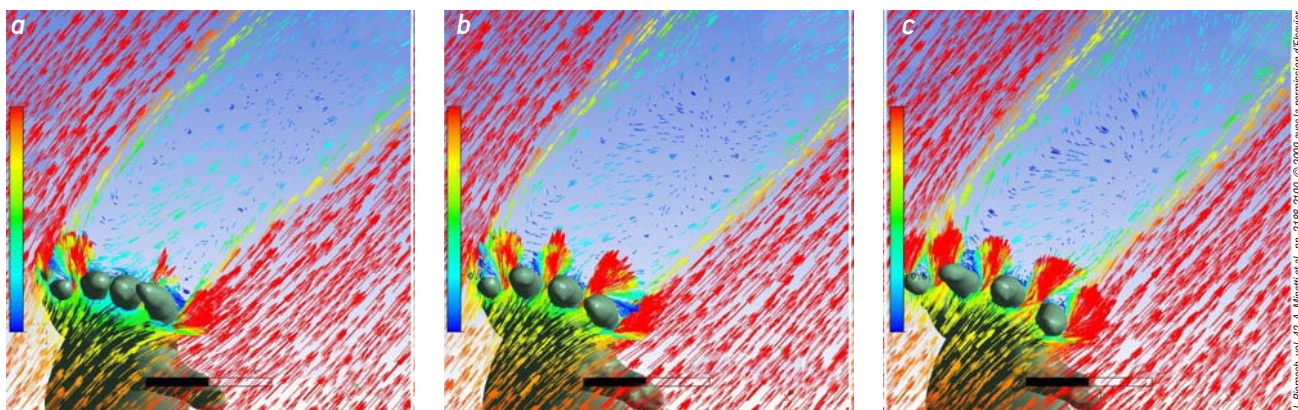




3. QUELQUES SIMULATIONS NUMÉRIQUES DE LA MAIN DU NAGEUR. Selon une étude réalisée en 2009 par Alberto Minetti, de l'Université de Milan, en Italie, et ses collègues, l'écartement optimal des doigts – de 12 degrés (b) – est celui qui trace le sillage le plus large.

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.