

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.