

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/281289284>

Les facteurs mécaniques de la performance dans la locomotion aquatique : résistance de friction et traînée de pression

Chapter · January 2011

CITATIONS

0

READS

30

4 authors, including:



Robin Candau

French National Institute for Agricultural R...

152 PUBLICATIONS **2,719** CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Fabio Borrani

University of Lausanne

71 PUBLICATIONS **992** CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Les facteurs mécaniques de la performance dans la locomotion aquatique : résistance de friction et traînée de pression

Candau R. ¹, Le Mieux A. ¹, Sanchez A.M.J. ¹, Borrani F. ²,

¹ Faculté des Sciences du Sport, UMR 866, Université Montpellier I, 2 Place Viala, 34060 Montpellier

² Department of Sport and Exercise Science, Building 734.304, 261 Morrin Rd, Tamaki Campus, The University of Auckland, Glen Innes, Auckland, Nouvelle Zélande

La vitesse qui peut être maintenue dans la locomotion dépend du rapport de la puissance métabolique sur le coût énergétique. Si les aptitudes énergétiques qui contrôlent la puissance métabolique sont maintenant bien caractérisées, les facteurs qui régissent le coût énergétique de la locomotion aquatique sont quant à eux moins bien connus. Dans ce premier volet, les deux premières origines des résistances hydrodynamiques ainsi que leurs conséquences pratiques qui en découlent sont présentées.

Mots clefs : natation, résistance hydrodynamique, coût énergétique, rendement de la propulsion

The speed maintained during locomotion depends upon the relationship between the metabolic efficiency and the energetic cost. The metabolic characteristics controlling the energy output are well known; the factors that control the energetic cost are, however, not yet completely elucidated. In this first section, we will present the first two origins of the hydrodynamic resistance as well as their practical consequences.

Key words: swimming, drag, energy cost, efficiency of propulsion.

LES MAMMIFERES SEMI AQUATIQUES

La nage représenterait une simple modification de la locomotion terrestre. Contrairement à la théorie qui veut que les mammifères aient d'abord été aquatiques avant d'être terrestres, plusieurs observations sur la nature de l'évolution du squelette des mammifères permettent maintenant d'envisager une histoire où les mammifères ont eu de la terre collée sous les pattes avant de pouvoir s'enfoncer dans l'océan (Wikipedia, 2010). Les mammifères n'auraient pas été marins avant d'être terrestres mais bien l'inverse.

De ce point de vue, le mouvement alternatif des segments dans l'eau serait une simple adaptation des patrons moteurs de la marche ou du trot. Pourtant, plusieurs mammifères n'utilisent que deux de leurs segments pour nager donc rien à voir *a priori* avec la locomotion terrestre quadrupédique. Cette contradiction n'est qu'apparente car il s'agit d'une petite subtilité dans le processus d'évolution dans le sens d'une meilleure adaptation au milieu et en particulier vers un déplacement plus économique. Le passage de mouvements quadrupédiques à une locomotion aquatique utilisant seulement deux segments a pu être accompli grâce à l'acquisition d'une épaisse fourrure capable d'emprisonner de l'air et qui autorise un gain de flottabilité. Pour certains mammifères particulièrement bien adaptés au milieu aquatique comme une espèce de *rat australien*, seules les pattes avant assurent la propulsion et celles de derrière n'interviennent que très discrètement pour réguler la direction. Les nageurs avec leur « pull boy » (petit flotteur) ne font qu'imiter le *rat australien* en corrigeant à leur manière leur problème de flottaison. Ce petit artifice permet de limiter le moment de tangage qui tend à faire tomber les pieds au fond de la piscine et améliore ainsi grandement la glisse (*di Prampero, 1986*).

Il existe des mammifères semi aquatiques à l'instar de l'homme, qui sont capables à la fois de se mouvoir dans l'élément liquide comme sur la terre ferme. Leur position intermédiaire dans le règne animal et dans le processus évolutif des mammifères, est particulièrement intéressante. S'ils sont capables de tout, ils ne sont pas très performants dans l'eau ni sur terre. L'homme qui se place volontiers au sommet de l'échelle de l'évolution est ramené ici à une place moins glorieuse. C'est le plus mauvais nageur si on le compare à des mammifères de masse équivalente (Figure 1) et encore la performance présentée ici concerne que la rare frange de la population qui pratique régulièrement la natation. Au sein du règne animal, plus on possède un gros gabarit plus on est économique. Il s'agit essentiellement du facteur taille qui est sous-jacent. Comme nous le verrons plus loin une grande taille fournit un avantage

hydrodynamique certain. Pour une masse donnée, le coût de la nage en surface et celui de la nage immergée sont bien différents l'un de l'autre ce qui souligne l'importance de la traînée de vague en surface.

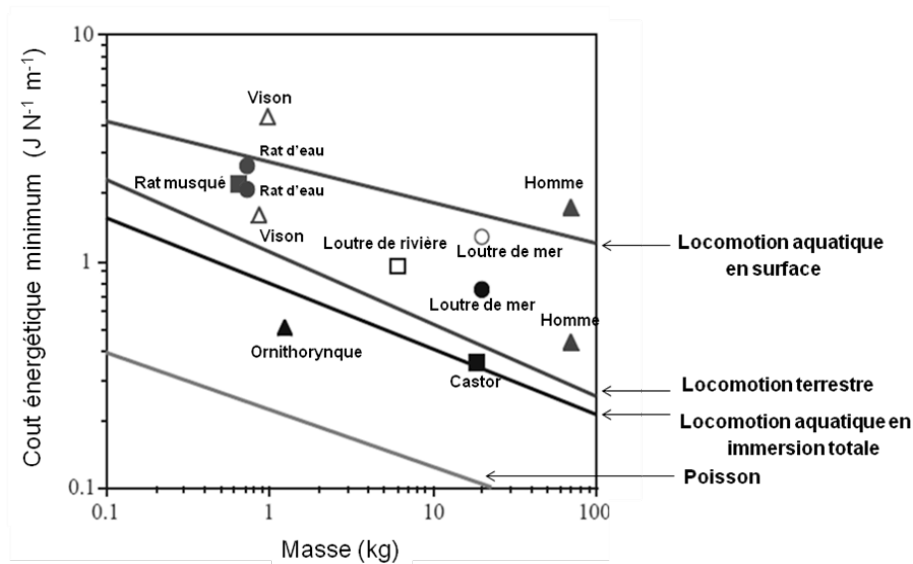


Figure 1. Relation entre l'économie minimale de déplacement et la masse corporelle chez les mammifères semi aquatiques avec une comparaison par rapport aux poissons (tiré et adapté de Fish et Baudinette, 1999).

Lorsque l'on compare notre économie de nage à celle des poissons, nous découvrons avec stupeur que l'homme possède un coût énergétique de nage 22 fois plus mauvais que celui du poisson de taille équivalente (Fish et Bodinette, 1999). Les poissons représentent les êtres vivants les plus économiques dans leurs déplacements. Parmi les mammifères semi-aquatiques, une meilleure économie de nage est observée pour la loutre, l'otarie, le castor et l'ornithorynque par rapport à l'homme. Cet avantage provient d'une locomotion totalement immergée et à des mouvements ondulatoires de propulsion pour les mammifères semi aquatiques. On verra plus loin pourquoi la locomotion totalement immergée est bien plus économique que celle de surface. Quant aux mouvements ondulatoires, ils sont à la fois plus esthétiques et plus performants que les mouvements alternatifs des segments corporels surtout lorsque les mouvements ondulatoires sont associés à l'utilisation de segments qui ont évolué vers une forme aplatie de foil. Il est possible de caractériser le foil comme une aile portante immergée. L'homme est aussi le plus mauvais coureur si on le compare encore une fois à des mammifères de masse équivalente (Figure 1, Fish et Bodinette, 1999). Quoi qu'il en soit l'homme est davantage un terrien qu'un aquatique si on en juge par son coût énergétique quatre

fois plus élevé en natation que lors de la course. Le rat nous ressemble étrangement de ce point de vue. Lui aussi est nettement meilleur coureur que nageur à l'exception de l'espèce australienne que nous avons citée précédemment et qui nage aussi bien qu'elle ne court. A l'opposé de l'homme, cet animal définitivement terrestre, nous trouvons le pingouin excellent nageur mais très peu adapté à la locomotion bipédique comme en témoigne son dandinement caractéristique.

Toujours au sujet de l'économie d'énergie et aussi paradoxal que cela puisse paraître, c'est un déplacement aquatique qui est le plus rentable parmi tous les modes de locomotion humains. C'est surprenant, car 1 litre d'eau est 800 fois plus lourd qu'un litre d'air. En principe, il est donc infiniment plus difficile de fendre l'eau que l'air. C'est d'ailleurs pour cette raison que la natation est beaucoup plus coûteuse que le déplacement sur terre. Alors comment expliquer que la locomotion humaine la plus économique se déroule tout de même en milieu aquatique ? Il s'agit du déplacement en gondole. Avec une telle embarcation, le rendement de la propulsion est extrêmement bon car l'appui du gondolier au fond de la lagune est relativement solide par rapport à la qualité habituelle des appuis dans la locomotion aquatique. Par ailleurs, la vitesse de déplacement de cette embarcation est modeste ce qui implique nécessairement des résistances à l'avancement minimales. Ces dernières évoluent avec le carré de la vitesse, ce qui explique leur faible importance dans le cas de la gondole. Enfin et surtout, on peut transporter beaucoup de poids dans l'embarcation sans trop augmenter les résistances hydrodynamiques. Du coup, lorsque l'on exprime l'énergie dépensée par kg déplacé, ce qui est le critère consacré pour caractériser l'économie d'une locomotion, le déplacement en gondole est associé au plus faible coût énergétique jamais mesuré.

Autre surprise, la propulsion humaine permet d'atteindre la vitesse de 35 km/h sur l'eau ! Comment est-ce possible ? Evidemment pas avec une gondole. Tout est dans l'usage de foils, ces petites surfaces portantes qui permettent de s'affranchir de la fameuse vitesse limite que nous évoquerons plus loin. La puissance humaine étant extrêmement modeste en regard de celle dont dispose la plupart des espèces animales, seuls les foils permettent à une embarcation ultra légère de déjauger et de diminuer sa surface en contact avec l'eau et donc d'accélérer avec la seule puissance humaine. Les nageurs de l'élite mondiale arrivent eux aussi, mais dans une proportion plus modeste, à déjauger. Leur vitesse de sprint leur permet d'augmenter légèrement leur portance et de se comporter un peu comme un hors bord. A quand un nageur monté sur foils qui survolera les vagues à l'image de ces kayakistes en équilibre instable juchés sur leur curieuse embarcation ?

LES FACTEURS DE LA PERFORMANCE

Si l'homme affiche de faibles aptitudes à la locomotion aquatique par rapport aux autres mammifères semi aquatiques, les nageurs peuvent améliorer dans des proportions étonnantes leurs performances. Les compétiteurs peuvent s'entraîner très durement pendant de longues années dans ce but. Deux stratégies sont possibles : centrer son effort sur l'entraînement spécifique en enchaînant le plus possible de compétitions et d'entraînements qui y ressemblent, ou développer séparément les divers facteurs qui contrôlent la performance. En réalité, ces deux stratégies ne s'excluent pas mutuellement mais se complètent utilement car si l'entraînement spécifique est le plus efficace, *in fine*, il est extrêmement contraignant et ne peut être réitéré indéfiniment. Il s'agit avant tout d'accumuler les charges d'entraînement les plus lourdes possibles afin de déterminer les adaptations les plus profondes possibles. Les adaptations doivent naturellement porter sur les facteurs déterminants de la performance. Mais quels sont-ils exactement ? Comme pour toutes les locomotions humaines, la performance en milieu aquatique dépend de deux grands types de facteur : ceux liés aux aptitudes énergétiques et ceux en rapport avec l'économie de déplacement :

$$\bar{V} = \frac{\dot{E}}{C} \quad (1)$$

où \bar{V} est la performance ici exprimée en terme de vitesse moyenne en m.s^{-1} , \dot{E} est la puissance consommée en W et C est le coût énergétique en J.m^{-1} (di [Prampero](#), 1986). La puissance consommée par le nageur, ou par tout autre athlète ou tout autre mammifère, est déterminée par trois grandes aptitudes énergétiques distinctes : la capacité anaérobie, la consommation maximale d'oxygène ($\text{VO}_{2\text{max}}$), l'endurance c'est-à-dire le pourcentage de $\text{VO}_{2\text{max}}$ maintenu sur un temps donné. Sur de courtes distances, c'est la première aptitude qui prédomine alors que sur de longues distances ce sont les deux autres. Quant au deuxième grand type de facteurs de la performance en milieu aquatique, ce sont ceux qui contrôlent le coût énergétique.

En natation, les femmes sont plus économiques d'environ 30% que leurs homologues masculins pour des vitesses sous maximales (di [Prampero](#), 1986). Encore un domaine où les femmes sont supérieures aux hommes! Cette différence semble s'expliquer en partie par une inclinaison optimale du corps sur le plan hydrodynamique en rapport avec une composition corporelle plus favorable pour la flottaison en position parfaitement horizontale. Toutefois l'avantage en termes de coût énergétique semble disparaître lorsque l'on exprime le coût énergétique en fonction des dimensions corporelles. Cela sous entendrait que la différence de

coût énergétique est simplement liée à la différence de surface frontale entre homme et femme. Pour l'élite mondiale, l'avantage en terme de coût énergétique n'est pas forcément en faveur de la gente féminine en raison du facteur taille qui possède un impact plus important sur les résistances hydrodynamiques spécialement à hautes vitesses comme nous le verrons plus loin, les nageurs de sexe masculin étant plus grands que leurs homologues féminins.

L'âge influence le coût énergétique de façon nettement plus marquée que le genre. Ainsi, au cours de l'adolescence le coût énergétique est amélioré et donc la performance aussi et ceci de façon indépendante des quantités d'entraînement ([Zamparo et al., 2006](#)). Ceci veut dire qu'à un niveau d'entraînement identique, un jeune adulte a besoin de moins d'énergie pour parcourir une distance donnée qu'un préadolescent ou un adolescent. Intuitivement, on pourrait penser que c'est la même histoire qu'en course à pied. Sur terre, on devient de plus en plus économique au fur et à mesure que nos jambes s'allongent. Dans l'eau, l'amélioration de l'efficacité de la propulsion dépend nécessairement un peu de l'allongement des bras et de la taille totale comme nous le verrons plus loin dans la section sur les résistances hydrodynamiques, mais aussi de la force musculaire des membres supérieurs ainsi que vient de le proposer Zamparo ([Zamparo et al., 2006](#)). Sous l'influence des processus de maturation qui s'opèrent notamment au niveau de la masse musculaire, le nageur devient progressivement plus puissant. Il profite aussi d'une propulsion plus efficace et cela se constate notamment au travers d'une distance parcourue plus grande à chaque cycle de bras. Cette relation entre force musculaire et efficacité de propulsion est retrouvée dans une situation opposée : dans le développement de la fatigue. A l'épuisement, la force musculaire dont dispose encore le nageur n'est plus suffisante pour conserver des trajets moteurs efficaces. On comprend dès lors l'utilité du renforcement musculaire qui peut être réalisé par la musculation chez les nageurs de compétition. Il reste à saisir pourquoi la force musculaire conditionne de façon si importante l'efficacité de propulsion. Déjà, parce que les masses musculaires qui permettent de mouvoir les segments supérieurs sont relativement petites par rapport à celles des membres inférieurs. De surcroît, ces muscles sont constitués d'une proportion importante de fibres rapides, entendez par là rapidement fatigables. Quels sont les facteurs du coût énergétique en natation ? Nous venons de voir que la taille et la force musculaire possèdent une influence sur deux grandeurs qui elles-mêmes sont en rapport direct avec l'économie de déplacement : les résistances hydrodynamiques et l'efficacité de propulsion. Le coût énergétique peut être exprimé en fonction du rendement musculaire global (η) et du travail total fourni par mètre $[(W)_{tot}]$ en $J.m^{-1}$:

$$C = \frac{W_{tot}}{\eta} \quad (2)$$

Dans la locomotion aquatique, le rendement de la propulsion dépend quant à lui du rapport suivant :

$$\eta_P = \frac{W_d}{W_{tot}} \quad (3)$$

où W_d est le travail utile, celui nécessaire pour vaincre les résistances hydrodynamiques exprimé aussi en $J.m^{-1}$.

En combinant les équations 2 et 3, il devient évident qu'une augmentation du rendement de la propulsion détermine une diminution de C et *vice versa* (Zamparo *et al.* 2006) :

$$C = \frac{W_d}{\eta \cdot \eta_P} \quad (4)$$

Avec l'équation 4, il apparaît immédiatement aussi qu'une réduction des résistances hydrodynamiques permet une optimisation du coût énergétique. Avec cette équation, nous cernons deux facteurs mécaniques essentiels de la performance : le rendement de la propulsion et les résistances hydrodynamiques. Comme nous allons le développer ultérieurement, ces deux facteurs dépendent des caractéristiques anthropométriques du nageur, mais encore plus de sa maîtrise technique.

Le déplacement du nageur génère nécessairement une force qui s'oppose à son avancement. Cette résistance est d'ailleurs parfaitement en équilibre avec la force propulsive produite à vitesse constante. Cette force contre laquelle le nageur doit orienter son énergie recouvre l'ensemble des résistances hydrodynamiques. Elles sont de trois ordres essentiellement distincts : la traînée de friction, celle de pression et la résistance de vague.

LA TRAÎNÉE DE FRICTION

La traînée de friction est liée à la viscosité de l'eau, ou de n'importe quel fluide dans lequel un mouvement survient.

Résistances hydrodynamiques (N)

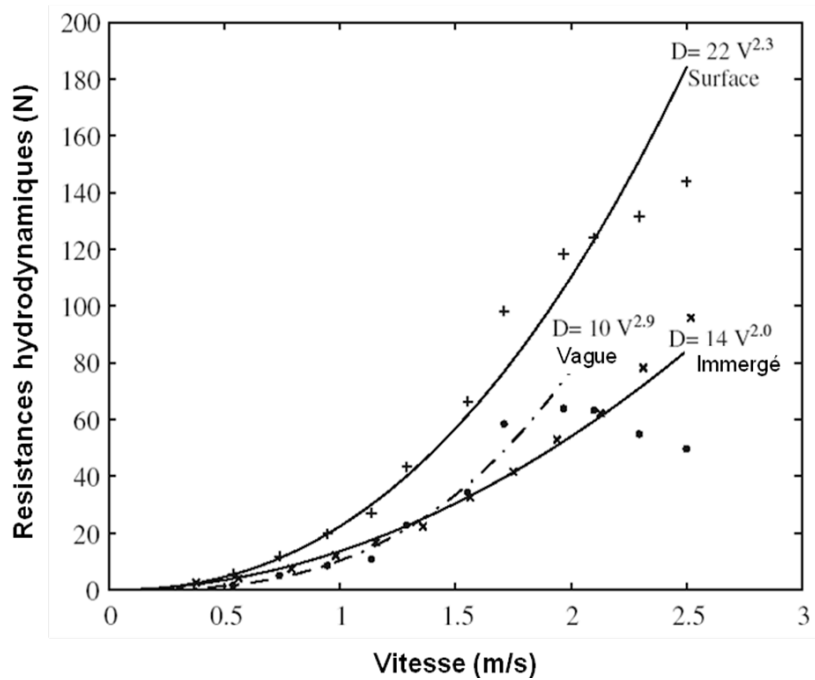


Figure 2. Relation entre les résistances hydrodynamiques en fonction de la vitesse de nage. Les trois types de traînée hydrodynamiques sont présentés séparément (tiré et adapté de Vennell et al., 2006).

Il s'agit essentiellement de forces de friction entre les différentes couches d'eau qui peuvent se mouvoir les unes par rapport aux autres. La viscosité de l'eau s'exprime au travers du coefficient de viscosité (C_v) qui vaut $0,897 \cdot 10^{-3} \text{ N.s.m}^{-2}$ à une température de 26°C . La couche d'eau directement en contact avec le nageur colle littéralement à sa peau par des forces de cohésion relativement importantes. C'est d'ailleurs grâce à cette force d'adhésion qu'il est possible de faire monter un liquide dans un capillaire. Dans le cas du nageur, cette couche d'eau se déplace à la même vitesse que son corps. La vitesse de l'eau diminue de plus en plus au fur et à mesure que l'on s'éloigne du corps du nageur. Evidemment, les couches d'eau éloignées du nageur ne sont pas animées de mouvement. Au total, les filets d'eau à proximité du corps du nageur sont retardés par la couche immédiatement à son contact. Cette même couche est elle-même retardée par celle qui la jouxte et ainsi de suite jusqu'à ce que l'eau soit calme.

Aussi longtemps que l'eau qui entoure le nageur est organisée en couches, l'écoulement est dit laminaire et les résistances à l'avancement se limitent essentiellement à la traînée de friction. Au-dessus d'une certaine vitesse, le flux commence à devenir turbulent et une nouvelle forme de traînée apparaît. Les résistances augmentent soudain vers 1 m.s^{-1} (Figure

2). En ce qui concerne la traînée de friction, retenons qu'elle est relativement faible et qu'elle est dépendante de l'ensemble de la surface mouillée et de la rugosité de surface. Assez logiquement, plus la rugosité est importante, plus grande est la résistance de friction.

LA TRAÎNÉE DE PRESSION

Le début des turbulences intervient de façon subite et marquée et se manifeste pour un nombre critique de Reynolds (Re , sans dimension). De façon générale, le nombre de Reynolds permet de caractériser la nature (laminaire, transitoire, turbulent) de l'écoulement d'un fluide autour d'un corps en mouvement. Dans le cas du nageur le nombre critique de Reynolds est atteint pour une valeur $4,5 \cdot 10^6 Re$ (Toussaint *et al.*, 2000).

$$Re = \frac{v \cdot L \cdot \rho}{C_v} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 1000}{0,897 \cdot 10^{-3}} = 4\,459\,309 \quad (5)$$

où v est la vitesse du nageur, L sa longueur, ρ la densité de l'eau et C_v le coefficient de viscosité de l'eau. La vitesse qui correspond au nombre de Reynolds critique de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ indique que quasiment dans toutes les compétitions de natation sur courtes distances, l'écoulement de l'eau est nécessairement de type turbulent et les résistances hydrodynamiques sont majeures. L'équation (5) met en outre en exergue le fait que la traînée de pression est dépendante de la taille. Cela explique pourquoi les recordmen et recordwomen sont de grandes tailles et pourquoi le coût énergétique diminue avec l'âge de l'enfance à l'âge adulte.

La traînée de pression est liée au fait que le flux laminaire au contact du corps du nageur doit nécessairement se séparer en un certain point. La localisation de ce point de décollement dépend de la forme et des dimensions du corps ainsi que de la vitesse du nageur. Au-delà de ce point précis, le flux se renverse et forme alors deux tourbillons distincts. Il en résulte naturellement une asymétrie de pression entre l'avant et l'arrière du corps du nageur. Si l'on plonge la main à l'avant d'un bateau qui se déplace, cette dernière est vigoureusement plaquée contre la proue. C'est la manifestation de la pression élevée qui règne à l'avant du corps en mouvement. Et maintenant, si l'on passe à l'arrière du bateau, on peut alors observer des tourbillons dans son sillage. Il s'agit de la dépression qui se forme à l'arrière d'un corps en déplacement et qui dévie de façon drastique le trajet des filets d'eau. L'importance de cette asymétrie de pression dépend de la surface que le nageur offre à l'eau et de la forme de son corps.

La traînée de pression (T_p) dépend essentiellement de la vitesse :

$$T_p = \frac{1}{2} SC_x \rho v^2 \quad (6)$$

où SC_x est le coefficient de traînée de pression avec S la surface frontale offerte aux filets d'eau en m^2 et C_x le coefficient forme du corps du nageur (sans dimension puisqu'il s'agit en fait d'un rapport).

L'analyse de l'équation (6) révèle que le nageur doit se maintenir le plus à plat possible sur l'eau afin de minimiser la surface offerte aux filets d'eau (S). À l'opposé, rappelez-vous que le déplacement avec les pieds qui frottent contre les carreaux de la piscine représente ce qu'il y a de pire pour les résistances hydrodynamiques et donc pour l'économie de déplacement et la performance. Le moment de tangage est très important chez le nageur néophyte et nécessairement les résistances hydrodynamiques aussi. Pour glisser, il est nécessaire de s'allonger et d'immerger la tête. C'est d'ailleurs le premier élément à acquérir pour le débutant avant de penser à affiner l'efficacité de la propulsion. En outre, il est nécessaire de placer la tête dans le prolongement du reste du corps toujours dans le but de minimiser la surface frontale offerte à l'eau. Pour y parvenir, il est impératif d'immerger presque totalement la tête. Une des astuces qu'utilisait Popov, le nageur russe qui a dominé le sprint dans les années 1990, consistait à fixer du regard le fond de la piscine afin de conserver la tête parfaitement en ligne. Une hyper extension du cou avec le regard porté en avant comme on en ressent spontanément le besoin pour apprécier ce qui se passe devant provoque immédiatement une répercussion négative sur l'hydrodynamisme. Voir ou glisser, il faut choisir! La tâche se complique encore un peu plus lorsque l'on doit respirer. L'inspiration est opérée idéalement sans augmenter la surface frontale, donc sans se désunir et sans majorer les résistances hydrodynamiques. Une simple rotation latérale du nageur amplifiée par celle de sa tête permet de trouver de l'air frais dans le creux de la vague créé par la vitesse du nageur et cela sans perturber l'équilibre horizontal, le fameux moment de tangage alors que le réflexe initial du néophyte consiste à dégager très nettement la bouche de l'eau afin d'inhaler avidement de l'air aussi loin que possible de l'écume.

La traînée de pression évolue avec le carré de la vitesse et la résistance de vague quant à elle évolue avec le cube de la vitesse si bien que les résistances totales évoluent avec $v^{2,3}$. La résistance est majeure en surface (figure 2, de la courbe du haut. Si le nageur est immergé à une profondeur d'un mètre (figure 2, courbe du bas), la résistance est alors largement diminuée

simplement parce que le nageur ne lève plus de vague dans son sillage. Seule la traînée de pression s'oppose alors à son déplacement. Si l'on retranche la courbe du bas à celle du haut on obtient celle du milieu, la traînée de vague (figure 2). Autrement dit, si l'on soustrait la traînée de pression à la traînée totale on peut alors visualiser la traînée de vague. A une vitesse 2 m/s (7,2 km), la résistance de vague représente 60% de la traînée totale

En conclusion, si les différences de performances entre nageurs peuvent provenir de leurs aptitudes énergétiques, l'essentiel de la performance demeure cependant dépendant du coût énergétique et donc de ses facteurs mécaniques. Ces facteurs mécaniques sont liés notamment à la traînée de frottement et à celle de pression. Le coefficient de traînée hydrodynamique (SCx) quant à lui caractérise l'ensemble des aptitudes du nageur à glisser. Pour le minimiser, il convient d'optimiser le moment de tangage en étant le plus à plat possible sur l'eau malgré les contraintes mécaniques liées à la nécessité de se propulser et de respirer. Le tronc demeure gainé chez les nageurs d'élite et la tête dans le prolongement. La taille détermine grandement l'importance des résistances. L'hyper extension du membre supérieur en début de phase de glisse constitue en quelque sorte une augmentation de la taille du nageur et favorise ainsi sa glisse. Enfin, l'étude de l'effet du processus de maturation sur l'amélioration des performances permet de mettre en exergue l'importance de la force musculaire dans le placement optimal des surfaces motrices et cela dès le début du cycle de nage. D'où l'importance de la musculation et du renforcement musculaire dans les progrès du nageur tant sur l'efficacité de propulsion que sur la glisse, la traînée active étant bien supérieure à la traînée passive.

REFERENCES

[Di Prampero PE, The energy cost of human locomotion on land and in water, International Journal Sports Medicine, 1986, vol. 7, n°2, pp. 55-72.](#)

Fish FE et Baudinette RV, Energetics of locomotion by the Australian water rat, The Journal of Experimental Biology, 1999, vol. 202, pp. 353–363.

ORGANISME : Wikipedia, Titre : Les mammifères, Disponible sur : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Mammif%C3%A8re> (consulté le 5/03/2010).

Toussaint HM, Hollander AP et al, Exercise and Sport Science, Philadelphia: Lippincott & Wilkiins, 2000, pp. 639-660.

[Vennell R, Pease D et al, Wave drag on human swimmers, J Biomech, 2006, vol. 39, n° 4, pp. 664-71.](#)

Zamparo P, Pendergast DR et al, An energy balance of front crawl, Eur J Appl Physiol, 2005 May, vol. 94, n° 1-2, pp. 134-44.

Zamparo P, Effects of age and gender on the propelling efficiency of the arm stroke, Eur J Appl Physiol, 2006 May, vol. 97, n° 1, pp. 52-8.