

G. Cazorla

R. Montpetit*

J.-C. Chatard.**

Aspects biologiques de la natation de compétition.



ÉDITORIAL.

Il n'est jamais aisé d'aborder le domaine de la recherche en sport, particulièrement pour les pratiques les plus anciennes reconnues de base ou éducatives comme peuvent l'être l'athlétisme, la gymnastique et la natation.

A partir d'expérimentation personnelle menée en symbiose avec la Fédération française de natation à l'I.N.S.E.P., Georges Cazorla a réussi dans un contexte international puisque en liaison avec le Québec sur des thèmes de recherche semblables, une synthèse très riche et dense des résultats obtenus à Montréal, Saint-Etienne et Paris.

S'appuyant sur une documentation très fournie et récente, les informations contenues dans cet ouvrage devraient pouvoir faire progresser nos connaissances et particulièrement aider ceux et celles qui ont la responsabilité de les transmettre et de former les entraîneurs et cadres. Elles devraient avoir aussi l'avantage de nous remettre en cause, bousculant les « à priori » pseudo-scientifiques.

Améliorant les informations sur les aspects biologiques nécessaires à la réussite sportive, ce document devrait permettre à chacun d'apprécier la valeur des jeunes talents et, ainsi, de leur proposer les conditions de préparation adéquates.

Patrice Prokop,
Directeur technique national.

▲ Entraînement à l'INSEP.

◀ Dispositif étanche permettant le recueil des gaz expirés et de la F.C. au cours de la nage.

A. Tuba coudé par lequel entre l'air inspiré.

B. Valve Rudolph 2700.

C. Pince-nez.

D. Tuyau souple (Beckman Ø 30 mm) par lequel l'air expiré est orienté vers un robinet à plusieurs voies débouchant dans des sacs de Douglas.

E. Fil électrique de l'électrocardiographe.

SERVICE RECHERCHE ET ÉVALUATION
C.R.E.P.S. BORDEAUX
653, COURS DE LA LIBÉRATION
33405 TALENCE CEDEX

* Département d'Éducation physique de l'université de Montréal
P.Q. Canada.

** Laboratoire de Physiologie du sport — U.E.R. de médecine
de Saint-Etienne.



QUEL que soit le sport, il est assez banal de constater l'amélioration constante et parfois extraordinaire de la performance au cours de son siècle d'existence. En natation, par exemple, une simple lecture des résultats obtenus lors des jeux Olympiques depuis 1908 (fig. 1), date à laquelle cette discipline fut un peu plus codifiée, permet de constater que le 1 500 m style libre se nage aujourd'hui à une vitesse plus rapide que se nageait le 100 m en 1920 ! De même, au cours de son actuel record du monde du 800 m nage libre, Salnikov aurait battu de près de 200 m l'équipe américaine du relais 4 × 200 m championne olympique en 1920 !

Aussi étonnants, d'autres exemples pourraient encore souligner les exploits de tels ou tels très jeunes garçons ou filles pulvérisant des performances pourtant très réputées d'ainés aux palmarès brillants.

Pareils progrès sont très probablement le fruit d'une meilleure connaissance et d'une maîtrise plus efficace des

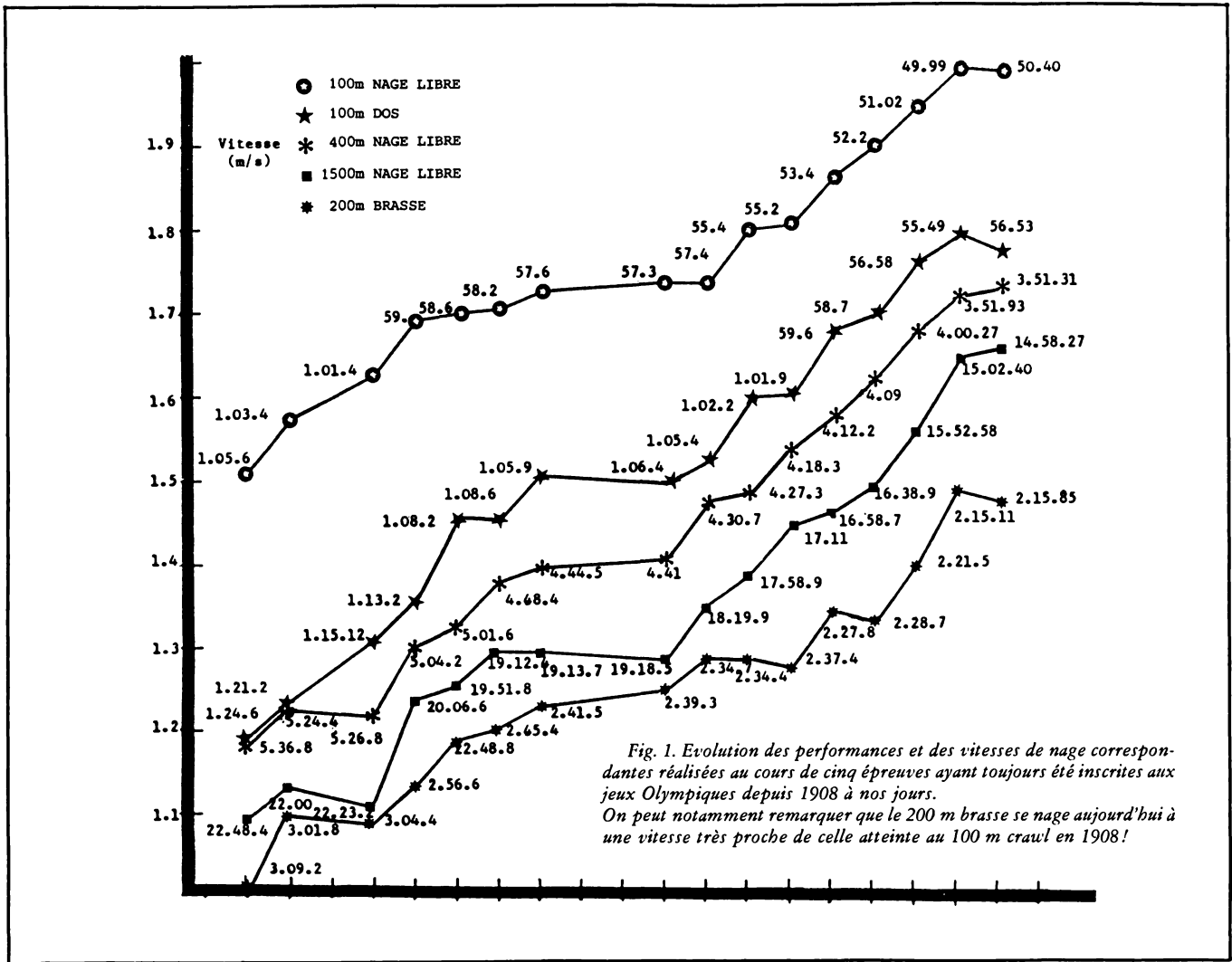


Fig. 2. Proposition d'un modèle soulignant les interactions qui soutiennent la réalisation d'une performance sportive.

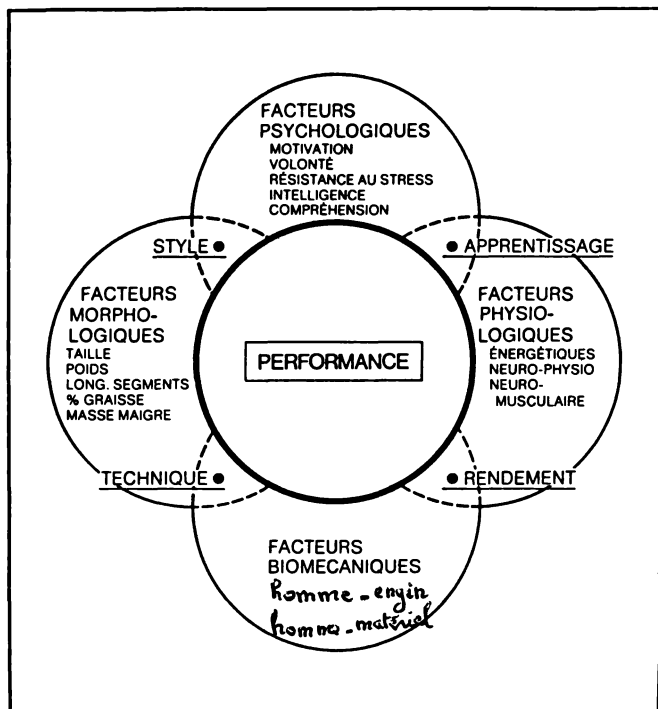
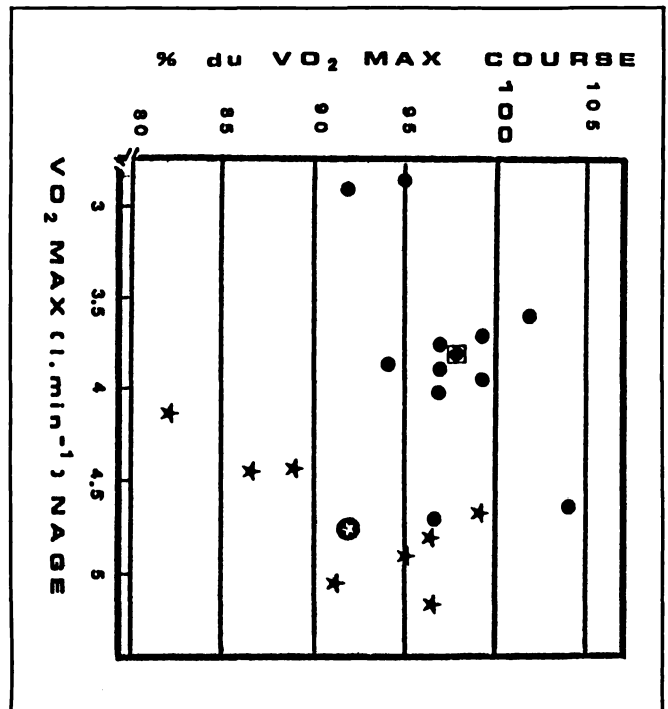


Fig. 3. Pourcentages des valeurs de «VO2 max-course» atteints par le «VO2 max-nage».

□ Moyennes des pourcentages de la population 1.
 ⊙ Moyennes des pourcentages de la population 2.



nombreux facteurs qui entrent en jeu dans la réalisation d'une performance (fig. 2). Leur mise en évidence et la compréhension de leurs actions respectives, résultent d'un cheminement bien singulier : sans cesse confronté aux urgences du terrain, longtemps l'entraîneur a dû répondre au coup par coup, procédant le plus souvent par essais et erreurs, et ne s'appuyant que sur son expérience ou, dans le meilleur des cas, sur des connaissances empruntées quelquefois avec bonheur, aux sciences humaines et biologiques. Depuis environ une trentaine d'années cette situation s'est radicalement transformée. Probablement poussé par des enjeux politiques, financiers ou tout simplement par la saine curiosité de l'homme, le sport est devenu un puissant moteur de la recherche scientifique qu'il peut parfois totalement générer.

Aujourd'hui, plus que la connaissance des différents facteurs pris isolément, c'est incontestablement le rôle de leurs interactions dans la réalisation d'une performance sportive donnée qui suscite curiosité et intérêt. Des voies très larges empruntées par les premiers balbutiements de la recherche dans les domaines des activités physiques et sportives, de plus en plus prévaut actuellement la prise en compte de la spécificité d'une discipline. C'est dans cette dernière perspective que, depuis 1976¹, s'inscrivent nos travaux centrés essentiellement sur la natation pratiquée à un haut niveau.

Cette étude se propose d'en établir le premier bilan plus particulièrement dans deux domaines dont l'interaction confère à la natation toute son originalité et en fait un sport bien à part : le domaine biomécanique et plus particulièrement hydromécanique et le domaine bioénergétique.

I^e PARTIE

QUELLES SONT LES EXIGENCES DE LA HAUTE PERFORMANCE EN NATATION ?

La réponse à cette question suggère de distinguer parmi les qualités fondamentales requises par toute pratique sportive (morphologiques, organiques, énergétiques, psychologiques, sociologiques...) celles qui sont plus particulièrement exigées par la natation de haut niveau. Leur mise en évidence procède d'une démarche comprenant trois niveaux :

- la comparaison de la performance natation à celles d'autres disciplines sportives et notamment à la course à pied;
- une réflexion sur les lois qui régissent la locomotion aquatique;
- et la construction d'un profil référentiel du nageur de haut niveau issue de l'observation et de la mesure *in situ* de nombreux cas.

Est-il bien légitime de comparer la natation à la course ?

Parce que les compétitions de natation et de course à pied présentent certaines analogies : activités à mouve-

ments cycliques se déroulant, selon les épreuves, dans des durées assez semblables, on a souvent coutume de vouloir les comparer. Par exemple, on compare volontiers les 200, 400, 800, 1 500 et 5 000 m course aux 50, 100, 200, 400 et 1 500 m nage qui présentent des durées assez voisines comprises entre environ 20 s et 15 min. Si, exprimées en fonction de leur intensité et de leur durée, les performances correspondant à ces distances peuvent raisonnablement laisser penser que les mêmes sources d'approvisionnement énergétiques sont sollicitées, ici devrait s'arrêter toute analogie.

Comparaisons des valeurs bioénergétiques du nageur et du coureur.

Même si on ne devait se référer qu'aux aspects biologiques, il existe un certain nombre de variables physiologiques pour lesquels on constate une nette différence entre les sportifs de haut niveau (recordmen, vainqueurs olympiques, maîtres ès sports, etc.) des deux activités.

La consommation maximale d'oxygène (ou $\text{VO}_2 \text{ max}$) qui constitue un indice fondamental de la capacité de l'organisme à produire une certaine quantité d'ATP² par voie aérobie, se situe rarement au-dessous de $75\text{-}80 \text{ ml min}^{-1}\text{kg}^{-1}$ chez les coureurs d'élite de demi-fond et de fond, alors que des valeurs inférieures ($60\text{-}70 \text{ ml min}^{-1}\text{kg}^{-1}$) sont beaucoup plus fréquentes chez le nageur de niveau international. Il faut toutefois remarquer que ces valeurs sont ramenées au kilogramme de poids corporel qui, du fait de la poussée d'Archimède, revêt une moindre importance dans l'eau. La masse adipeuse du coureur, généralement plus faible, peut aussi partiellement expliquer ces différences.

Quoi qu'il en soit, avec un $\text{VO}_2 \text{ max}$ inférieur à $70 \text{ ml min}^{-1}\text{kg}^{-1}$ le coureur peut difficilement espérer atteindre le niveau mondial surtout dans le 3 000 et le 5 000 m, ce qui n'est pas le cas du nageur. Cette première différence résulte du fait que l'énergie dépensée par mètre parcouru est assez voisine chez tous les coureurs de très haut niveau (Margaria et coll., 1975), ce qui montre que, contrairement à la natation (Holmer 1974, Montpetit et coll. 1982, Cazorla et Chatard 1983), la technique n'exerce en course que peu d'influence sur la dépense d'énergie. De plus lorsque le $\text{VO}_2 \text{ max}$ est évalué chez les mêmes nageurs à partir de la course et de la nage, selon leurs niveaux technique et d'entraînement, leur morphologie et leur style de nage, les « $\text{VO}_2 \text{ max. — nage}$ » sont en moyenne de 2 à 7 % plus faibles que les « $\text{VO}_2 \text{ max. — course}$ » (Cazorla et Montpetit 1983) (fig. 3). Ces mêmes particularités sont observées lorsque l'on étudie la lactatémie post-compétition. Le lactate plasmatique qui traduit indirectement la capacité de l'individu à produire de grandes quantités d'ATP par voie anaérobie se trouve en plus fortes concentrations ($25\text{-}26 \text{ mM.l}^{-1}$) à l'issue de compétitions de 400 et 800 m course (Arcelli 1977) que celles du 100 et 200 m nage libre ($19\text{-}20 \text{ mM.l}^{-1}$: Sawka et coll. 1979) (voir fig. 22).

En ce qui concerne la récupération après une compétition, on peut aussi remarquer qu'un nageur bien entraîné est capable de répéter de très hautes performances à des intervalles rapprochés, ce qui ne s'est encore jamais vu en course de demi-fond ou de fond sans une

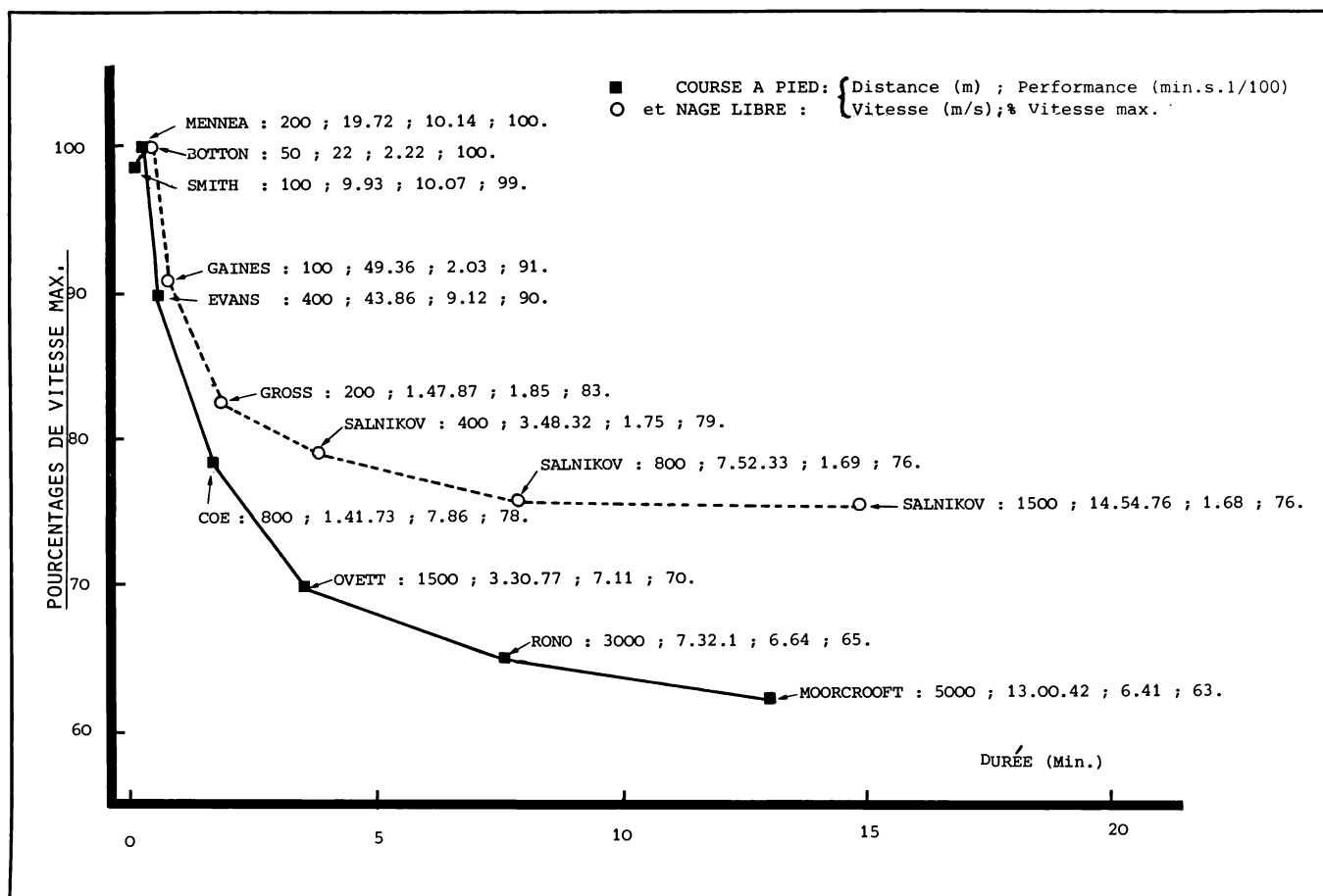


Fig. 4. Décroissance de la vitesse atteinte au cours des records du monde actuels (15.3.84) de course à pied et de nage. La décroissance est exprimée en pourcentage de la vitesse la plus élevée.

recupération de plusieurs heures, voire plusieurs jours. Si nageurs et coureurs présentent autant de différences au niveau de leur dépense énergétique et de leur récupération c'est bien qu'il existe une spécificité de l'intervention musculaire dans chacune de ces deux disciplines. Comme du point de vue de la production ou de l'utilisation de l'énergie, il n'est évidemment pas possible que le muscle du nageur d'élite fonctionne différemment de celui du champion de course, il faut chercher une explication au niveau des masses musculaires, des muscles et des fibres musculaires, sollicités dans les conditions particulières de la locomotion aquatique.

Particularités biomécaniques de la course et de la nage.

L'étude des vitesses réalisées au cours des records mondiaux actuels de course et de nage peut encore aider à bien mettre en évidence les particularités biomécaniques induites par chacun des deux milieux dans lequel se déroulent ces activités. Notons préalablement leur vitesse maximale qui servira de référence.

Celle atteinte en natation par J. Botton au cours du 50 m nage libre (22 s 71) ne s'élève qu'à 2,20 m/s. Elle ne représente environ qu'un cinquième de la meilleure vitesse de course : 10.14 m/s réalisée par P. Mennea sur 200 m (19 s 72). Il est intéressant de remarquer que la diminution de la vitesse à mesure que les distances des

compétitions augmentent (fig. 4), est moins importante en natation qu'en course (Jokl et Jokl 1977 et 1978). Ainsi, la vitesse moyenne de nage sur 1 500 m représente 76 % de celle atteinte par J. Botton au cours de son 50 m record. Par contre, la vitesse moyenne de course sur 5 000 m ne représente que 63 % de celle atteinte au cours du record mondial du 200 m. Ces deux particularités : vitesse maximale et décroissance de la vitesse plus faibles en nage, soulignent la très grande importance jouée par le milieu lors de la locomotion aquatique. Huit cent quatre-vingts fois supérieure à celle de l'air, la densité de l'eau oppose à la translation de tout corps une résistance dont le calcul a fait l'objet de nombreux travaux; la densité de l'eau impose à l'homme un mode de locomotion particulier dont les membres supérieurs, à l'exception de la brasse, assument l'essentiel. De ce fait, dans le meilleur des cas, la puissance propulsive du nageur ne peut atteindre que le cinquième ou le quart de celle du coureur. Cette différence est essentiellement due à l'utilisation des masses musculaires importantes et puissantes des membres inférieurs qui peuvent exercer leur pleine efficacité grâce à l'appui fixe trouvé au sol et à la résistance négligeable opposé par l'air.

A la différence de la natation, cette dernière caractéristique n'interfère pas sur la cadence des foulées qui ne dépend que des possibilités physiologiques et segmentaires du coureur. En résumé, l'utilisation préférentielle des membres supérieurs et donc la sollicitation de masses musculaires moins importantes, ainsi que la cadence moins élevée des cycles propulsifs, expliquent en

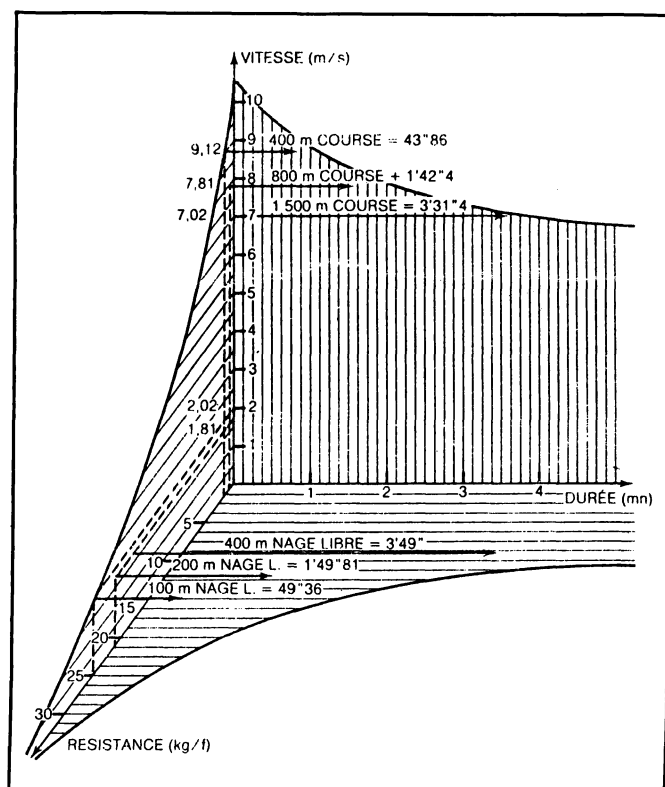


Fig. 5. Analyse tridimensionnelle faisant apparaître l'interaction des composants physiques, biomécaniques et physiologiques dans la course et la nage.

grande partie les valeurs énergétiques moindres observées chez le nageur (Mc Ardle et coll. 1971, Holmer 1974 a).

Inversement, l'utilisation des masses musculaires les plus importantes et les plus puissantes du corps humain, l'appui fixe trouvé au sol par la poussée du pied, la cadence plus élevée des foulées, permettent, certes, de grandes vitesses de course mais s'accompagnent d'une dépense énergétique considérable (Margaria et coll. 1963). Cette dépense est telle, qu'elle devient vite incompatible avec le maintien d'une vitesse aussi élevée, d'autant que l'intense contraction musculaire qu'elle impose contrarie probablement la microcirculation sanguine, et donc l'alimentation énergétique des muscles sollicités.

Les baisses de la vitesse à mesure que la distance s'allonge semblent traduire les limites physiologiques que les meilleurs coureurs peuvent atteindre. En effet, la technique et les conditions liées au milieu ayant beaucoup moins d'importance en course qu'en nage, on peut raisonnablement penser que les limites d'approvisionnement énergétique et les caractéristiques cellulaires des muscles sollicités sont seules à l'origine des grandes différences de vitesse entre sprint et courses de demi-fond et de fond. Au contraire, le milieu aquatique et les techniques de locomotion qu'il induit ne permettent au nageur, même de haut niveau, d'utiliser qu'un certain pourcentage de sa puissance musculaire (Issurin et coll. 1979). Cela peut expliquer les moindres différences observées entre les vitesses records réalisées sur 50 m et sur 1 500 m en natation. Enfin, une dernière observation

peut aussi apporter quelques éléments d'explication : actuellement, l'entraînement spécifique au sprint prépare surtout le nageur aux épreuves du 100 m, voire du 200 m dont le pourcentage d'utilisation d'énergie d'origine aérobie n'est pas négligeable. C'est pour cette raison que l'entraînement du nageur sprinter inclut un volume de travail aérobie beaucoup plus important que celui de son homologue coureur, de telle sorte qu'il est légitime de se demander s'il existe de véritables sprinters en natation ? L'ensemble de ces remarques nous amène à considérer la natation comme une discipline bien à part. Pour mieux en apprécier la spécificité il nous semble judicieux d'analyser la valeur de ses performances à l'intérieur d'un espace à trois dimensions dans lequel la vitesse propulsive, la résistance qu'elle rencontre, et la durée totale de la nage ne peuvent être dissociées (fig. 5).

Vouloir améliorer la performance du nageur c'est, entre autres, savoir jouer sur l'harmonie de leurs interactions... encore faut-il bien connaître les principes et les lois qui les régissent !

II^e PARTIE

QUELS SONT LES PRINCIPES FONDAMENTAUX QUI RÉGISSENT LA LOCOMOTION AQUATIQUE ?

Bien que les différences entre la machine, l'animal et l'homme soient fondamentales, il est possible d'opérer des transferts de connaissances dans les domaines où les lois restent, sinon immuables, du moins très stables.

L'hydrodynamique et l'énergétique en sont deux exemples. Les vitesses atteintes par certains bateaux et la grande efficacité de certains poissons (l'« épée de mer » peut atteindre, par exemple, des vitesses supérieures à 130 km/h), dépendent essentiellement de la puissance de leur propulsion et de leur coefficient de pénétration dans l'eau — en quelque sorte le fameux Cx qui accompagne toute auto nouvellement sortie d'usine.

Par analogie, une des qualités essentielles des nageurs est celle que les spécialistes appellent la « glisse ». Cette qualité, très complexe et difficilement définissable permet au nageur de mieux « glisser » sur l'eau (d'où son nom) après chaque action propulsive, et, pour une puissance de propulsion donnée, contribue à obtenir des vitesses de déplacement supérieures sans augmentation de la dépense d'énergie.

Pour tenter d'analyser les phénomènes qui sous-tendent la glisse, il est à nouveau possible d'utiliser notre modèle à trois dimensions et, dans un premier temps, de s'interroger plus particulièrement sur l'interdépendance des deux forces antagonistes : la résistance et la propulsion auxquelles peuvent se réduire toutes études biomécaniques de la performance du nageur.

- La résistance est la somme des forces qui s'exercent sur le nageur et s'opposent à sa translation.

- La propulsion est la force de sens opposé, égale ou supérieure à la résistance, qui résulte de l'action de surfaces propulsives (hélice, nageoire, bras-main, pied-jambe) s'exerçant sur le milieu. La deuxième loi de Newton définit leur interaction. Elle peut être résumée par l'équation suivante :

$$F - R = (m + \lambda) \cdot \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

dans laquelle F = force de traction (en newton)
 R = résistance hydromécanique (en kg)
 m = masse du nageur (en kg)
 λ = masse de l'eau entraînée par le corps du nageur (kg)

V = vitesse de translation du nageur (en m/s)

t = temps (en s)

La résistance hydromécanique peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$R = \frac{C_x \cdot S \cdot \rho \cdot V^2}{2} \quad (2)$$

dans laquelle C_x = coefficient de résistance hydromécanique

s = la surface du maître-couple (projection frontale de la surface perpendiculaire à la translation) en m^2 .

ρ = densité de l'eau en kg/m^3 .

Lorsque le corps est propulsé à vitesse régulière par un moteur, ou tracté à vitesse constante, la force de propulsion est alors égale à la force de résistance. Les équations (1) et (2) peuvent s'écrire :

$$F = R = \frac{C_x \cdot S \cdot \rho}{2} \cdot V^2 = KV^2 \quad (3)$$

dans laquelle

$K = \frac{C_x \cdot S \cdot \rho}{2}$ représente le coefficient de résistance.

Au cours de la nage, la valeur du coefficient de résistance varie constamment car la surface du maître couple n'est jamais identique à l'intérieur d'un seul cycle propulsif. Il en est de même de la force de propulsion, de telle sorte que chaque moment précis du mouvement se caractérise par un rapport bien déterminé entre les forces de traction, de résistance et d'inertie.

Leurs actions réciproques, remarquablement mises en évidence par Issourin (1977), fait cependant apparaître trois ensembles de facteurs sur lesquels il est possible d'intervenir pour améliorer la performance : le premier est lié au milieu, le second aux caractéristiques hydromécaniques du nageur, le dernier à l'efficacité de la propulsion. Tous trois procèdent des mêmes objectifs : diminuer la résistance et améliorer la propulsion.

Milieu aquatique et performance.

En ce qui concerne le milieu, on sait que du niveau de liaison ou d'agitation des molécules d'eau entre elles dépendent ses trois caractéristiques principales : la « dureté », la densité et la viscosité. La résistance à la translation diminue lorsque diminue le niveau d'attraction entre les molécules d'eau. Cet effet est obtenu par adjonction de sels de carbonate de soude qui précipitent les agents de liaisons intermoléculaires (sels de calcium, magnésium...), et par élévation de la température de l'eau comme le présente le tableau ci-contre

A l'opposé, la propulsion, surtout chez le nageur, requiert une densité de l'eau plus importante de façon à favoriser la prise « d'appuis » des surfaces propulsives qui peuvent alors exercer plus efficacement leurs forces.

De ce point de vue il y a donc contradiction. Vaut-il

mieux favoriser la pénétration dans l'eau ou la propulsion ? Selon les distances de nage un compromis est possible : la résistance opposée par l'eau ne revêt pas la même importance pour le sprinter (qui doit pouvoir avant tout exprimer sa puissance en recherchant des appuis stables) que pour le nageur de longues distances (qui doit surtout économiser l'énergie pour entretenir le plus longtemps possible une vitesse optimale). En conséquence, une température d'eau plus fraîche (20 à 22° C) semble plus favorable aux performances sur courtes distances, et de l'eau plus chaude (26 à 28° C) aux performances sur longues distances. Pour des raisons de thermorégulation susceptibles de perturber l'homéostasie et donc le fonctionnement musculaire (Costill et coll. 1967, Holmer 1974 (a), Holmer 1974 (d))— des températures au-dessus de 28° C et au-dessous de 20° C sont déconseillées.

Du mouvement ou de l'inertie moléculaire dépendent résistance et propulsion. Leur amélioration respective procède des mêmes principes d'utilisation de la dynamique moléculaire.

Résistance à la translation et performance.

L'étude des résistances qui s'opposent aux mouvements du nageur a fait l'objet de très nombreux travaux (lire notamment Miller 1975, Cazorla 1978). Il en ressort que les trois types principaux de résistances mis en évidence : traînée liée à la vague frontale, traînée liée à l'écoulement le long du corps et traînée liée aux remous formés à l'arrière du nageur, dépendent aussi des mouvements moléculaires occasionnés par la translation du nageur.

a. Traînée frontale.

Immédiatement en avant de leur point d'impact, les molécules d'eau sont, dans un premier temps repoussées par les plus gros volumes immergés : tête, épaules, hanches, genoux, pieds, et forment des vagues frontales. Au contraire, à l'arrière de ces mêmes volumes se forment des zones de dépression. Accumulations frontales et dépressions postérieures donnent naissance à un système d'ondes qui se déplacent de part et d'autre du nageur et freinent sa translation. L'importance de la traînée occasionnée par la vague est calculée par l'équation de Froude ⁴ qui montre bien le rôle essentiel joué par la taille et la vitesse de nage du sujet. Bien que la traînée d'onde ne soit pas significative pour des nombres de Froude faibles associés à une vitesse basse, cette traînée a, par contre, une influence plus importante sur la résistance totale lorsque la vitesse est plus élevée (Counsilman 1951). Il va sans dire que la résistance frontale est directement proportionnelle à l'augmentation de la surface antérieure

t° de l'eau (° C)	densité	viscosité (poise)
20	0,998	0,010
25	0,987	0,008
30	0,973	0,005

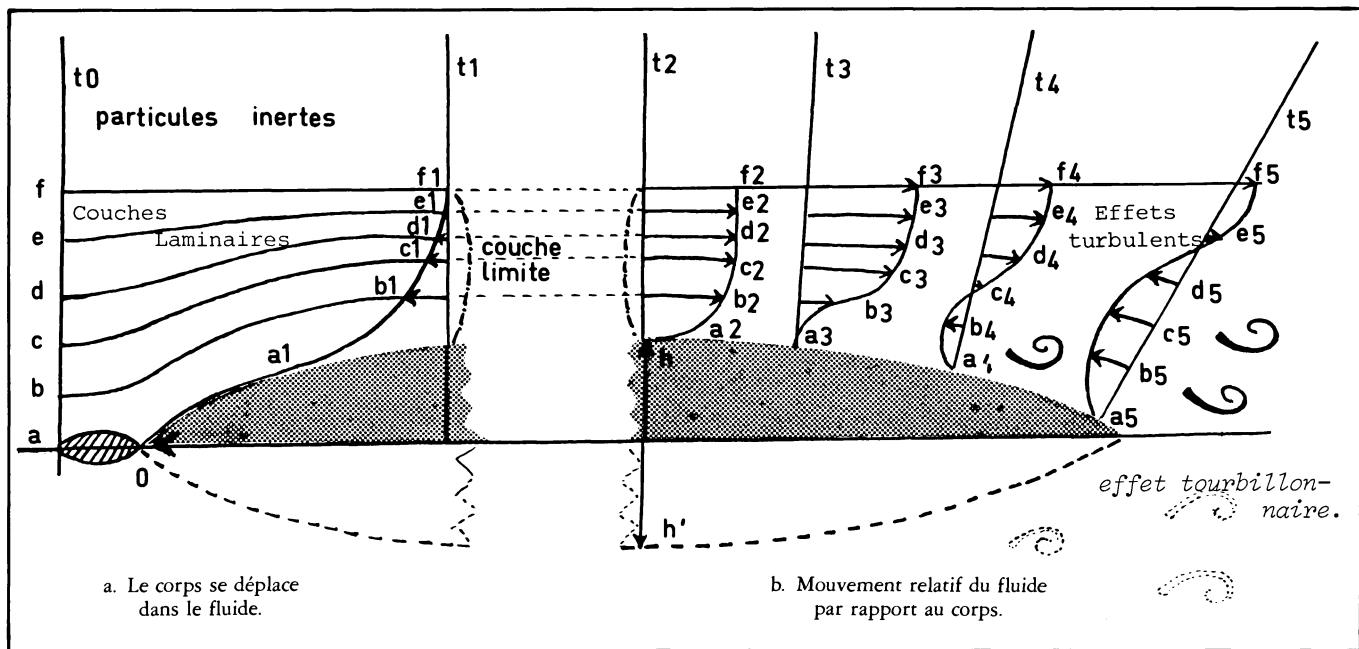


Fig. 6. Evolution des particules fluides à l'intérieur de la couche limite.

qui entre en contact avec les molécules immédiatement en avant du nageur.

Pour une vitesse élevée donnée on peut donc penser que la résistance frontale la plus faible est rencontrée par le nageur en position horizontale. Du fait d'un sens acquis de l'hydrodynamisme, les bons nageurs arrivent à trouver la position la plus proche de l'horizontal compatible avec les besoins techniques et notamment respiratoires et avec leurs caractéristiques morphologiques. Les ondes créées par le nageur se déplacent vers les parois du bassin qui peuvent les répercuter et entraîner ainsi des résistances complémentaires. Pour remédier à cet inconvénient les nouveaux bassins de compétition sont dotés d'un système de trop-plein permettant de stopper les ondes, appelés pour cela « brise-vagues ». De même, les couloirs de nage sont équipés de flotteurs percés qui « absorbent » les ondes.

b. Traînée d'écoulement.

Au passage du nageur, les molécules s'accumulent en avant puis sont écartées et leur écoulement le long de la surface immergée donne naissance à deux types de forces opposées à la translation : l'une s'exerce tangentiellement à la peau, l'autre, liée à la forme du corps et à la viscosité du milieu, est dirigée perpendiculairement à la surface sur laquelle elle s'exerce. Ensemble ces deux forces déterminent la *résistance d'immersion* qui dépend à la fois des qualités de l'épiderme : rugosité, système pileux, élasticité, « fluidité », de la forme totale du corps et de ses reliefs particuliers. En se séparant pour s'écouler le long des différentes formes et reliefs corporels, la vitesse des molécules s'accélère considérablement. De *laminaire* leur écoulement devient immédiatement *turbulent* (fig. 6) et ce phénomène se produit quel que soit le niveau technique du nageur. Dans tous les cas, en plus de son

propre volume ce dernier doit tracter une certaine quantité d'eau dont l'importance dépendra cependant de la surface de son maître-couple et de son niveau technique. En fonction du style de nage, de la morphologie et du niveau technique du nageur la masse d'eau additionnelle peut s'élever de 6 à 12 % de la masse corporelle du sujet. Pour espérer améliorer le rendement de la nage il y a tout intérêt à minimiser chacun des facteurs qui déterminent la traînée d'immersion : maître-couple, alignement segmentaire de la tête du tronc du bassin et des membres inférieurs, rugosité de l'épiderme (texture spéciale des fibres synthétiques du maillot de bain, épilation ou rasage...). On peut remarquer à cet égard que les femmes sont naturellement avantagées par un profil morphologique plus hydrodynamique que celui des hommes : la plus grande section du corps située au niveau des hanches, une répartition plus harmonieuse du tissu adipeux sous-cutané, des reliefs musculaires moins marqués, une surface du maître-couple moins large... A une vitesse de nage donnée Onoprienko (1968) a pu relever des coefficients de pénétration dans l'eau plus avantageux chez la femme $C_x = 0,072/Re_{0,2}$ que chez l'homme $C_x = 0,079/Re_{0,2}$. C'est peut-être ce qui contribue à expliquer pourquoi les femmes réalisent des performances en moyenne plus proches de celles des hommes en natation qu'en course par exemple.

c. Traînée de remous.

Enfin, à l'arrière du nageur se forme un écoulement « tourbillonnaire », conséquence directe du fractionnement de l'écoulement laminaire initial. Une zone à faible pression est ainsi déterminée. Cette dépression arrière ajoutée à la forte pression frontale exercent sur le nageur un effet de « suction », ce qui augmente la traînée totale. Ce phénomène explique aussi la moins bonne efficacité

propulsive du battement des pieds par rapport aux mouvements des bras. Les pieds travaillant dans une zone où les molécules d'eau subissent des mouvements importants, ne trouvent plus les appuis que leur offrirait un fluide à molécules inertes. C'est ce même principe qui, selon Jurina (1972), expliquerait pourquoi les poissons les plus rapides ont les extrémités de leur nageoire caudale très en dehors du sillage perturbé.

En somme, les pressions qu'exercent de toutes parts les particules de fluide sur le corps en mouvement (ou traînée résultante) sont principalement dues à la vague frontale, aux frictions cutanées, à la viscosité, aux turbulences qui en résultent et, enfin, au remous du sillage. Selon les circonstances, chacune de ces composantes peut à tour de rôle devenir prépondérante. Au moins à basse vitesse, il est admis que la traînée de viscosité joue le rôle le plus important dans la résistance totale (Kozel 1975). Par contre, à grande vitesse, il semble d'après certains auteurs (Counsilman 1955, Prance et Schmidt-Nielsen 1970), que la vague frontale ait une importance telle qu'elle puisse bien constituer à elle seule le facteur limitant de la vitesse de nage.

Enfin, le coefficient de pénétration dans l'eau (C_x), joue un rôle très important surtout aux vitesses de nage les plus élevées. Gadd (1963) à partir d'études réalisées en soufflerie, a établi que le coefficient de pénétration dans l'eau du corps humain s'élèverait à treize fois celui d'un corps hydrodynamiquement bien profilé et possédant le même nombre de Reynolds. En conséquence, plus la vitesse de nage augmente, plus le processus de turbulence s'intensifie. Dans ce cas c'est toute la couche limite qui acquiert l'accélération et se déplace avec le nageur, augmentant la masse à tracter et donc la dépense d'énergie.

Comme conséquence pratique, deux facteurs revêtent une importance capitale en natation : la morphologie et la technique. Premier élément de la technique, la recherche du meilleur profil hydrodynamique devrait être un souci constant du nageur de haut niveau et de son entraîneur. Une bonne extension du corps, un bon placement de la tête, une bonne horizontalité et l'absence d'oscillations latérales, aussi bien en cours de nage, qu'au départ et aux virages, augmentent l'efficacité de la propulsion et sont à l'origine des quelques centièmes de seconde gagnés pour accéder au podium.

*Mesures hydrodynamiques et premiers résultats**

La « glisse » dont dépend partiellement la dépense d'énergie et, en conséquence, la performance est conditionnée par plusieurs facteurs. Certains sont mesurables, d'autres ne peuvent être appréciés que subjectivement. Le poids dans l'eau et les formes corporelles qui déterminent la surface du maître-couple font partie du premier groupe; la qualité de l'épiderme et la manière propre à chaque nageur de « sentir » la position qui minimise les résistances rencontrées, appartiennent au second.

* Mesures obtenues par nos propres travaux.

a. Pesée sub-aquatique

La pesée en immersion totale et en expiration forcée a permis de constater une grande disparité entre les nageurs : les jeunes filles, les nageurs de dos crawlé et de longues distances, sont en moyenne plus « légers » dans l'eau (σ n = 28, $\bar{M} = 2,08 \pm 0,82$ kg, σ dos crawlé n = 12, $\bar{M} = 3,14 \pm 0,39$ kg, σ longues distances n = 19, $\bar{M} = 2,98 \pm 0,48$ kg) que les nageurs des autres styles (σ n = 41, $\bar{M} = 4,06 \pm 0,61$ kg). (Résultats personnels non publiés.)

b. Mesures anthropométriques (photo 2).

Aux mesures classiques : taille, poids, rapports segmentaires, circonférences, diamètres, plis cutanés, ont été ajoutées certaines mesures plus spécifiques de la natation, notamment celles de l'amplitude articulaire des épaules et des chevilles, des diamètres bideltoïdien et bassin-fesses.

Conformément aux résultats publiés par Bulgakova (fig. 26) les tailles et les rapports segmentaires les plus importants caractérisent les nageurs de vitesse en styles libres, dos et quatre nages. Nageurs de dos, de quatre nages et de longues distances présentent une plus grande amplitude articulaire au niveau scapulaire, tandis que cette particularité est enregistrée au niveau des chevilles chez les brasseurs (flexion et rotation externe tibio-tarsienne) et chez les sprinters de styles libre et dos crawlé (extension tibio-tarsienne). Les valeurs moyennes des pourcentages de graisse sont significativement plus élevées chez les jeunes filles ($M = 19 \pm 4$ %) que chez les garçons ($M = 11 \pm 3,8$ %) ce qui confère une meilleure flottabilité aux jeunes filles (Cazorla et coll. 1984). Chez les garçons comme chez les filles, les valeurs de masse maigre les plus importantes ont été relevées chez les sprinters de style libre (50 et 100 m) et à un niveau moindre en brasse, ce qui semble indiquer que la flottabilité a plus d'importance pour obtenir de meilleurs résultats sur les distances longues (400, 800, 1 500 m) alors que la masse maigre joue un rôle prépondérant en sprint (ces particularités seront plus précisément discutées dans les paragraphes suivants).

c. Evaluation de la « glisse ».

Grâce à un appareillage conçu pour tracter à différentes vitesses le nageur allongé à la surface de l'eau (photos 3 et 4, fig. 7 et 8), nous avons mesuré le coefficient individuel de pénétration dans l'eau et étudié ses relations avec le poids en immersion et certaines dimensions biométriques.

La traînée mesurée à 1 et à 2 m/s (le nageur est en position passive) est une fonction du maître-couple, du poids dans l'eau, de plusieurs caractéristiques morphologiques et plus particulièrement de la taille, de la circonférence bideltoïdienne et fessière (Cazorla et coll. 1984; Chatard et coll. 1984).

Par contre, les corrélations négatives trouvées à 1 m/s entre la longueur des membres inférieurs, la surface corporelle et la traînée résultante, disparaissent à 2 m/s. Ainsi, plus la vitesse augmente, plus la force de portance

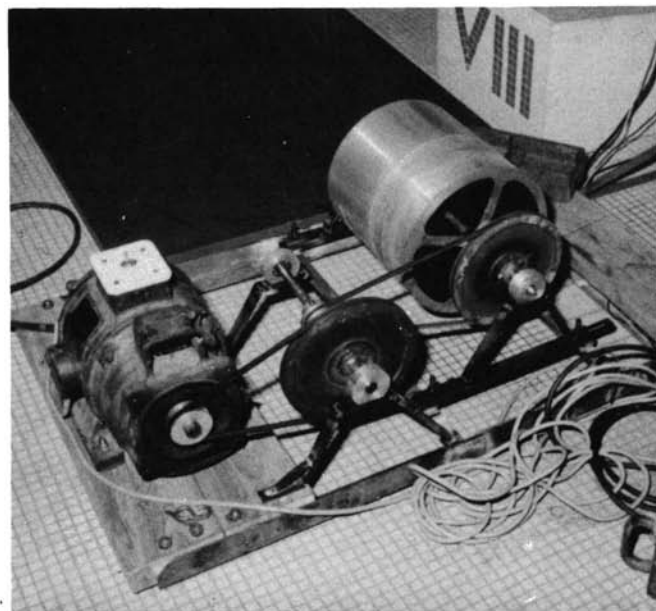
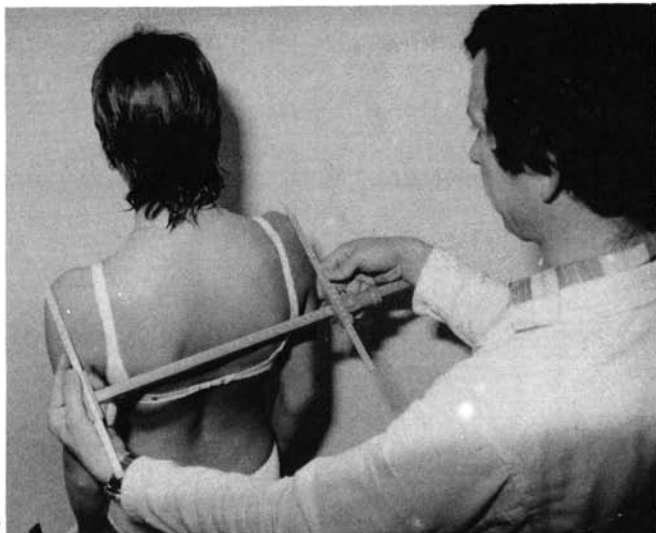


Photo 2. Une des 42 mesures générales et spécifiques des nageurs permettant d'établir les somatotypes par spécialité.

Photo 3. Le nageur allongé à la surface de l'eau est tracté à différentes vitesses. Sa résistance est ainsi mesurée par une chaîne électronique. Ainsi peut être calculé le coefficient de pénétration dans l'eau (ou C_x) de chaque nageur.

Photo 4. Le bricolage peut toujours servir... Moteur électrique et système de poulies permettant de tracter le nageur à différentes vitesses.

(dont nous analyserons les caractéristiques au paragraphe suivant) déjaugé le corps du nageur et notamment sa partie inférieure, ce qui, probablement, réduit son maître-couple et est aussi à l'origine des faibles différences de résistance enregistrées entre 1 et 2 m/s (*tableau 1*).

D'une manière générale, le nageur qui présente le meilleur profil hydrodynamique est grand, « léger » dans l'eau, a un buste plat, des circonférences bideltoidienne et bassin-fesses peu importantes, des reliefs osseux et musculaires ainsi qu'une courbure lombaire peu marquée et un rapport de taille : membres inférieurs/tronc faible.

Efficacité de la propulsion et performance.

Selon la technique choisie, pour se déplacer, le nageur utilise principalement les membres supérieurs et d'une manière moins efficace, les membres inférieurs ainsi qu'une ondulation de son corps tout entier.

Lorsque l'on cherche à améliorer la propulsion, l'examen de quatre composantes s'impose :

- la position du sujet dans l'eau et notamment son angle d'attaque,
- le trajet subaquatique et l'importance des surfaces propulsives,
- la puissance des groupes musculaires qui les activent
- et la cadence optimale des mouvements propulseurs.

a. La position du nageur dans l'eau.

Nous avons indiqué que la position qui offrait la moindre résistance était l'alignement segmentaire le plus horizontal possible. Or, à cause de l'hétérogénéité de la constitution du corps humain (la partie inférieure et notamment les membres inférieurs sont plus denses, alors que la partie supérieure, avec l'air pulmonaire bénéficie d'une bouée naturelle), le centre du volume sur lequel s'applique la poussée d'Archimède et le centre de gravité peuvent être plus ou moins éloignés, ce qui dans l'eau se traduit par un couple de rotation. Si le centre de gravité et le centre du volume coïncident, le sujet peut se maintenir en position horizontale sans mouvement, ce qui est rarement le cas. La position naturelle du corps humain sans mouvement dans l'eau tend vers la verticale. Dans la locomotion aquatique il y a donc toujours double action : recherche de l'horizontalité (ou sustentation) et recherche de la translation (ou propulsion).

Si le nageur veut maintenir une position horizontale sur place ses mains chercheront un effet sustentateur à partir de mouvements en forme de « 8 » (ou godille) très familiers en natation synchronisée.

Lors de la translation du nageur à la surface de l'eau, l'accélération de l'écoulement des molécules d'eau sous son corps, crée une zone de forte pression qui augmente considérablement au niveau de la partie la plus profondément immergée. Les membres inférieurs sont alors « portés » de la zone de forte pression vers la zone de faible pression située au-dessus du corps du nageur. Associée à la vitesse de translation cette différence de pressions crée l'effet sustentateur, plus communément appelé *portance* (*fig. 9*).

	Résistance à 1 m/s (kg/F)	Statistiques test de t	Résistance à 2 m/s (kg/F)	Statistiques test de t
I Jeunes filles toutes spécialités n = 21	5.58 ± .82	I > II 3.36 (P < .01)	11.21 ± 1.01	I > II 5.94 (P < .001)
II Jeunes gens toutes spécialités n = 28	6.32 ± .68	I et III N.S.	12.92	I > III : 2.56 (P < .02)
III Jeunes gens longues distances n = 15	5.92 ± .56	II > III 2.07 (P < .05)	12.02 ± .88	II > III 3.07 (P <01)

Tableau 1. Différences des résistances hydrodynamiques obtenues en tractant en position allongée passive des nageurs(ses) de spécialités différentes. Les jeunes filles en général et les jeunes gens spécialistes de longues distances présentent une résistance significativement plus faible à 1 m/s. Cette différence disparaît quelle que soit la spécialité à 2 m/s. A partir de la formule : $R = K.V^2$, on peut remarquer aussi que le coefficient hydrodynamique K diminue lorsque la vitesse augmente probablement sous l'effet de la force de portance.

% de l'énergie totale	Vitesses de nage (en m/s)				
	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
E_g	66 ± 4,9	51 ± 4,0	36 ± 3,2	20,5 ± 1,2	8 ± 0,4
E_r	34 ± 5,1	49 ± 4,1	64 ± 4,8	79,5 ± 4,8	92 ± 4,5

Tableau 2. Pourcentages des contributions relatives de la dépense d'énergie requise à différentes vitesses de nages pour vaincre la résistance opposée à la translation (E_r) et pour se sustenter (E_g).

La portance dépend donc à la fois de la vitesse du nageur et de l'hétérogénéité de la répartition des masses corporelles (la partie inférieure du corps étant notamment la plus dense), ce qui nous permet de penser que la dépense d'énergie requise pour se déplacer est la résultante de deux composantes, l'une due à la sustentation, l'autre à la propulsion. Leur valeur respective varie inversement en fonction de la vitesse de nage et leur différence augmente aux vitesses de nage les plus élevées (Montpetit et Cazorla 1982).

Du fait de la technique respiratoire et, à l'exception de la brasse, du retour aérien des membres supérieurs après chaque phase propulsive, la recherche de la position horizontale n'est ni très aisée ni quelquefois souhaitable. Effectivement, si le nageur désire obtenir un effet propulseur complémentaire de la part de son battement de pieds, il lui faudra trouver des appuis dans la zone de molécules restées inertes, c'est-à-dire sensiblement au-dessous du sillon perturbé tracé par son passage. C'est le cas du sprinter pour qui, plus que la recherche du meilleur profil hydrodynamique — qui conserve cependant une grande importance — c'est la recherche de tous les appuis possibles (mains et pieds) qui prévaut.

Au contraire, chez le nageur de longues distances, c'est l'économie énergétique de la nage qui est la

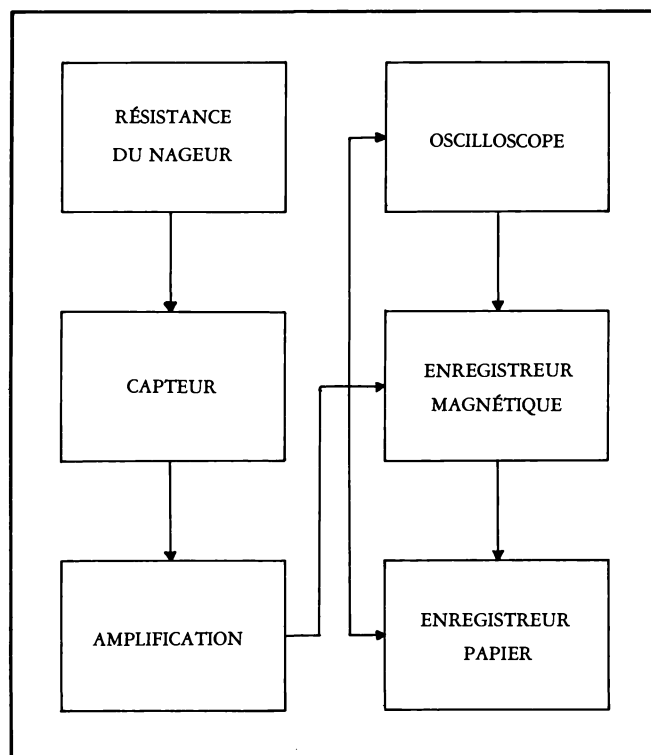
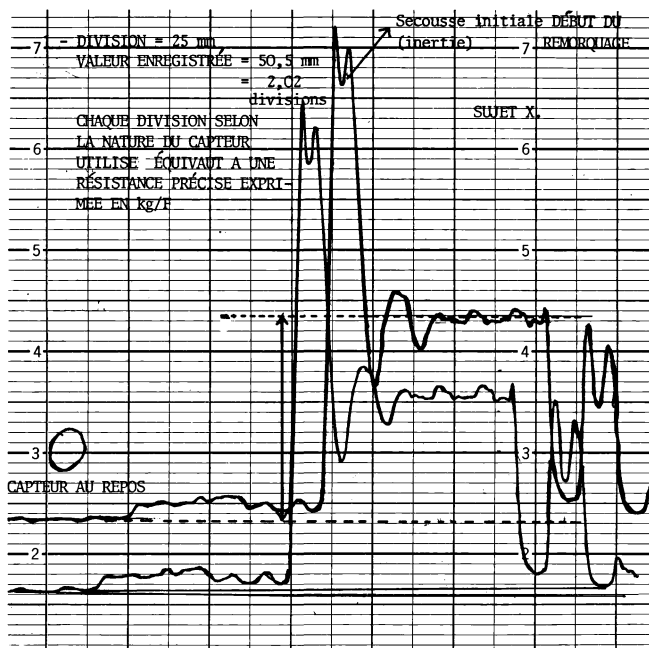


Fig. 7. Synoptique de l'appareillage utilisé.



▲ Fig. 8. Enregistrement sur table traçante de 20 mètres de remorquage du nageur. Le tracé inférieur représente le signal enregistré directement. Le tracé supérieur le signal après enregistrement mécanique; le décalage correspond à celui des têtes d'enregistrement et de lecture à la vitesse de défilement choisie.

condition du succès. Pour lui, le meilleur profil hydrodynamique et donc la position horizontale, sont les conditions *sine qua non*, le rôle du battement de pieds, grand consommateur d'énergie, se limitant à équilibrer la nage.

Entre la position horizontale et la position de recherche de grandes vitesses de nage il y a donc un compromis à trouver qui, pour chaque nageur, dépend : de sa morphologie, de ses capacités énergétiques, du style de nage et de la distance à nager. Ainsi, l'axe longitudinal du corps du nageur devra former un angle plus ou moins fermé avec le plan horizontal de la surface de l'eau, appelé fort justement « angle d'attaque » (fig. 9).

En crawl, en dos et en papillon, la recherche d'un compromis idéal entre l'horizontalité hydrodynamique et l'efficacité biomécanique de la position légèrement oblique, se traduit par une position sensiblement cambrée dans l'eau qui pourrait expliquer la grande ouverture angulaire de l'articulation coxo-fémorale que présentent généralement les grands spécialistes de ces techniques.

Fig. 9. Les effets de la portance et de la traînée dans la propulsion.
A. Au niveau du corps entier du nageur.
B. Au niveau de la main.

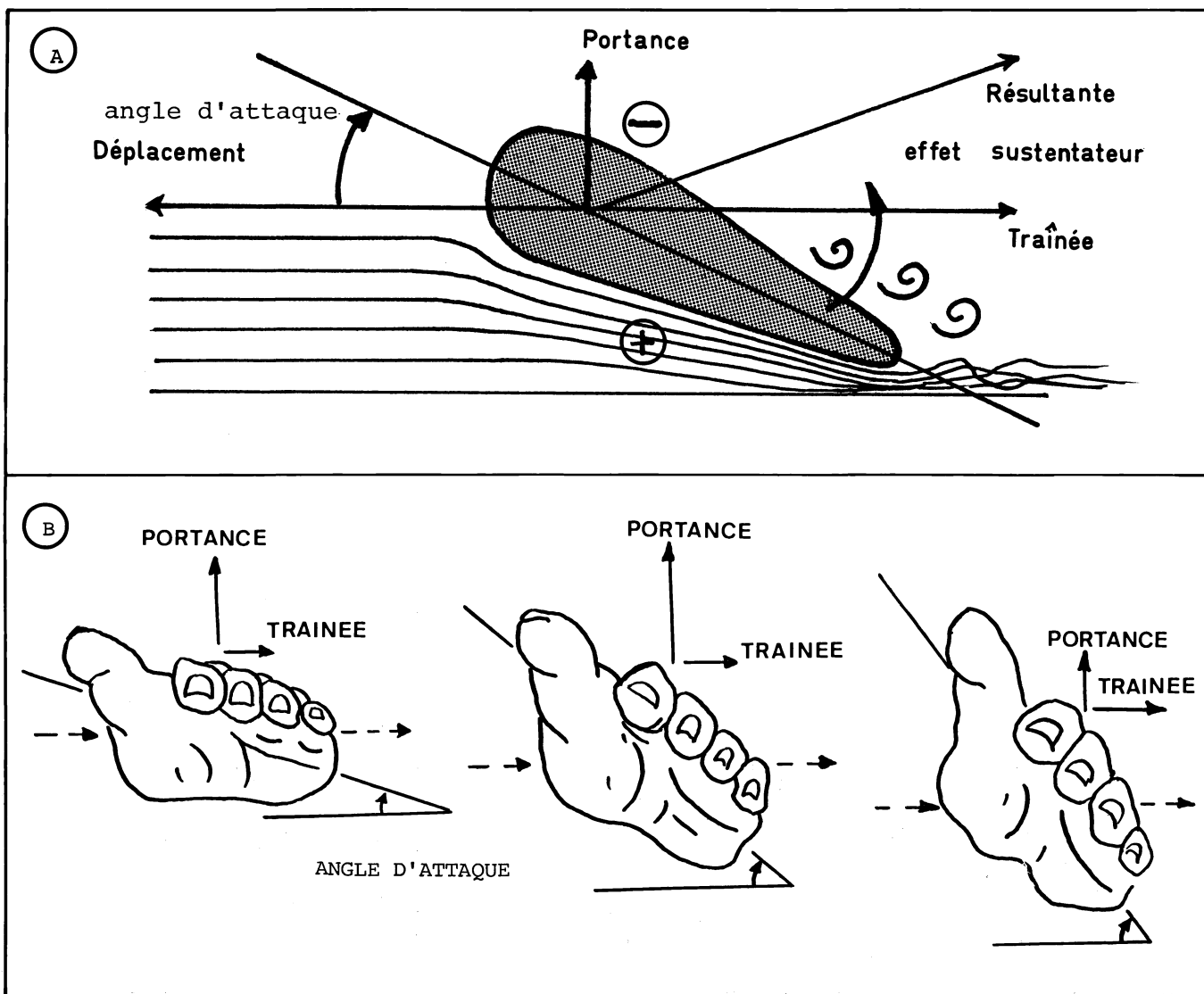
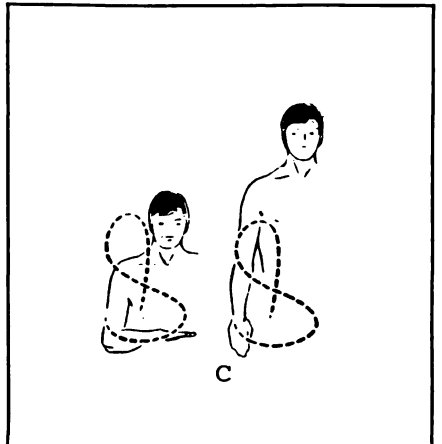
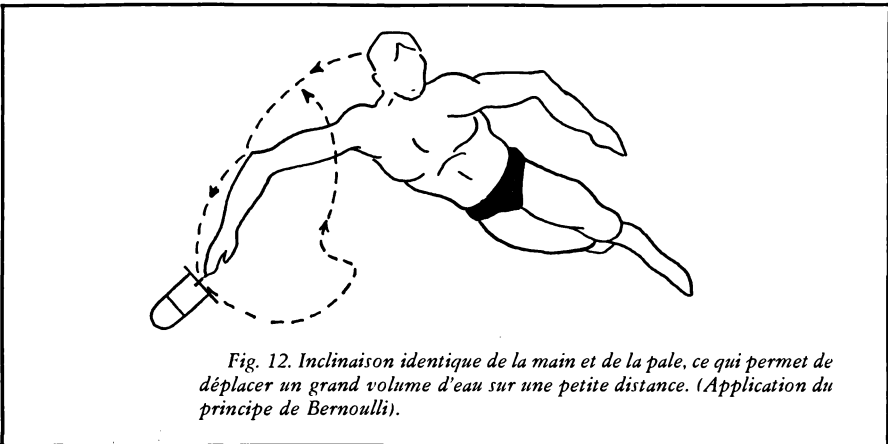
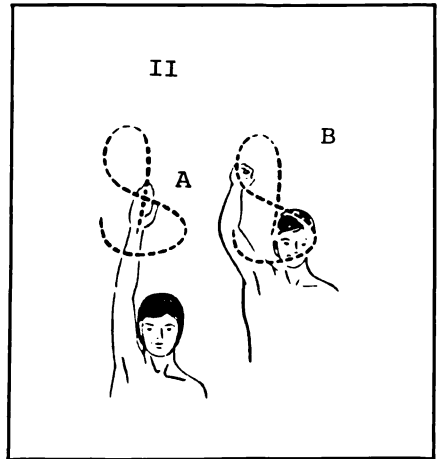
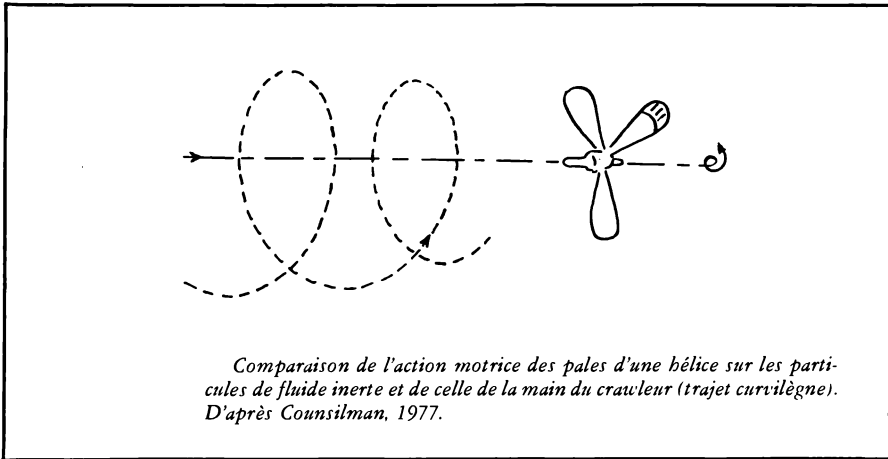
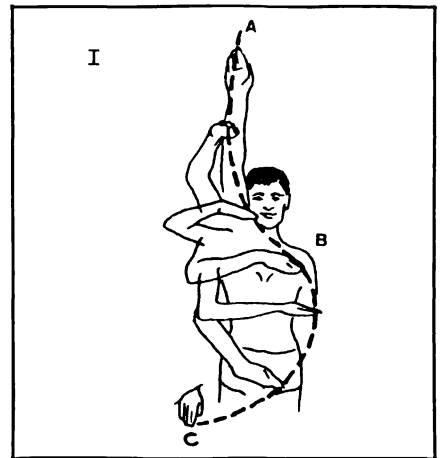
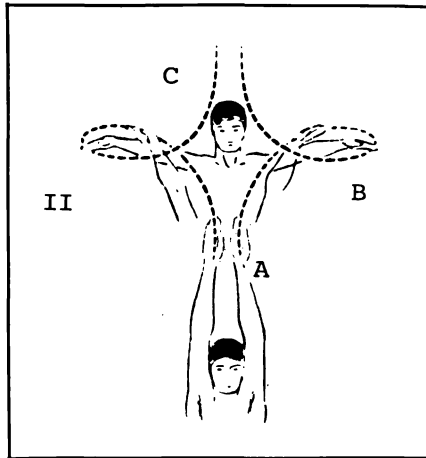
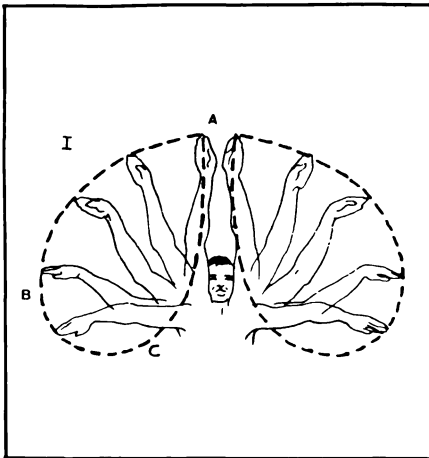
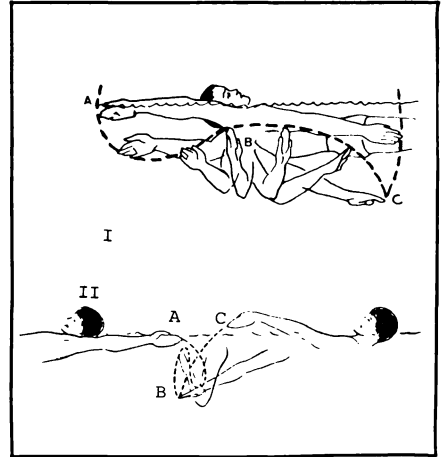
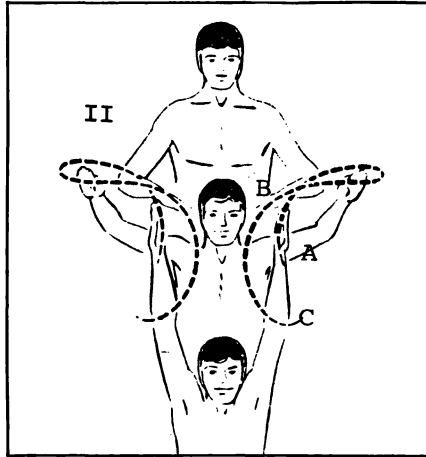
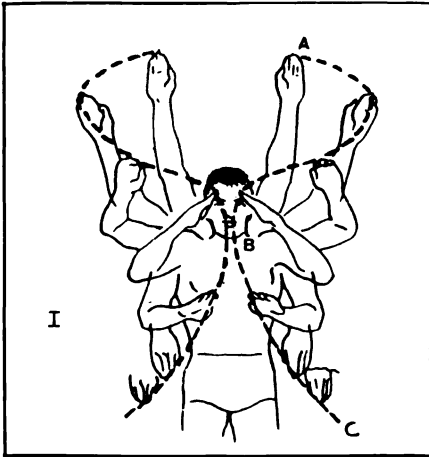


Fig. 10 et 11. Trajet subaquatique de la main dans les quatre différents styles de nage:
 I. la main se déplace par rapport au corps qui reste fixe. — II. la main se déplace par rapport au corps mobile.
 A: début de traction — B: début de poussée — C: sortie de l'eau (ou début de retour).



b. Trajet subaquatique des surfaces propulsives.

L'étude des trajets moteurs dans les différents styles de nage a fait l'objet de nombreux et importants travaux au cours des quinze dernières années. Leurs résultats permettent aujourd'hui de mieux comprendre ce que l'œil humain n'avait pu observer au-dessus, et *a fortiori*, sous l'eau, et ainsi d'amender, voire de réfuter certaines croyances longtemps perpétuées. Se référant à la troisième loi de Newton selon laquelle toute action produit une réaction égale mais de sens opposé, pour nager vite, on a toujours admis qu'il suffisait d'avoir des surfaces propulsives importantes de bien les orienter perpendiculairement au sens de la translation et d'exercer leur action sur un trajet rectiligne d'avant en arrière. Les films sous-marins, les traces lumineuses et les études biomécaniques qui en découlèrent (Clarys et coll. 1973), démontrèrent qu'il n'en était rien. Développant leurs analyses dans les trois dimensions de l'espace, les études les plus récentes (Torre 1972, Barthels 1974, Schleihaut 1977, Feld et coll. 1978) mettent bien en évidence le rôle respectif de l'interaction de la résistance et de la portance dans les différentes phases des trajets moteurs.

Dès 1971 Counsilman décrit les trajets « elliptiques » des mains dans les différents styles (*fig. 10*) subodorant l'application du principe de Bernoulli pour expliquer la forme du mouvement subaquatique. Selon ce principe, la pression exercée par un fluide s'écoulant dans la même direction qu'un corps en mouvement (ce qui est le cas de la main du nageur par rapport à la direction du flux autour de son corps) diminue proportionnellement à l'augmentation de la vitesse de ce corps. Appliqué au trajet moteur de la main, ce principe signifie que, dans le cas d'un mouvement rectiligne, à mesure que la main se déplace vers l'arrière, la résistance nécessaire à son appui diminue, d'où la perte d'efficacité. Pour trouver une certaine stabilité d'appui, la main doit sans cesse glisser latéralement de part et d'autre de l'axe de translation du nageur (d'où le trajet elliptique) à la recherche de nouvelles couches de molécules inertes. Outre le mouvement elliptique expliqué par la recherche de la plus grande résistance d'appui possible, pendant le trajet, la main présente aussi un mouvement de pro-supination. Ce changement d'angulation latérale dépend quant à lui de la recherche d'un effet de portance. Cet effet permet non seulement de maintenir le corps du nageur à la surface de l'eau mais ajoute aussi à l'efficacité résultant de l'appui trouvé par la main. Résistance et portance président donc à l'explication du trajet de la main en « S » du crawl et du dossiste, en « trou de serrure » du papillon et en « cœur » du brasseur (*fig. 10*).

Pourtant, si cette analyse a permis une meilleure compréhension du mouvement propulsif, le fait qu'elle n'ait pris en considération que le déplacement de la main par rapport au nageur immobile ne lui a pas permis de résister à la critique. Par contre, un net progrès a été réalisé avec l'étude de Torre (1972) qui, à partir de sa théorie « des cycloïdes entrelacés », a tenu compte du déplacement du corps pour décrire les trajets de la main et des pieds, approximativement comme des boucles torsadées (*fig. 11*).

Grâce aux deux études précédentes il est actuelle-

ment possible de mieux analyser le mouvement effectif de la main. On peut globalement imaginer que la main, par ses glissements latéraux et sa pro-supination, recherche l'appui le plus fixe possible pour, dans un premier temps, tracter le corps entier et, par l'intermédiaire de la contraction des muscles du bras et de l'épaule, le faire « basculer » en avant. Cette « bascule » s'effectue avec coude fléchi ce qui ajoute à l'efficacité de la traction initiale et au « repousser » final : le coude se déplie. D'une conception où la main décrivait son trajet à partir d'un point fixe : l'épaule, les progrès techniques d'analyse de l'image ont permis de situer ce point fixe au niveau de la prise d'appui de la main. Cette prise d'appui pourrait s'apparenter à une poignée, ou à une « barre fixe » sous-marine, que saisirait le nageur pour se tracter et se propulser en avant. Cette représentation est confirmée par le repérage du point où la main d'un nageur entre dans l'eau et de celui où elle en sort après chaque cycle de bras. Si le niveau technique du sujet est bon, ces deux points sont généralement très proches.

Puisque le trajet de la main n'est ni parallèle ni perpendiculaire à la direction d'ensemble du corps, c'est qu'à la fois la portance et la traînée interviennent dans la propulsion (*fig. 9 B*).

En fonction de l'effet sustentateur recherché, le nageur donne à sa main et à son avant-bras, un angle d'attaque particulier et variable qui entraîne l'augmentation de la pression au-dessous de l'avant-bras et de la paume et sa diminution dans la zone située au-dessus. Cette différence « aspire » la main de la haute vers la basse pression et la portance résultante joue dans le sens de la translation du nageur. Simultanément pour trouver les couches d'eau à molécules inertes, à partir d'un placement proche de la perpendiculaire à l'axe de la translation, la main « glisse » latéralement. De la recherche de l'interaction de ces deux forces, résulte un mouvement en godille très proche de celui de l'hélice (*fig. 12*). Ce mouvement hélicoïdal se déroule aussi à l'intérieur d'un espace à trois dimensions dans lequel, contrairement à ce que l'on pensait, la main ne progresse que très peu mais évolue dans les trois dimensions : frontale, latérale et sagittale. Toutefois, à la différence du mouvement de l'hélice, la portance prédominerait au moment de l'entrée de la main dans l'eau (ce qui permettrait au nageur de continuer d'avancer), et la traînée pendant l'appui des surfaces propulsives et l'extension finale du coude. Les mêmes principes hydromécaniques président à l'action des pieds dont le trajet ne se situe pas sur le même plan vertical en ce qui concerne le battement du crawl, du dos ou du papillon, ou d'avant en arrière en ce qui concerne le « fouetter » de la brasse. Les boucles entrelacées qu'ils décrivent se situent aussi dans les trois plans de l'espace. A leur égard, rappelons qu'autour et à l'arrière du nageur les molécules d'eau sont particulièrement perturbées (turbulences, remous, tourbillons) d'où la nécessité de rechercher l'effet propulsif en dehors de ces zones comme le suggère l'étude de Jurina (1977). Cela explique la plus grande efficacité des mouvements des membres inférieurs des brasseurs et des nageurs dont l'amplitude articulaire de la coxo-fémorale, des genoux, et surtout des chevilles leur permettent de trouver des appuis au-delà du sillon perturbé de l'arrière du corps.

c. Puissance des actions propulsives.

Par définition, la puissance s'exprime par la formule $P = F.V$ (4) où P = puissance (en watts); F = force, ici force de propulsion (en $kg.m.S^{-2}$ ou en newton) et v = vitesse ($m.s^{-1}$).

Or, nous savons qu'en natation la propulsion est la résultante de deux forces horizontales et de sens opposé dont la valeur positive entraîne l'accélération, la valeur nulle : l'équilibre ou maintien de la vitesse de translation acquise, et la valeur négative : la décélération. La propulsion peut donc s'écrire :

$$\text{Prop} = F - R \quad (5)$$

Comme d'après la deuxième loi de Newton (précédemment développée [1]), ($F - R = (m + K).dV/dt$ [1]) trop de paramètres entrent en jeu et varient continuellement au cours d'un seul cycle propulsif, il serait hasardeux de se référer aux valeurs publiées par les chercheurs qui se sont limités à des conditions expérimentales où les vitesses moyennes de nages étaient supposées constantes, donc l'accélération nulle, et les forces de résistance égales aux forces propulsives (Karpovich 1935, Alley 1952, Counsilman 1955). Cependant, ces valeurs sont révélatrices des différences des forces propulsives enregistrées entre les quatre styles de nage (Magel, 1970; *tableau 3*).

STYLE	FORCE (kgF)		
	20 s	60 s	180 s
Brasse	20.9	16.0	10.8
Crawl	13.4	10.3	8.0
Dos	14.1	10.8	8.6
Papillon	13.1	9.9	8.0

Tableau 3. Forces moyennes les plus élevées enregistrées au cours de trois périodes de nage chez des nageurs entraînés (Magel 1970).

L'antinomie apparente que constitue, en brasse, une force propulsive élevée et la vitesse de compétition la plus faible des quatre styles de nage, est à mettre au crédit de la résistance que rencontrent à la fois les membres supérieurs et inférieurs pendant leur mouvement subaquatique de retour entre deux actions motrices. Cette résistance annihile, en effet, tout l'avantage d'une force supérieure conférée par l'addition de l'action des jambes et des bras. De la même façon, il est permis d'expliquer les performances plus faibles en nage sur le dos que le laissent supposer les forces enregistrées. Dans ce cas, les départs et les virages plus lents, ainsi que la résistance plus importante chez les nageurs tractés en position dorsale, sont autant de facteurs qui y contribuent. Il a été enregistré, d'autre part, que les plus faibles fluctuations de forces entre les cycles propulsifs se situent en nage sur le dos et les plus importantes en brasse et en papillon, ce qui s'explique aisément par le mouvement alternatif et continu des bras dans le premier cas et simultané avec un temps moins actif dans le second cas.

Selon Magel et Mc Ardle (1970) les pourcentages de la force maximale mesurée hors de l'eau que pourraient

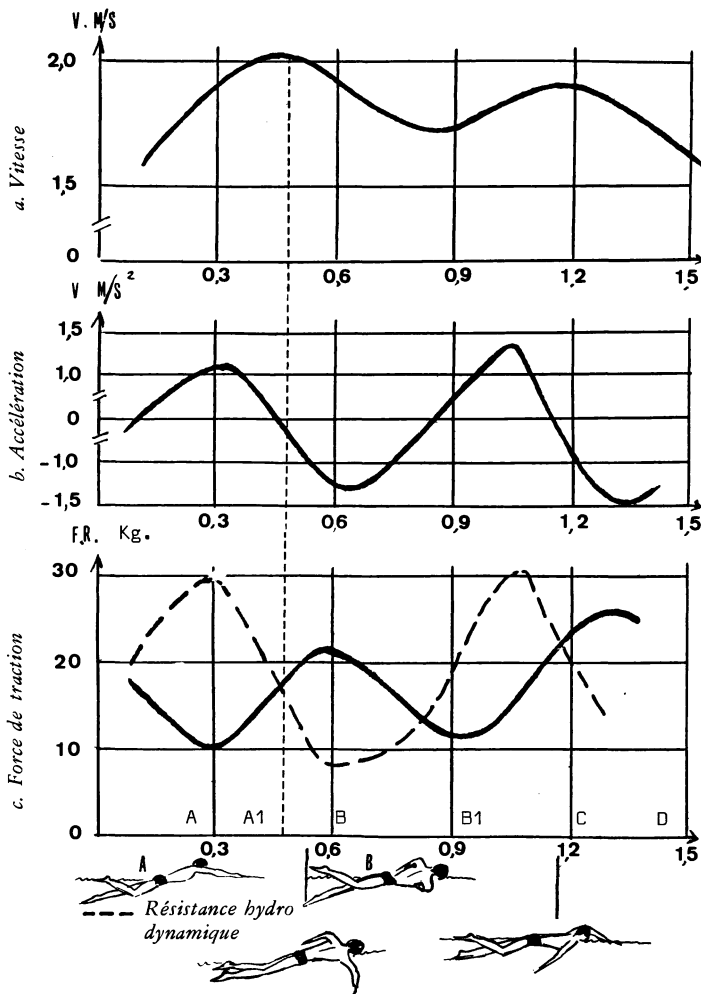
développer les sujets au cours de la nage atteindraient 13 % chez les sprinters mais ne s'élèveraient qu'à 2,5 % chez les nageurs de 1 500 m. La force et, en conséquence, la puissance apparaissent comme les facteurs les plus importants dans le développement de la vitesse sur les plus courtes distances. Il est, cependant, très important de considérer que les forces moyennes ou maximales obtenues avec des sujets reliés à des capteurs par un câble et nageant sur place, ne constituent qu'un reflet inexact de ce qui se passe au cours de la nage réelle. Par exemple, à tout moment au cours de la nage libre, les forces de traînée et de propulsion varient en fonction de la respiration, des phases motrices, de la quantité d'eau à tracter en plus, des mouvements du corps, etc., c'est pourquoi les mesures d'Issourin (1977) relevées au cours de la nage réelle nous permettent actuellement une meilleure compréhension des différentes interactions intervenant dans un cycle moteur (*fig. 13*). En particulier, il est très intéressant de noter que :

- la plus grande vitesse de translation est atteinte lorsque forces de traction et de résistance sont égales, c'est-à-dire quand l'accélération du mouvement est nulle (position A 1);
- la perte de vitesse de translation à l'intérieur du même cycle peut s'élever à environ 0,2, 0,3 m/s et la vitesse la plus basse se situe au moment où le bras pousse vers l'arrière du corps (position B 1), ce qui correspond à la résistance hydrodynamique la plus élevée;
- les maxima de force de traction atteints (supérieurs à 30 kg) sont nettement plus élevés que ceux publiés jusqu'alors (positions A, B 1, C).

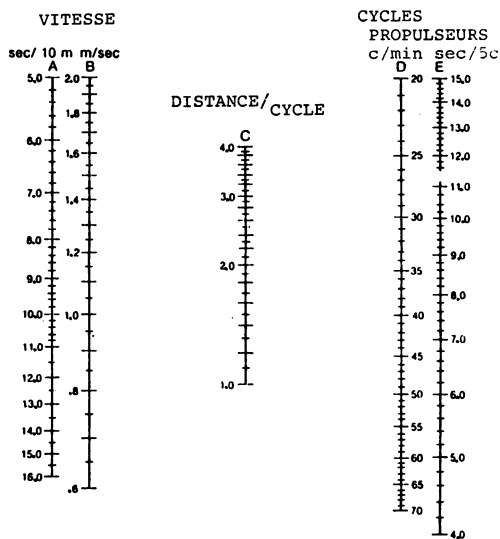
Enfin, dans ses autres développements, cette même étude fait apparaître que la résistance (R) au cours de la nage est approximativement deux fois plus élevée que celle enregistrée lorsque le nageur est tracté en position passive (Du Bois Reymond 1905, Karpovich 1933, Alley 1952, Counsilman 1955, Thrall 1960, Kent et Atha 1971, Charbonnier 1974, Cázorla 1978, Chatard et coll. 1984) et varie avec le cube de la vitesse (V) de nage suivant l'équation : $R = K.V^3$. K : coefficient hydrodynamique. Voir équation (3).

La conséquence pratique de cette étude est qu'un certain nombre de points concernant la technique sont à bien préciser ou même à reconsidérer. La meilleure efficacité semble découler d'une indispensable continuité des actions propulsives. En évitant le plus possible les décélération du mouvement à l'intérieur d'un cycle et en augmentant l'action positive du battement des membres inférieurs au moment où la résistance hydrodynamique est la plus élevée, c'est-à-dire lorsque la main se trouve entre la perpendiculaire et l'arrière du corps, le nageur peut obtenir une meilleure efficacité. La poussée arrière du bras revêt beaucoup moins d'importance que celle qui lui est généralement accordée. A la limite, la dernière partie de ce parcours devrait être très accélérée car elle n'est nullement productive de force de propulsion. Enfin, la puissance musculaire développée à l'intérieur de chaque cycle est beaucoup plus importante que celle généralement imaginée, ce qui laisse entrevoir l'intérêt de la musculation dans la préparation des nageurs de haut niveau.

Le développement de la puissance utile à la propulsion sans nuire à la qualité du mouvement ni à l'hydrodynamique général, requiert toute la perspicacité



▲ Fig. 13. Variation de la vitesse, de la force de traction, de l'accélération et de la résistance hydrodynamique en crawl.



▲ Fig. 14. Nomogramme pour calculer la distance parcourue par cycle (en m), la vitesse moyenne (en m/s) et le nombre moyen de cycles par minute (c/min) au cours d'une compétition.

Placer l'extrémité d'une règle au point de la colonne A correspondant au temps enregistré pour nager 10 m. Place l'autre extrémité sur la colonne E au point correspondant au temps enregistré pour réaliser 5 cycles propulseurs complets. Pour compter 5 cycles, partir de 0 et non pas de 1. Le point où votre règle coupe la colonne centrale C indique la distance parcourue par cycle. La vitesse peut être calculée en place votre règle horizontalement à partir du point de la colonne A indiquant le temps mis pour parcourir 10 m, lire alors le point d'intersection avec la colonne B. Pour obtenir le nombre moyen de cycles par minute, procéder de la même manière entre la colonne E et D.

de l'entraîneur et dépend tout particulièrement de la distance de nage choisie. En se référant aux études électromyographiques d'Ikai et coll. (1964), de Yoshizawa et coll. (1978) et celle plus récente de Clarys et Olbrecht (1982), il est permis d'émettre quelques réserves sur l'utilisation mal contrôlée de certains appareils de musculation dite « à sec ». Lorsqu'elles sollicitent les muscles concernés par un style de nage particulier (ce qui n'est pas toujours le cas) les résistances opposées par ces appareils ne correspondent pas à celles rencontrées dans l'eau (Clarys et Olbrecht 1982). Cela suggère que la musculation devrait être organisée d'une manière mixte à sec et dans l'eau; leur pourcentage respectif ainsi que les charges utilisées devraient essentiellement être subordonnées à la période du programme d'entraînement et aux distances à parcourir, sachant que la puissance du sprinter peut atteindre des valeurs relativement élevées.

Cependant, même si la puissance est bien développée, ce qui compte le plus est la coordination des actions motrices qui permet de l'exprimer pleinement.

d. Cadence optimale des mouvements propulsifs.

Il a été indiqué que la puissance était le produit de la force et de la vitesse. De même a été mis en évidence le rôle important joué par la force dans chaque mouvement propulsif, qu'en est-il de la vitesse ?

Comme Craig et Pendergast (1978) l'ont montré, il y a une étroite relation entre le nombre de cycles propulsifs, la distance parcourue par cycle et la vitesse de nage en compétition. En fonction de l'envergure, de l'importance des surfaces propulsives, des qualités musculaires, des qualités techniques du sujet et du style de nage choisi, chaque nageur, à un moment donné, peut atteindre sa vitesse maximale en réalisant un nombre optimal de cycles propulsifs. Pour évaluer l'efficacité biomécanique du nageur et ainsi déterminer le nombre optimal de cycles Craig et coll. (1979) proposent d'enregistrer au cours d'une compétition : le temps nécessaire pour parcourir dix mètres (sans prendre en compte le départ et les virages) et le temps nécessaire pour réaliser cinq cycles complets. A partir de ces deux données ils proposent un nomogramme (fig. 14) permettant de calculer : la distance couverte par cycle, ainsi que le nombre moyen de cycles réalisés par minute. Ces informations sont toujours très intéressantes pour apprécier à un moment donné le niveau technique d'un nageur et tenter ensuite d'améliorer, conformément aux objectifs de l'entraînement, le rendement total de la nage au cours d'une saison sportive. A cet égard, dans d'autres études (Pendergast et coll. 1977, Montpetit et coll. 1982) ont montré que la consommation d'oxygène (VO_2) par kilomètre nagé à vitesse maximale pouvait considérablement varier entre les nageurs de compétition (de 35 à 60 l d' O_2 /km) et les nageurs non compétiteurs (de 40 à 100 l d' O_2 /km) alors que les VO_2 /km ne varient que de 5 % entre les coureurs non entraînés et entraînés (Margaria et coll., 1963). Cela met bien en évidence l'importance des qualités hydrodynamiques, techniques et énergétiques qui conditionnent le rendement de la nage.

Mesures de la force propulsive maximale et leurs premiers résultats.*

Pour respecter le plus possible la spécificité de la nage, la force propulsive a été évaluée directement au cours de la nage en demandant au nageur de tracter toujours à vitesse maximale différentes charges pendant plusieurs séquences de 5 à 7 secondes chacune, entrecoupées entre elles d'une période de 2 minutes de récupération (photo 10).

Les charges tractées au cours de la nage sont maintenues suspendues toujours au même niveau dans l'axe du nageur grâce à un chariot dont la vitesse de déplacement sur le bord du bassin est rigoureusement assujettie à celle du nageur. La vitesse est mesurée par un cinémographe constitué d'une cellule photo-électrique couplée à un tambour libre que le nageur déroule par l'intermédiaire d'un fil nylon qu'il tracte aussi au cours de la nage (Prud'homme et coll. 1980, Connan et coll., 1981). L'ensemble des couples de points obtenus : vitesse-charges, s'ajustent significativement à une fonction linéaire (fig. 15).

L'extrapolation de la droite ainsi déterminée au point de vitesse nulle, donne la charge maximale théorique susceptible d'être maintenue soulevée un très court instant, c'est-à-dire le pic maximal de sa force propulsive. L'ensemble de ces calculs est informatisé et réalisé directement sur le bord du bassin.

Résultats.

1. La moyenne des pics de force maximale est, significativement, plus élevée chez les nageurs de courtes distances que celle des nageurs de longues distances en crawl : (♂, n = 21 sprinters $\bar{M} = 231,5 \pm 37,3$ N; n = 16 nageurs longues distances, $\bar{M} = 168,7 \pm 28,4$ N).

2. Les plus grandes forces propulsives ($F_{maxi} = 286.5$ N) ont été enregistrées chez les spécialistes de brasse, de crawl (distances courtes) et de papillon; les plus faibles ($F_{mini} = 128.5$ N) chez les spécialistes de dos et de style libre longues distances.

3. Les nageurs et nageuses pratiquant la musculation « à sec » et dans l'eau présentent une moyenne de pics de force maximale significativement plus élevés que ceux et celles qui ne la pratiquent pas.

La force maximale propulsive semble donc être un précieux indicateur de la distance et du style de nage convenant le mieux au sujet. Elle constitue une qualité indispensable aux sprinters et peut être développée grâce au programme de musculation à sec et dans l'eau.

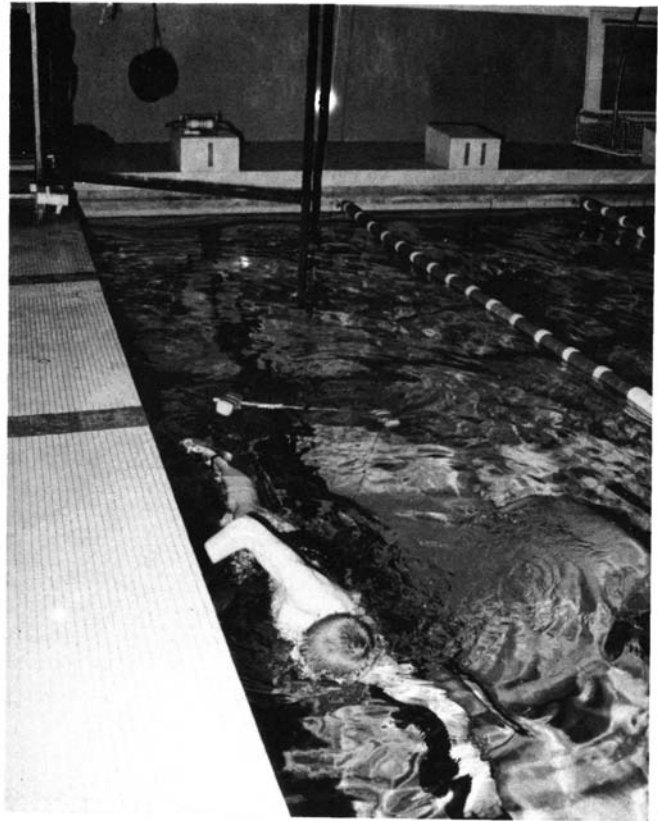


Photo 10. Evaluation de la force propulsive au cours de la nage. Le nageur tracte des charges différentes maintenues soulevées sur un chariot se déplaçant sur le bord du bassin à la même vitesse que le nageur. A partir de la relation charges tractées-vitesse de nage est extrapolée la force propulsive maximale théorique.

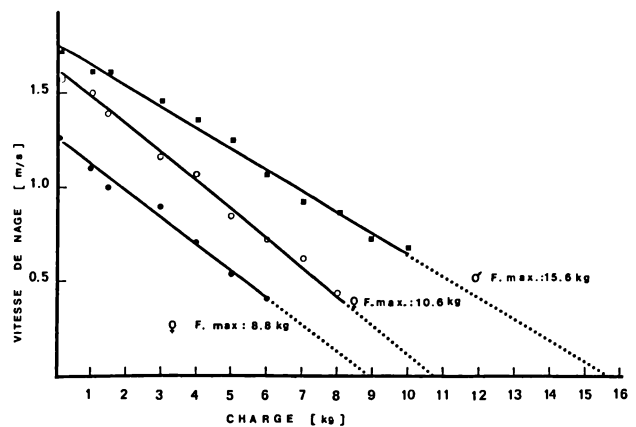


Fig. 15. Extrapolation de la charge maximale théorique que le nageur peut tracter à vitesse nulle. Elle correspond à sa force propulsive maximale.

SUJET	SEXE	NC *	FORCE MAX	CORRELATION
1	F	9,47	0,991	
2	F	8	8,82	0,994
3	F	8	8,20	0,990
4	F	8	11,55	0,998
5	M	9	10,85	0,957
6	M	13	15,57	0,968
7	M	10	13,66	0,988
8	M	12	17,16	0,993
9	M	10	15,64	0,992
10	M	9	16,46	0,988
11	M	8	16,24	0,980
12	M	4	18,19	1,000

* Nombre de charges.

MOYENNES: 9,51 kg
15,47 kg

Nombre de charges utilisées par sujet pour obtenir l'ajustement linéaire (charges — vitesses de déplacement).

1. Mesures issues de nos propres travaux.

III^e PARTIE

DÉPENSE ÉNERGÉTIQUE DU NAGEUR DE COMPÉTITION.

Le rendement de la nage, autour duquel s'articulent les aspects physiologique et biomécanique de la performance est représenté par le rapport existant entre le travail mécanique effectif et la dépense énergétique correspondante.

Les aspects les plus importants qui sous-tendent le travail mécanique dans l'eau viennent d'être étudiés, qu'en est-il de la dépense d'énergie et des caractéristiques qui les accompagnent ?

Selon Miyashita (1975) à une vitesse variant entre 1,68 et 1,86 m/s le nageur dépenserait entre 0,85 et 1,01 cal. par cycle propulseur ce qui correspond à environ cinq à dix fois la dépense énergétique d'un coureur à pied se déplaçant à une vitesse similaire (Schmidt-Nielsen 1972). Ce type de comparaison devrait cependant être nuancé. Si, effectivement, les conditions du milieu aquatique (poussée d'Archimède, température de l'eau, utilisation de masses musculaires moins importantes pour se déplacer) imposent les mêmes contraintes à tous les nageurs, il existe entre ceux-ci de telles différences qu'il serait hasardeux de vouloir généraliser à partir de quelques résultats individuels. En effet, le niveau technique et d'entraînement, la morphologie, la flottabilité, le mode de nage et la distance de compétition sont autant de facteurs à considérer si l'on veut établir de bonnes comparaisons. Il ne semble donc pas judicieux de se référer aux schémas classiques empruntés aux disciplines « terrestres » pour expliciter les réactions physiologiques du nageur. Discipline sportive à part, la natation doit être appréhendée dans toute sa spécificité. C'est l'approche physiologique que nous nous proposons, en ne retenant toutefois que la dépense énergétique spécifique et les réponses hémodynamiques et ventilatoires qui accompagnent l'exercice aquatique.

Métabolismes mis en jeu au cours des compétitions.

A partir de données expérimentales relevées dans la littérature, Vinaricky (1976) propose un bilan énergétique des différents types de nage établi en fonction de la distance parcourue en compétition et du niveau du nageur. Ce bilan est calculé à partir de l'équation de régression $y = a.x^n.MB/1,3$ dans laquelle :

- y = la dépense d'énergie par minute (Kcal. min^{-1})
- x = la vitesse de nage (m.s^{-1})
- n = une constante qui donne la pente dans la courbe (variable selon les styles de nage)
- a = une constante qui positionne la courbe (variable en fonction des performances réalisées dans chaque style)
- MB = le métabolisme de base (Kcal)
- 1,3 = la valeur du MB pour un individu mesurant 1,75 m et pesant 75 kg.

Selon le niveau atteint par le nageur, et selon le style de nage la formule peut s'écrire :

1. crawl : $y = 9,5^5$ (ou 7^6). $x^3 \frac{MB}{1,3}$
2. dos : $y = 9,8$ (ou $7,9$). $x^4 \frac{MB}{1,3}$
3. papillon : $y = 16$ (ou $12,4$). $x^{2,4} \frac{MB}{1,3}$
4. brasse : $y = 22,6$ (ou $17,9$). $x^{2,1} \frac{MB}{1,3}$

Toujours selon cette étude, quel que soit le niveau de performance, la dépense énergétique sur les différents parcours et dans les différents styles de nage se situerait aux environs des valeurs résumées dans le **Tableau 4** :

	<i>crawl</i>	<i>dos</i>	<i>papillon</i>	<i>brasse</i>
<i>100 m</i>	44	55	48	47
<i>200 m</i>	77	89	83	84
<i>400 m</i>	140			
<i>1500 m</i>	330			

Tableau 4. Dépense énergétique totale (Kcal) du nageur en fonction des différents styles et des différentes distances. (Les valeurs des nageuses sont environ 13 % inférieures) d'après Vinaricky, 1976.

Bien que très intéressantes, pour être utilisées, ces données théoriques doivent faire l'objet de leur vérification expérimentale, travail actuellement en cours (Montpetit et coll. 1982).

En attendant leur éventuelle confirmation il est cependant possible de continuer à se référer à l'ensemble des données partielles ou théoriques ayant fait l'objet de nombreuses publications.

Synthèse de données de la littérature (Vinaricky 1976, Arcelli 1977, Houston 1978) la **figure 16** met particulièrement en évidence l'importance du métabolisme anaérobie lactique sollicité électivement lors des compétitions de 100 et 200 m.

On note aussi l'importante contribution de ce même métabolisme au cours du 400 m. Ces supputations théoriques sont corroborées par les concentrations plasmatiques de lactate relevées par Sawka et coll. (1979), Chatard et Geyssant (1984), Duvallat et coll. (données non publiées) à l'issue de compétitions officielles.

Ces données à la fois théoriques et expérimentales permettent de supposer que le glycogène et, à un niveau moindre, les réserves en phosphagène, sont les substrats essentiellement utilisés au cours des compétitions. Par contre, les acides gras libres, substrats privilégiés des exercices de longue durée et d'intensité sub-critique (au-dessous de la puissance maximale aérobie), sont largement utilisés au cours de certaines phases de l'entraînement.

Comme l'utilisation des différents substrats dépend aussi de la qualité des fibres musculaires mises en jeu et qu'elle-même dépend de l'intensité et de la durée de l'exercice, on devine alors que le profil cellulaire des muscles sollicités au cours de la nage devrait être fonction de la distance de la compétition sur laquelle le nageur de haut niveau excelle. C'est ce que tend à démontrer la

classification opérée par Costill (1980) (fig. 17).

En somme, jusqu'ici, rien ne révèle vraiment la spécificité de la natation. Il n'en est pas de même lorsqu'on étudie les particularités de la consommation d'oxygène et les réponses hémodynamiques et ventilatoires à l'exercice aquatique.

a. $\dot{V}O_2$ du nageur.

Quel que soit le style de nage le $\dot{V}O_2$ augmente linéairement ou d'une manière légèrement exponentielle avec la vitesse (Mc Ardle et coll. 1971, Lepère et Porters 1972, Holmer 1972, Holmer et coll. 1974, Bonen et coll. 1980, Montpetit et coll. 1982, Cazorla 1982), cependant plusieurs particularités sont à considérer. Les $\dot{V}O_2$ max. obtenus au cours de la nage ($\dot{V}O_2$ max. — nage) sont en moyenne moins élevés que ceux obtenus à partir de la course (tableau 5). Les $\dot{V}O_2$ max. « nage » présentent des différences entre eux selon les protocoles expérimentaux utilisés pour les obtenir (Bonen et coll. 1980, et lire notamment Cazorla et coll. 1982; Cazorla et Montpetit 1983). Trois types de protocoles sont les plus classiquement utilisés :

- le sujet nage sur place contre les charges additionnelles qu'il maintient soulevées à la même hauteur (fig. 18);
- le sujet nage sur place contre un flux progressivement accéléré (fig. 19);
- le sujet nage librement avec le déplacement habituel (fig. 20).

Alors que dans les deux derniers cas les $\dot{V}O_2$ max. obtenus chez les mêmes sujets ne varient pas, ils accusent des valeurs de 4 à 6 % plus basses lorsque la première technique est utilisée (Bonen et coll. 1980).

Les $\dot{V}O_2$ max. atteignent aussi des valeurs plus élevées lorsque le style de nage sur lequel le sujet est spécialisé correspond à celui du protocole expérimental (Cazorla, résultats non publiés). Enfin, les valeurs des $\dot{V}O_2$ max. des nageuses sont en moyenne plus faibles que celles des nageurs.

Par ailleurs, pour une vitesse donnée, à niveau d'entraînement égal, c'est le crawl, qui présente les $\dot{V}O_2$ — net les moins élevés (fig. 21), $\dot{V}O_2$ — net dont les valeurs sont encore plus basses : chez la femme, chez les sujets présentant les poids en immersion les plus faibles, et chez ceux dont la technique est la plus affinée (Cazorla et Chatard 1983).

L'ensemble de ces variations (nage-course, et nage-nage) souligne non seulement la haute spécificité de la natation par rapport aux autres disciplines mais aussi la nécessité de bien standardiser les différents protocoles expérimentaux pour pouvoir comparer les résultats.

A nouveau il apparaît fondamental de tenir compte de la flottabilité, de la technique et du niveau d'entraînement des nageurs évalués. L'interdépendance de ces facteurs pour obtenir une meilleure performance est mise en évidence par les fortes corrélations existant entre : la consommation d'oxygène mesurée à une vitesse donnée et le niveau de performance lorsque le $\dot{V}O_2$ — net est exprimé en litre par minute et par kilogramme du poids immergé, ou mieux, lorsque cette unité est exprimée en pourcentage du $\dot{V}O_2$ max. ramené aussi en kilogramme de poids du sujet immergé (Cazorla et Chatard 1983)

(tableau 8). De même, Pendergast et coll. (1978) proposent le rapport $\dot{V}O_2/d$ qui représente la consommation d'oxygène pour nager théoriquement 1 km à la vitesse atteinte au $\dot{V}O_2$ max. Plus ce rapport est faible, meilleur est le niveau technique ou... meilleures sont les qualités hydrodynamiques (tableau 6).

NIVEAU	CONSOMMATION D'O ₂ par kilomètre de nage (1.km ⁻¹)	
	NAGEURS	NAGEUSES
Excellent	15-30	30-40
Assez bon	30-35	40-50
Moyen	35-40	50-60
Passable	40-50	60-80
Faible	50-60	80-100

Tableau 6. Valeurs proposées par Pendergast et coll. (1978) pour évaluer le niveau technique (ou hydrodynamique). Ce tableau n'est valable que pour les crawlleurs.

$\dot{V}O_2$ — Nage et lactate.

Pour un $\dot{V}O_2$ sub-maximal donné, le lactate plasmatique tend à diminuer lorsque le niveau d'entraînement du nageur s'améliore. Les nageurs spécialistes du 800 et du 1 500 m peuvent travailler à des pourcentages de $\dot{V}O_2$ max. très élevés (près de 90 % chez certains nageurs) sans augmentation de leur concentration de lactate plasmatique (Chatard et coll., données non publiées). Cela peut être expliqué par le plus grand développement du pouvoir oxydatif des muscles sollicités et par la masse relativement faible qu'ils représentent. Cette particularité permettrait de comprendre aussi le pourcentage élevé de la vitesse maximale pouvant être maintenu par les recordmen du monde des longues distances (800-1 500 m).

Après une compétition ou un exercice maximal compris entre 40 s et 2 min., les plus fortes concentrations de lactate enregistrées peuvent être éliminées entre 15 et 20 minutes si, pendant la récupération, le sujet continue de nager à des intensités comprises entre 68 et 73 % de $\dot{V}O_2$ max. (Cazorla et coll. 1982) ce qui est nettement plus élevé que les intensités de récupération active qui obtiennent les mêmes effets en course et en cyclisme.

L'explication de ces importantes variations doit résider non seulement au niveau des particularités liées à la biomécanique de la nage mais aussi au niveau de l'influence du milieu aquatique sur la chaîne des transporteurs d'oxygène.

$\dot{V}O_2$ — Nage et ventilation.

La capacité vitale est réduite approximativement de 6 à 8 % par la simple immersion en position horizontale, tête exceptée (Karpovitch 1939, Agostino et coll. 1966, Hong et coll. 1969). La majeure partie de cette réduction pourrait être imputée à une augmentation de la pression hydrostatique et probablement à des modifications ventilatoires. La résistance plus importante des voies respiratoires au cours de l'immersion au repos et pendant la nage doit entraîner un effort respiratoire accru

Auteurs	Nombre	Âges (années)	VO ₂ max. course (l/min.)	VO ₂ max. nage libre (l/min.)	VO ₂ max. nage cont. flux (l/min.)	VO ₂ max. nage contre charges (l/min.)	% des VO ₂ max. course
Magel et Faulkner (1967)	17	19.8 ± 1.0	4.20 ± .39			4.14 ± .42	98.6
Mc Ardle et coll. (1971)	5	19.4 ± 1.5	3.83* ± .40	3.36* ± .51			87.7
Magel (1966)	15	21.0 ± 2.2	4.11 ± .53			3.82 ± .43	92.9
Lepère et Porters (1972)	14		4.29 ± .14	3.96 ± .11			92.3
Dixon et Faulkner (1971)	6	19.2 ± 1.2	4.26 ± .34			4.05 ± .20	95
Holmer (1972)	9		4.19		3.73		89
Holmer et coll. (1974)	12	18.7	5.38 ± .46		5.05 ± .53		93.9
Houston et coll. (1981)	10	19.8 ± 0.4	3.7*** ± 0.5 4.1*** ± 0.5			3.4 ± 0.4 3.4 ± 0.3	91.9 82.9
Cazorla et Montpetit (1982)	11**	15.6 (± 1.9)	3.91 ± .55	3.81 ± .59			97.4
(1983)	8***	16.9 ± 0.7	5.21 ± 0.32	4.78 ± 0.30			91.7

* La marche sur tapis roulant à pentes croissantes et le nombre de cycles de bras par minute ont été utilisées dans cette étude pour déterminer respectivement le « VO₂ max. tapis roulant » et le « VO₂ max.-eau ».

** Nageurs entraînés.

*** Nageurs non entraînés.

Tableau 5. Recensement des différences obtenues entre les consommations maximales d'oxygène mesurées sur tapis roulant et au cours de la nage, chez des nageurs qualifiés entraînés (Cazorla et Montpetit 1982).

Âges (an)	Jeunes gens		Jeunes filles	
	n	r	n	r
10—11	12	.96***	14	.90***
12	13	.78***	21	.64***
13	40	.45***	38	.52***
14	34	.32*	18	NS
15	28	NS	24	.68***
16	15	.69***	6	—
17 (et + ♀)	7	—	13	NS
18 (et + ♂)	24	.46**		

*** significatif à 0.001.

** significatif à 0.02.

* significatif à 0.05.

Tableau 7. Récapitulatif des corrélations calculées entre le VO₂ max. et le niveau de performance apprécié en pourcentage du record du monde de la spécialité considérée (Cazorla et Chatard, 1983).

N = 24 ♂	VO ₂ max. (L·min. ⁻¹)	VO ₂ à 1.1 m/s (L·min. ⁻¹)	VO ₂ à 1.1 m/s Poids H ₂ O	% VO ₂ max. Utilisé à 1.1 m/s
Performance (% record du monde au 31.12.1982)	.53	-.71	-.82	-.85

Tableau 8. Corrélations significatives (0.01) entre le niveau de performance et la consommation d'oxygène (Cazorla et Chatard, 1983).

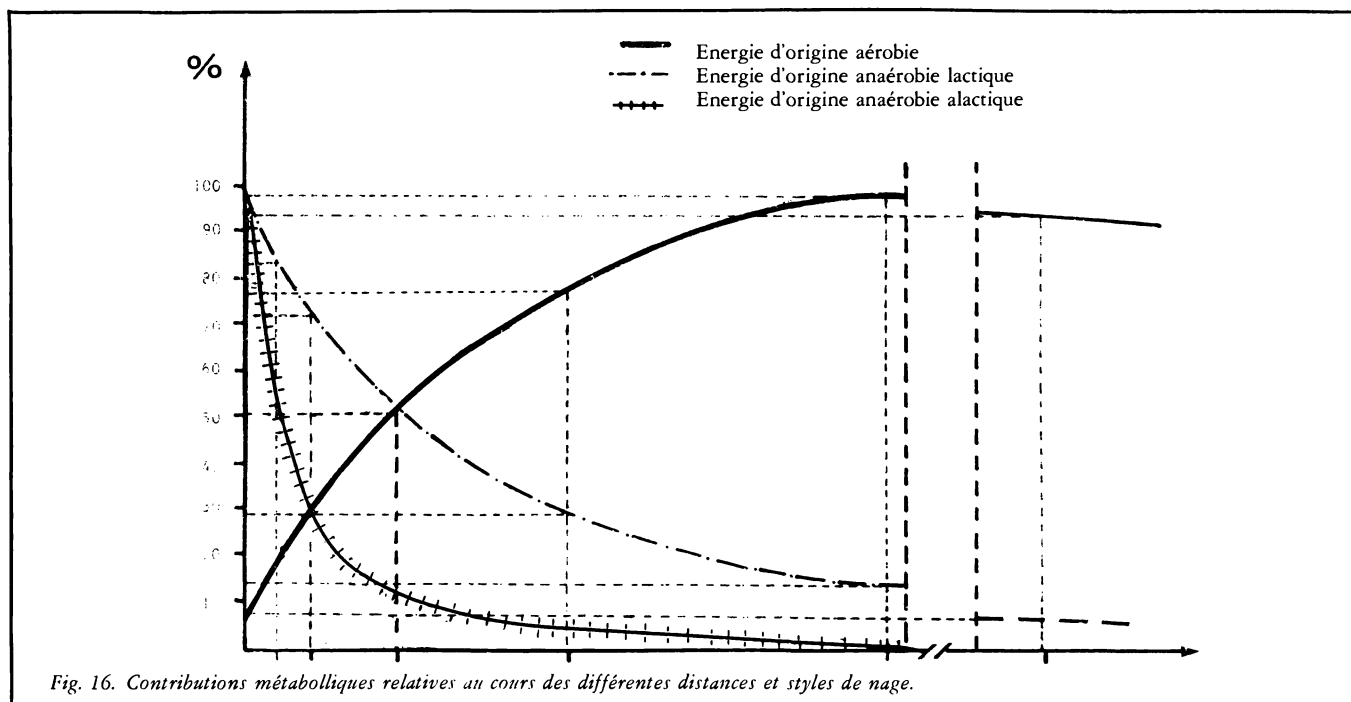


Fig. 16. Contributions métaboliques relatives au cours des différentes distances et styles de nage.

TEMPS	23 s 26 s	50 s 1 min 10 s	1 min 48 s 2 min 15 s	3 min 48 s 4 min 2 s	7 min 55 s 8 min 30 s	14 min 50 s 16 min
DISTANCE (m)	50	100	200	400	800	1500
% ANAÉROBIE ALACTIQUE	60 70	20 30	10 15	5 10	5	5
% ANAÉROBIE LACTIQUE	35 20	40 50	40 45	20 30	5 10	5
% AÉROBIE	5 10	40 20	50 40	75 60	90 85	95 90

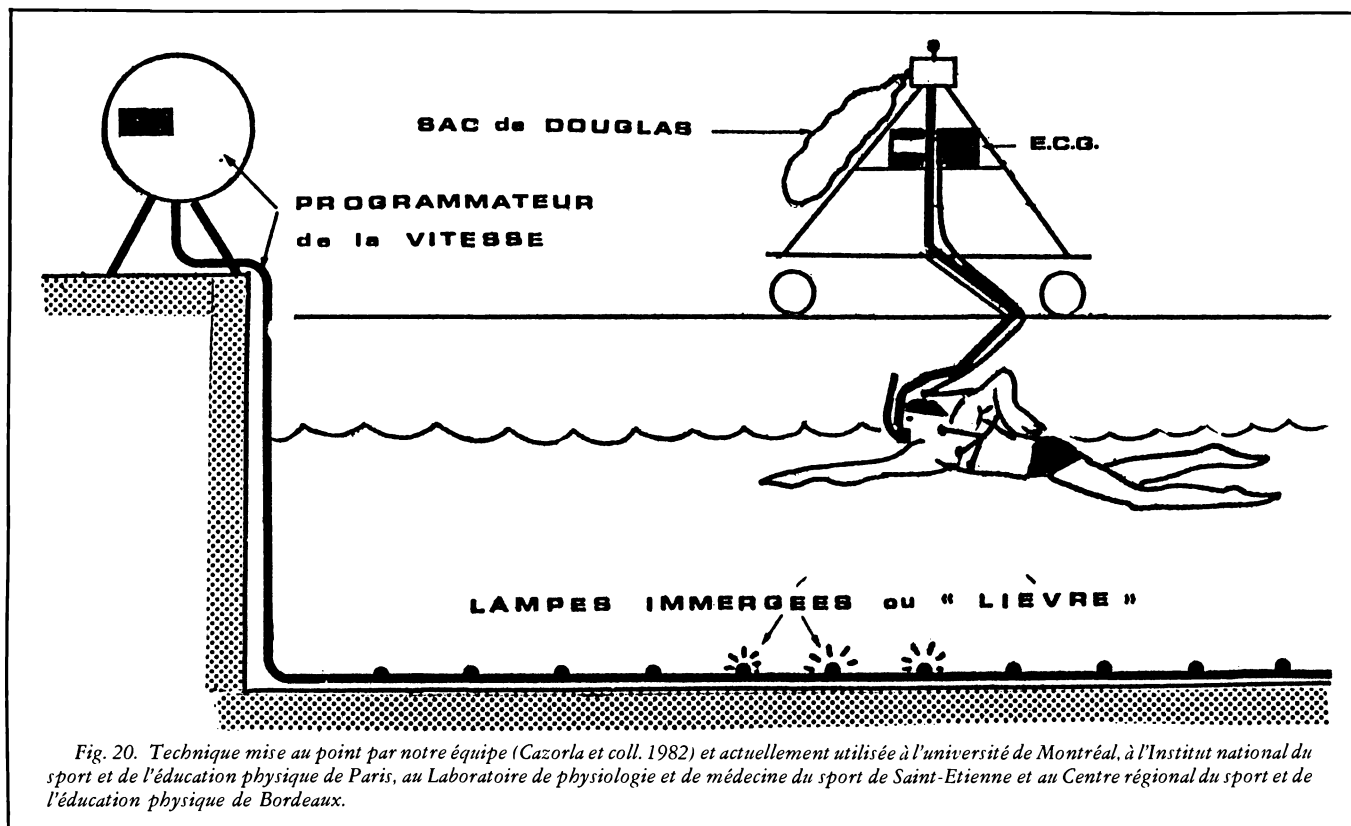
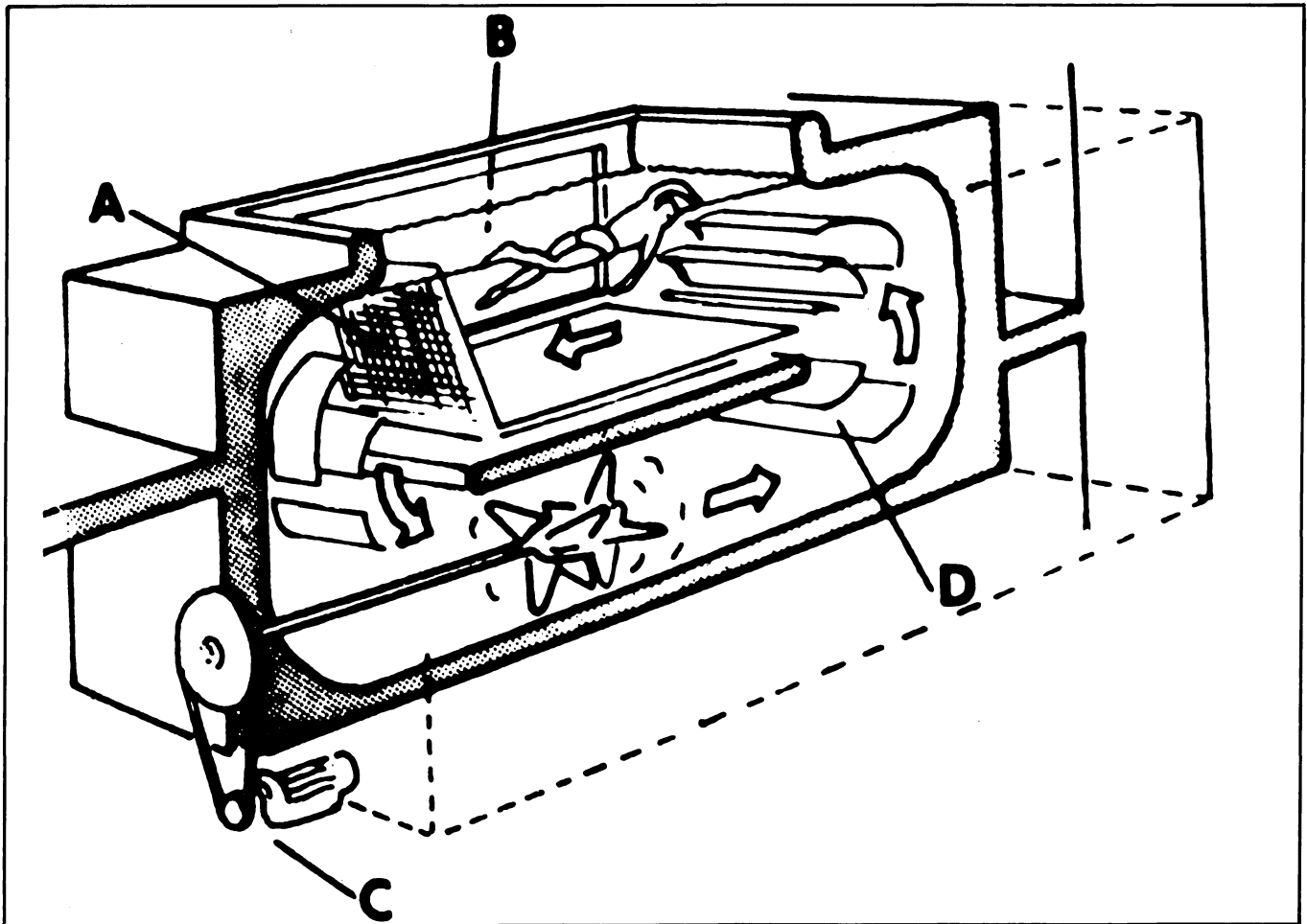


Fig. 20. Technique mise au point par notre équipe (Cazorla et coll. 1982) et actuellement utilisée à l'université de Montréal, à l'Institut national du sport et de l'éducation physique de Paris, au Laboratoire de physiologie et de médecine du sport de Saint-Etienne et au Centre régional du sport et de l'éducation physique de Bordeaux.



▲ Détermination de VO_2 max dans un bassin à flux continu ou «Swimming Flume». D'après Holmer, 1974.
 A = filet de protection B = fenêtre 2,5 x 1,5 m C = moteur électrique D = carène conductrice

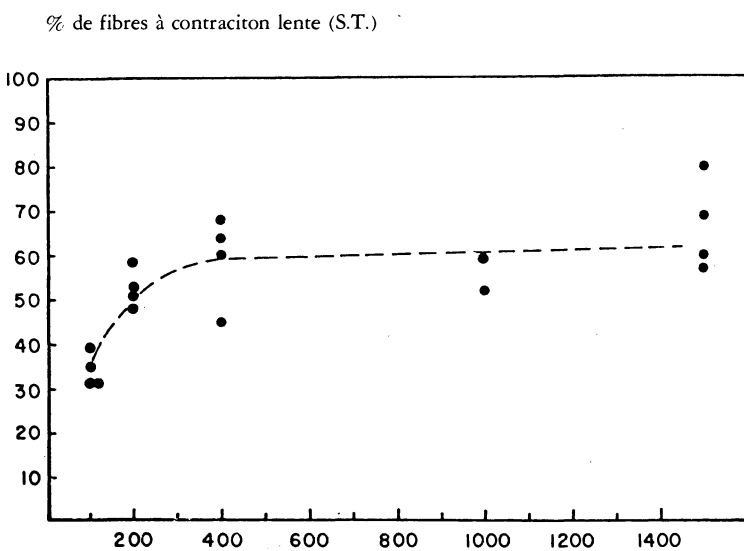


Fig. 17. Pourcentage de fibres à contraction lente chez quelques nageurs spécialistes de différentes distances de compétition. Costill D. L., 1978.

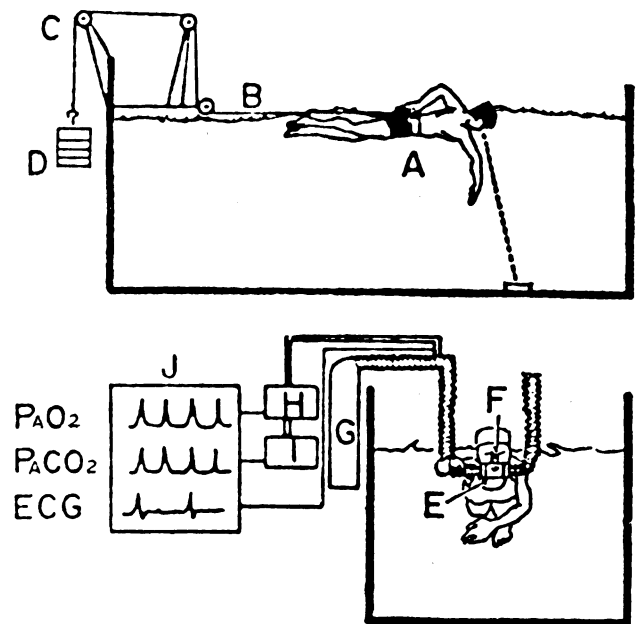


Fig. 18. Technique de détermination du VO_2 max, le sujet nageant contre des charges qu'il doit maintenir soulevées. D'après Nomura, 1978.
 A = ceinture.
 B = câble.
 C = poulie.
 D = charges additionnelles.
 E = valve à deux voies.
 F = pince-nez.
 G = sacs de Douglas.
 J = graphe d'enregistrement.

probablement à l'origine des valeurs ventilatoires (VE) et de l'équivalent respiratoire VE/VO₂ plus faibles en natation qu'en course et en cyclisme (Holmer 1972). On peut aussi imputer ces différences aux conditions mécaniques de la ventilation dont les phases inspiratoires et expiratoires sont synchronisées aux mouvements cycliques des membres supérieurs, la durée de la phase inspiratoire étant plus courte et l'expiration devant se faire contre la résistance de l'eau. Cependant, en dépit des gênes biomécaniques et physiques qui entraînent une légère hypoventilation, la pression et le contenu artériel en oxygène et en gaz carbonique ne sont pas affectés (Holmer 1974a) ce qui indique que les problèmes ventilatoires n'expliquent pas les VO₂ max. plus faibles enregistrés en natation.

« $\dot{V}O_2$ — Nage » et circulation.

Comparées aux valeurs obtenues à partir de la course et du cyclisme, les valeurs plus faibles des fréquences et des débits cardiaques maximaux qui accompagnent les VO₂ max.-nage, sont des phénomènes bien connus. Par contre, leurs explications ne font pas toujours l'unanimité. Ces différences semblent dépendre de la conjonction de plusieurs facteurs dont on connaît l'influence individuelle sur les modifications de l'hémodynamique générale. Parmi eux, citons : la position horizontale du sujet placé dans des conditions proches de l'apesanteur, l'utilisation plus importante des membres supérieurs et donc des masses musculaires plus faibles dans la locomotion aquatique (Vrijens et coll. 1975), la meilleure conduction de la chaleur par l'eau qui réduit le besoin de la circulation cutanée et modifie la réponse circulatoire à l'exercice (Rowel, 1969), l'immersion de la face, le temps d'apnée et l'élévation des pressions intrathoraciques qui contraignent le retour veineux et, enfin, l'effet de la pression hydrostatique sur la pression de perfusion des membres inférieurs (Folkow, 1971). Pour d'autres auteurs (Magel et coll., 1975) les fréquences cardiaques les plus basses pourraient être dues au contraire à un retour veineux plus aisé vers le cœur. Le meilleur retour veineux faciliterait le remplissage cardiaque, lui-même à l'origine de l'augmentation de la puissance de l'éjection systolique, ce qui expliquerait les fréquences cardiaques maximales plus faibles des nageurs.

La position horizontale et les modifications hémodynamiques qu'elle entraîne sont probablement aussi à l'origine des variations : rénine — angiotensine — aldostérone observées lorsque le sportif exécute le même exercice debout et dans l'eau (Guezennec et coll., 1984).

$\dot{V}O_2$ — Nage et facteurs locaux.

Dernier maillon de la chaîne du transport de l'oxygène, l'étape tissulaire est subordonnée aux propriétés des fibres musculaires mises en jeu dans les mouvements propulseurs. Gollnick et coll. (1972) ont relevé chez cinq nageurs de haut niveau d'importants pourcentages de fibres à contraction lente (près de 75 %) dans le deltoïde. Pourcentages élevés confirmés par Nygaard et Nielsen (1978) (environ 60 %).

Dans leur étude, Lavoie et coll. (1979) qui prélèvent

des échantillons musculaires dans le triceps brachial de nageurs, rapportent une distribution sensiblement égale de fibres lentes et de fibres rapides. Ces trois études sont, cependant, parfaitement en accord pour souligner une forte activité de la phosphofruktokinase et de la succinodéshydrogénase ainsi qu'un nombre important de capillaires, traduisant le pouvoir oxydatif élevé de toutes les fibres de l'épaule et du bras. Cela pourrait expliquer les plus faibles concentrations de lactate post-compétition et les quotients respiratoires plus bas relevés à « VO₂ max.-nage » comparés à ceux de « VO₂ max.-course ». (Cazorla et coll. 1982, Cazorla et Montpetit 1983). Par contre, ce meilleur pouvoir oxydatif des membres supérieurs ne semble pas avoir d'incidence sur l'importance du VO₂ max.

Si une consommation maximale d'oxygène élevée représente une potentialité toujours intéressante pour le nageur, non moins intéressante s'avère la consommation locale de l'oxygène par les muscles intervenant dans le mouvement propulsif.

Ajoutée au travail mécanique utile, elle conditionne le rendement dont dépend la performance.

b. Calcul du rendement de la nage.

Plus que dans n'importe quelle autre activité sportive, l'évaluation du rendement revêt en natation une acuité toute particulière. Le rendement objective l'interaction de tous les facteurs biomécaniques et bioénergétiques dont l'importance a été soulignée. Quelle serait en effet l'utilité de fortes réserves énergétiques et d'un VO₂ max. élevé si le sujet n'arrivait pas à avancer dans l'eau ou à se maintenir à la surface ! Il est évident que c'est le rapport existant entre le travail mécanique utile, traduit ici par la vitesse de nage, et la dépense énergétique correspondante, qui caractérise le rendement du nageur. Autrement dit, à une vitesse donnée, le nageur qui dépense le moins d'énergie présente le meilleur rendement. Si, de plus, ce nageur bénéficie d'un VO₂ max. élevé, tous les espoirs lui sont permis, à la condition toutefois qu'il veuille vraiment accéder au haut niveau ! Il est possible de se faire une bonne idée du rendement du nageur en utilisant le rapport étudié précédemment : VO₂/D qui traduit en quelque sorte « l'économie de la nage ». Lorsque l'on connaît le VO₂ pour une vitesse constante donnée, il suffit de calculer l'énergie dépensée pour parcourir 1 m, ou comme le proposent Pendergast et coll. (1978) pour parcourir 1 km (*tableau 6*). Au terme d'une expérience très astucieuse, ces mêmes auteurs ont réussi à résoudre le problème jusque-là insurmontable du calcul de la résistance rencontrée au cours même de la nage, accédant ainsi à la connaissance du rendement réel de la nage. (Di Prampero et coll., 1974; Rennie et coll., 1975; Pendergast et coll., 1977). Selon cette étude le rendement du nageur varierait entre 2 et 9 %, valeurs nettement plus basses que le rendement mécanique de la course (23 à 24 %). Cependant, malgré le protocole séduisant mis au point par ces auteurs, les valeurs du rendement qu'ils proposent paraissent très faibles. Il semble alors opportun de savoir si les vitesses très basses utilisées (0,9 m/s) ou le niveau technique médiocre des sujets de l'expérience n'en sont pas responsables. Cette même expérimentation reprise avec des nageurs de niveau

supérieur (Montpetit, 1982) donne, en effet, des valeurs supérieures mais encore éloignées du rendement mécanique de la course à pied.

Cependant, quel que soit le niveau des nageurs, les meilleurs rendements sont toujours obtenus avec les sujets jeunes et les femmes. Cela semble indiquer que les jeunes et les femmes, probablement en raison de leur densité plus faible, présentent de meilleures aptitudes naturelles à la nage que les hommes adultes. Il est ainsi possible d'expliquer pourquoi les jeunes réussissent mieux sur les distances longues et, malgré une puissance musculaire n'excédant pas 80 % de celle des nageurs, pourquoi les nageuses parviennent néanmoins à réaliser en compétition des vitesses atteignant en moyenne 90 à 95 % de celles des jeunes gens.

Mesures bioénergétiques et leurs premiers résultats.*

Du point de vue énergétique le nageur « idéal » serait celui qui pourrait disposer à la fois de fortes puissances anaérobie et aérobie, et de la possibilité de les maintenir à leur niveau le plus élevé pendant le plus long temps possible. En fait, toutes ces qualités qui sont fortement dépendantes de la nature des fibres musculaires, de leur approvisionnement énergétique et de leurs pouvoirs enzymatiques, se trouvent rarement réunis chez un même sujet. Il est alors opportun de déterminer l'aptitude dominante pour aider le jeune nageur à s'orienter vers la ou les distances sur lesquelles il aura le plus de chance de satisfaire ses ambitions sportives.

a. Biopsie et caractéristiques cellulaires du nageur de compétition.

Si, à partir d'échantillons musculaires prélevés au repos ou immédiatement après l'exercice, il est désormais possible d'établir une relation directe entre la répartition des différents types de fibres, le métabolisme préférentiel et l'aptitude énergétique requise par une distance de nage (fig. 17), pour des raisons déontologiques et matérielles faciles à deviner, ce procédé demeure relativement exceptionnel et relève uniquement de la recherche.

Dans le cadre de la présente démarche, ces recherches ont été menées au département d'Éducation physique de l'université de Montréal (Lavoie et coll. 1979). Elles ont permis de déterminer que, sur le plan histologique, seuls les nageurs de distances courtes (50 — 100 m) présentaient effectivement un pourcentage élevé de fibres à contraction rapide (FTa et FTb) alors qu'aucune différence significative n'a pu être établie chez les nageurs d'autres spécialités.

Sur le plan biochimique ces études ont permis, en outre, de constater dans tous les types de fibre un fort développement des enzymes intervenant dans le métabolisme aérobie et ce, indépendamment de la spécialité du nageur. Ce résultat est probablement dû à la forme d'entraînement : 12 à 18 kilomètres nagés quotidiennement à des vitesses variables souvent élevées. On peut alors s'interroger si, à terme, le développement du potentiel aérobie de toutes les fibres ne se fait pas au

détriment de leur vitesse et de leur puissance de contraction, ce qui pourrait désavantager le sprinter.

b. Consommation maximale d'oxygène et performance.

Compte tenu de l'interaction constante des qualités hydrodynamiques, biomécaniques et énergétiques dans la nage, l'absence de relation entre VO_2 max. obtenu sur tapis roulant et la performance de longue durée n'est pas surprenante (Cazorla 1978). De plus, l'épreuve de course sur tapis roulant est généralement peu appréciée des nageurs, surtout dans les phases cruciales de leur préparation.

Enfin, les résultats obtenus en course présentent souvent d'importantes différences avec ceux obtenus au cours de la nage. Autant de raisons qui invitent l'évaluateur à respecter les conditions habituelles de la pratique pour obtenir le reflet le plus exact possible de la capacité spécifique à apprécier. C'est ce qui a motivé la mise au point d'une technique particulière de mesure directe du VO_2 max. au cours de la nage (Cazorla et coll., 1982).

L'épreuve se déroule dans un bassin de 50 m (un bassin de 25 m peut aussi être utilisé), des paliers à vitesse de nage progressivement croissante sont imposés par l'intermédiaire d'un programmeur électronique commandant la mise sous tension de lampes situées sur une rampe placée au fond du bassin (fig. 20).

Les gaz expirés sont recueillis grâce à un ensemble étanche « embout buccal-valve » (photo 11) et orientés par un tuyau souple dans des sacs de Douglas transportés par un chariot sur le bord du bassin (photo 12). La vitesse du chariot est rigoureusement assujettie à celle du nageur. La fréquence cardiaque est également contrôlée en continu grâce à des électrodes rendues étanches et reliées à un électrocardiographe placé sur le chariot.

Les mesures du VO_2 max. de plus de 450 nageurs permettent aujourd'hui d'établir les premières normes par âge, sexe et niveau. Quelques-unes d'entre elles sont présentées par la figure 22. Les résultats obtenus avec les nageurs des équipes de France, toutes spécialités confondues, indiquent des valeurs moyennes de $4,85 \pm 0,48$ lmin⁻¹ pour les jeunes gens et de $3,50 \pm 0,44$ lmin⁻¹ pour les jeunes filles, valeurs assez éloignées de celles des meilleurs nageurs mondiaux : supérieures à 5 lmin⁻¹ et à 4 lmin⁻¹ respectivement pour les nageurs et les nageuses.

Lorsque la performance du sujet est exprimée en pourcentage du record du monde établi dans chaque spécialité, sa corrélation avec le VO_2 max. est d'autant plus importante que le sujet est jeune (tableau 7, Cazorla et Chatard 1983). Cela semble indiquer qu'un VO_2 max. élevé représente une des aptitudes de base requise pour débiter cette pratique. Comme l'entraînement du débutant inclut beaucoup de travail visant au développement de la capacité aérobie et que la technique à cet âge est encore peu affinée, il est aussi possible qu'une sélection s'opère essentiellement au niveau des qualités physiologiques.

Cette corrélation tend à disparaître avec les sujets plus âgés, suggérant notamment que d'autres facteurs, comme la technique, l'hydrodynamisme, les qualités

* Mesures issues de nos propres travaux.

neuro-musculaires et psychologiques, pourraient progressivement supplanter l'importance du seul VO_2 max. pour expliquer la valeur de la performance du nageur. C'est que nous avons tenté de démontrer au cours d'une récente étude dans laquelle vingt-quatre nageurs plus âgés furent évalués (Cazorla et Chatard 1983). Exprimée en pourcentage du record du monde leur performance ne présentait avec leur VO_2 max. qu'une corrélation (0.53) au seuil de sa significativité. Par contre, cette corrélation s'élevait à : — 0,71 lorsque était mesuré leur VO_2 pour une vitesse inframaximale identique pour tous (1,1 m/s), à — 0,82 lorsque ce même VO_2 à 1,1 m/s était ramené au kg du poids du sujet pesé en immersion, et à — 0,83, lorsque le VO_2 obtenu à 1,1 m/s était exprimé en pourcentage du VO_2 max. (tableau 8). Ces résultats, confirmés par l'étude de Chatard et coll. (1983), démontrent bien l'importance de l'interaction des qualités hydrodynamiques, techniques et physiologiques à la base de la performance en natation.

c. Lactatémie, performance et niveau d'entraînement.

Dès lors que l'apport d'oxygène aux muscles mis en jeu devient insuffisant, l'acidose cellulaire induite par les fortes concentrations de lactate risque de limiter la qualité de la performance. Or, comme la lactatémie post-compétition tend à le montrer (fig. 23), la plupart des spécialités requièrent une capacité anaérobie lactique élevée, cette dimension doit faire l'objet d'une attention toute particulière.

A cet égard, nos études se sont orientées dans trois directions : la détermination du profil référentiel de la lactatémie post-compétition (Duvallat et coll., résultats non publiés, Chatard et Geysant 1984); la recherche du seuil d'intensité à partir duquel la lactatémie commence à s'élever (Duvallat et coll. 1981, Chatard et coll., résultats non publiés) et l'influence de différents types de récupération sur la décroissance de la lactatémie post-compétition (Cazorla et coll. 1982).

Quel que soit le style de nage, les concentrations plasmatiques de lactate les plus élevées s'observent à l'issue des compétitions de 100 et 200 m. Cependant le 4 nages et la brasse qui mettent en jeu des masses musculaires plus importantes entraînent les plus fortes lactatémies (entre 14 et 21 mM/l). En moyenne, à durées sensiblement égales, les résultats obtenus à l'issue de compétitions de natation sont moins élevés que ceux relevés dans certaines disciplines « terrestres » (course, cyclisme, aviron), différences qui peuvent être expliquées par les influences de l'environnement aquatique, de la technique de locomotion, et du type d'entraînement, déjà évoquées précédemment. On peut noter en outre que les concentrations de lactate post-compétition ne dépendent pas uniquement de la performance réalisée, mais aussi, de la plus ou moins bonne répartition du travail musculaire au sein d'une même compétition. Il arrive, en effet, que le nageur présente une lactatémie plus élevée pour une performance moins bonne, lorsque les circonstances de la compétition lui imposent une allure trop vive dans les premiers mètres. Cet aspect tactique est bien connu des nageurs. Notons, enfin, que la lactatémie est toujours plus élevée à l'issue de compétition importantes qu'à la fin

d'épreuves-tests analogues d'entraînement, ce qui semble indiquer l'influence de certains facteurs psychologiques comme la motivation, pour repousser les limites de la fatigue induite par une forte acidose musculaire.

En ce qui concerne le seuil d'intensité à partir duquel la lactatémie s'élève, nos résultats tendent à montrer qu'en fonction de l'état d'entraînement du nageur ce seuil peut varier entre 75 et 90 % de VO_2 max. ce qui situe le travail dit « aérobie » à un niveau plus élevé que ne le pensent généralement les entraîneurs. Cette particularité est corroborée par la vitesse de nage entretenue au cours de la récupération après un exercice aquatique épuisant. Lorsque le choix est donné au nageur de haut niveau, la vitesse spontanément adoptée tend vers des valeurs sollicitant 70 à 75 % de VO_2 max. (fig. 24) ce qui est très nettement plus élevé que les résultats obtenus au cours d'activités « terrestres » (course, cyclisme). A ces intensités, la lactatémie retrouve son niveau de repos à l'issue de 15 à 20 min. de nage alors qu'une heure et plus sont nécessaires lorsque aucune activité n'est proposée durant la récupération, d'où l'intérêt de continuer d'entretenir un niveau d'activité élevé durant au moins un quart d'heure entre deux compétitions situées à des intervalles rapprochés.

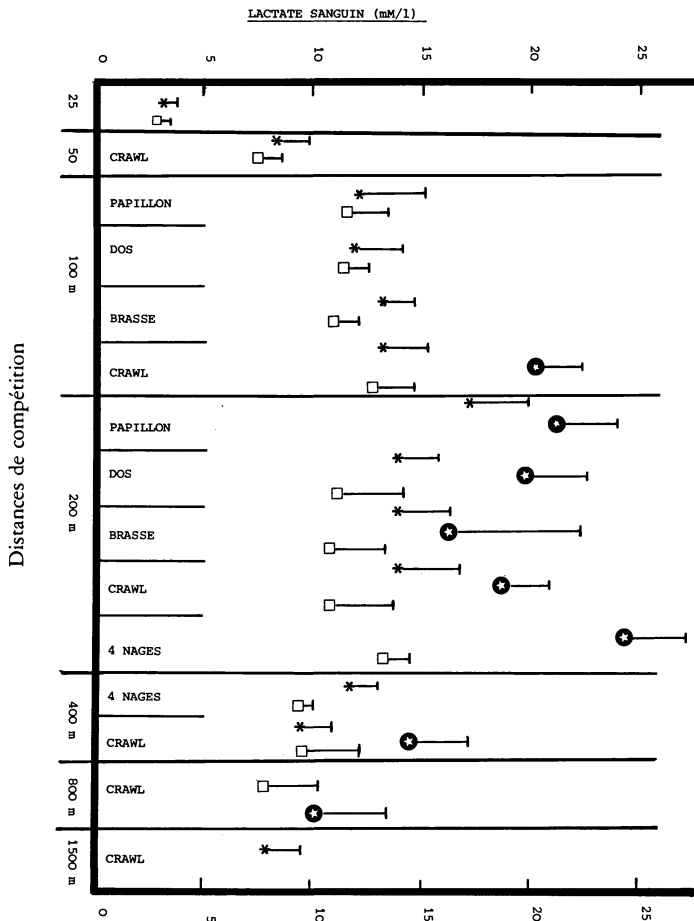
Au terme de cette approche théorique, à nouveau, il faut insister sur l'importance de l'interaction continue des facteurs biomécaniques et physiologiques à considérer pour analyser la performance en natation (fig. 25). Obtenir le reflet le plus exact possible des capacités aquatiques du nageur, requiert l'évaluation des différentes composantes qui la sous-tendent dans le respect des conditions habituelles de la pratique (Strømme et coll. 1977). Ensuite, plus que leur valeur propre, c'est l'étude de leurs interactions qui confère une signification pertinente aux résultats obtenus. Au stade de leur interprétation, l'analyse multifactorielle s'avère donc l'outil statistique le mieux adapté. C'est lui qui est utilisé pour commencer à établir le profil référentiel du nageur ou, plutôt, « des » nageurs de haut niveau car, d'un style à l'autre, les caractéristiques spécifiques montrent de telles différences qu'il semble non seulement indispensable d'étudier la natation dans sa totale spécificité mais de considérer chacune de ses spécialités comme autant de disciplines à part entière.

IV^e PARTIE

PROFILS RÉFÉRENTIELS DES NAGEURS DE HAUT NIVEAU.

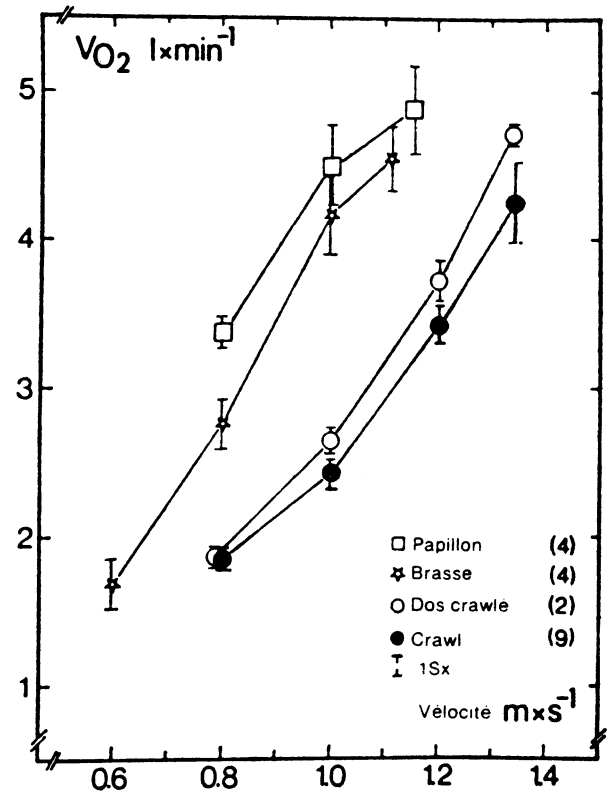
La recherche du « profil » caractéristique du nageur de haut niveau a fait l'objet de nombreux travaux (Cureton 1951, Shepard et coll. 1973, Kremlyeva 1974, Bulgakova 1978, Cazorla et coll. 1984). Seules les études de Kremlyeva et Bulgakova qui s'appuient sur des échantillons importants constituent des références fiables dans l'élaboration d'un profil de référence.

Les nageurs de haut niveau passés au crible de la sélection organisée (R.D.A., U.R.S.S., Pologne, Hongrie...) ou naturelle (U.S.A. et, en général, pays de l'Ouest) ont atteint leurs meilleures performances notamment grâce à l'interaction de leurs qualités physiques, leurs capacités physiologiques et leurs particularités morphofonctionnelles.



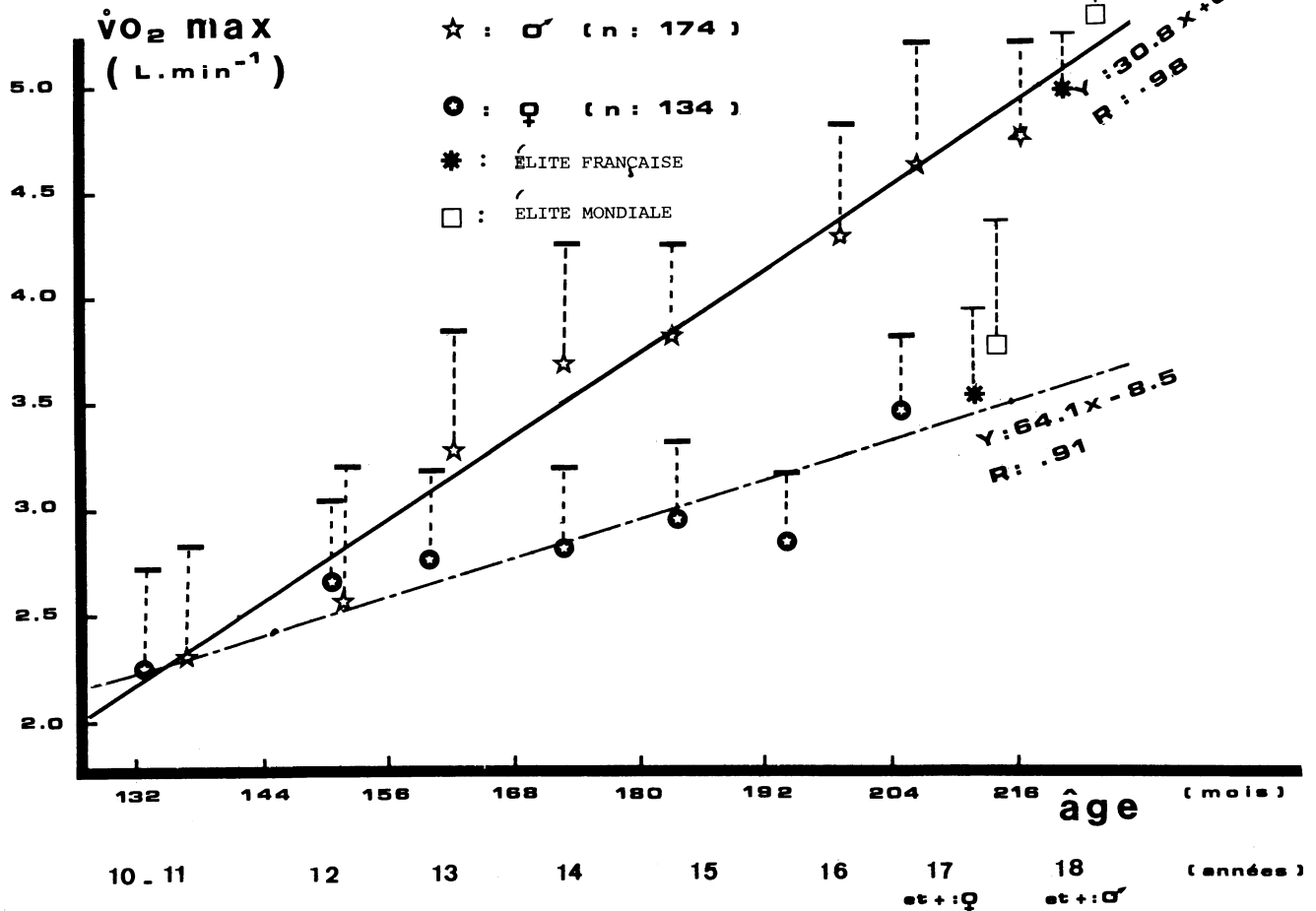
▲ Fig. 23. Concentrations plasmatiques de lactates après différentes compétitions officielles (excepté le 25 m).

* Nageurs = résultats personnels
 □ Nageuses
 ● = résultats de Sawka et coll.



▲ Fig. 21. Consommation d'oxygène et vitesse de nage dans les différents styles.

▼ Fig. 22. Evolution des VO2 max en fonction des différents âges.



ASPECTS MORPHOLOGIQUES.

Parmi les particularités morphofonctionnelles la taille du nageur semble jouer un rôle déterminant. L'analyse de la taille des nageurs (*tableau 9 et fig. 26*) qui ont participé aux quatre derniers jeux Olympiques démontre que tous les finalistes ont une taille supérieure aux autres nageurs, et les vainqueurs une taille en moyenne plus élevée que les autres finalistes. Cela peut s'expliquer par le fait que chaque 10 cm supplémentaires de taille diminue la valeur relative de la surface corporelle de 0,13 m² ce qui, à son tour, diminue la résistance opposée par l'eau au cours de la nage de 5 %. Outre la taille, selon les disciplines et les distances de nage, les spécialistes de haut niveau montrent une différenciation considérable de leurs dimensions linéaires absolues et relatives de leur surface de section (*fig. 26*) et de leur composition corporelle.

Les nageurs dont le travail présente un caractère de vitesse-force (sprinters, papillon et brasse) ont un poids plus élevé, des surfaces de section et des masses musculaires plus importantes, et un indice hydrodynamique moins bon que les nageurs de distance et les dossistes. La force et la puissance de traction jouent un rôle prépondérant pour obtenir des résultats sur courtes distances et peuvent compenser de mauvaises propriétés hydrodynamiques comme, par exemple, une flottabilité médiocre et une surface immergée du maître-couple plus grande. Les dossistes se distinguent des autres nageurs par une grande taille, un tronc court, de grandes jambes, une très grande envergure, une très importante amplitude articulaire scapulo-humérale, coxo-fémorale et tibio-tarsienne, une masse musculaire légère, un thorax aplati et une petite ossature. Ces trois dernières caractéristiques se retrouvent chez le nageur de longue distance, chez qui la taille ne semble pas jouer un rôle capital, par contre, leur flottabilité et leurs indices hydrodynamiques sont nettement meilleurs que chez les autres nageurs.

En ce qui concerne les spécialistes du 4 nages, hormis un thorax beaucoup plus plat, leurs autres caractéristiques sont très voisines de celles des sprinters de style libre et des nageurs de papillon.

Enfin, les brasseurs constituent un groupe bien à part. Ils présentent un aspect plus mésomorphe que tous les autres nageurs. Avec les nageurs de 1 500 m ils sont les plus petits, n'ont pas nécessairement une importante ceinture scapulaire, mais un tour de taille, un bassin et des segments inférieurs dont le développement musculaire excède celui de tous les autres nageurs. Alors que l'ensemble de ces derniers présente un bassin rétro-versé avec une grande ouverture coxo-fémorale et une démarche caractéristique « les pointes de pied en dedans » c'est exactement l'inverse qui se produit chez le brasseur. Est-ce une prédisposition naturelle au type de locomotion aquatique ou est-ce l'effet d'une haute spécialisation ? Les avis sont partagés dans ce domaine.

Au-delà de ces simples constats issus de la littérature et de nos propres mesures, en calculant les corrélations entre les meilleures performances obtenues dans chaque spécialité et un très grand nombre de mesures anthropométriques, Bulgakova a sélectionné les caractéristiques morphologiques les plus pertinentes et, ainsi, a mis en évidence des modèles morphofonctionnels propres à

chaque style et à chaque distance de nage (*fig. 27*). Ces modèles ont l'avantage de présenter les mesures extrêmes et les pourcentages au-dessous de ces extrêmes dans lesquels devraient normalement se situer les caractéristiques morphologiques des nageurs de haut niveau. Cependant, à l'examen attentif des résultats d'études sur la morphologie du nageur, nous sommes obligés d'admettre une grande variabilité du rapport entre performance et morphologie. Le performance étant la résultante de l'interaction de très nombreux facteurs, la carence ou le défaut d'un ou de plusieurs d'entre eux peut être compensé par l'hyperdéveloppement d'autres facteurs. Toutefois, comme toute compensation occasionne toujours une perte, il est possible d'affirmer que les nageurs qui ont le moins besoin de compenser présentent le plus de chances d'atteindre les meilleures performances.

ASPECTS MUSCULAIRES.

La plus grande force de traction dans l'eau, à vitesse nulle (sans translation; l'appareillage a été antérieurement décrit), en nage complète, est habituellement enregistrée chez les brasseurs et les sprinters (Bulgakova 1978, Magel 1970, Montpetit 1982), ensuite viennent les nageurs de papillon, du 4 nages, de dos et les nageurs de 1 500 m. Une corrélation élevée entre tous les indices de forces (mesurées à sec et dans l'eau) des sprinters du 100 m nage libre, indique que, pour réussir sur cette distance, le développement de force sous tous ses aspects est indispensable (Montpetit 1980).

Par contre, pour obtenir de bonnes performances sur des distances plus longues (400-1 500 m), les qualités de force et de puissance ne semblent pas décisives. Cela est confirmé par l'absence de corrélation entre les performances et la masse corporelle, les surfaces de section et la force de traction dans l'eau (Bulgakova 1978, Montpetit 1982).

Chez les nageurs de dos, Bulgakova a même montré une corrélation négative entre la force de traction dans l'eau (nage complète) et la masse corporelle. Autrement dit, pour obtenir de bonnes performances en nage sur le dos, comme pour les spécialistes du 1 500 m, les nageurs doivent avoir un poids léger. La programmation de la musculation du dossiste et du nageur de longue distance doit donc faire l'objet d'une très grande attention. Elle devrait le plus souvent être envisagée dans l'eau de façon à ne pas solliciter des groupes musculaires n'intervenant pas dans la locomotion évitant ainsi une augmentation inutile des surfaces de section musculaire, de la densité et donc du maître-couple immergé. La combinaison de bras forts, d'un poids léger et d'une bonne flottabilité des membres inférieurs, crée des conditions favorables au succès chez les dossistes.

ASPECTS ÉNERGÉTIQUES.

Comme il a été précédemment indiqué, parmi les qualités d'approvisionnement en énergie de l'organisme, il convient de distinguer particulièrement les sources anaérobies (alactiques et lactiques) et aérobies. La puissance anaérobie est identique à ce qu'il est convenu d'appeler « l'endurance de la vitesse », c'est-à-dire la possibilité que possède le nageur à maintenir un rythme élevé sur une distance donnée et de terminer la course à

pleine vitesse malgré une grande fatigue musculaire. Ainsi la puissance anaérobie joue un rôle déterminant dans la réalisation de hautes performances dans les disciplines de course durées comme la nage sur 100 et 200 m (fig. 16 et 23). Dans les épreuves sur distances moyennes et longues, les succès sportifs dépendent des mécanismes aérobie d'approvisionnement énergétique et sont liés aux valeurs de $\text{VO}_2 \text{ max.}$ (Bulgakova 1978, Cazorla 1982, Cazorla et coll. 1983a, 1983b; Montpetit et coll. 1983).

En généralisant les données de la littérature sur le $\text{VO}_2 \text{ max.}$ des nageurs, il est possible de conclure que les hautes performances en natation sont obtenues par les sujets dont le $\text{VO}_2 \text{ max.}$ est compris entre 4,5 et 5,5 lmin.^{-1} pour les hommes et 3,5 et 4,5 lmin.^{-1} pour les femmes (fig. 22). Cependant, plus que le $\text{VO}_2 \text{ max.}$ c'est la quantité d'énergie dépensée à vitesse maximale qui importe le plus. Celle-ci dépend des caractéristiques hydrodynamiques, de la technique et du style de nage. A partir des équations antérieurement présentées, Vinaricky (1976) a calculé les débits et les dépenses énergétiques des hommes et des femmes, nécessaires pour nager les différents styles de nages à leurs vitesses de compétition respectives (tableau 10). Certains de nos résultats les plus récents (Montpetit et coll. 1982 et 1983) ne confirment que partiellement ces données théoriques. Leur vérification expérimentale la plus systématique constitue actuellement le thème de nos travaux dont les conclusions seront prochainement publiées.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.

L'ensemble de ces travaux, analyses et études indique que la recherche dans les domaines de l'activité sportive de haut niveau en général et de la natation en particulier nécessite une évolution des schémas classiques. Il n'est plus possible, en effet, de ne pas tenir compte de ce qui se passe réellement sur le terrain où se manifeste la performance sportive. Il n'est de même plus possible de travailler isolément au sein de laboratoires hautement spécialisés, *a fortiori* si ces laboratoires développent certains aspects tout à fait particuliers ne se rapportant que de très loin à la motricité humaine. Les activités sportives ne doivent plus être les prétextes ou les enjeux de la recherche mais le véritable point de convergence d'équipes pluridisciplinaires de chercheurs hautement qualifiés en matière de sport et complémentaires dans leur approche. Mieux encore, pour progresser efficacement, la recherche portant sur l'activité physique et sportive requiert à la fois ses propres chercheurs et ses propres outils.

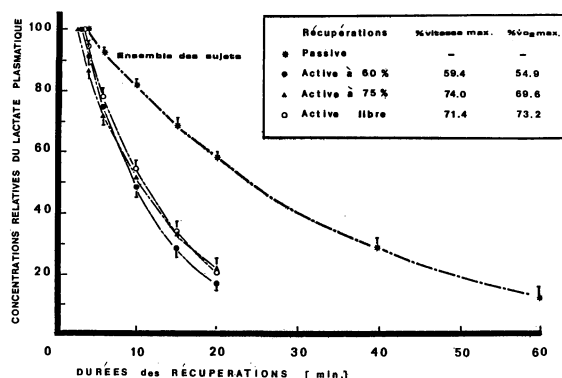


Fig. 24. Décroissance du lactate plasmatique en fonction de différentes — 153 — modalités de récupération.

Bibliographie.

- AGOSTINO E., GURTNER G., TORRI G. and RAHN H. — Respiratory mechanics during submersion and negative-pressure breathing. *J. Appl. Physiol.* 21 : 251-258, 1966.
- ALLEY L.E. — An analysis of water resistance and propulsion in swimming the crawl stroke. *Res. Quart.* 23 : 253-270, 1952.
- ARCELLI E. — Pourcentages de travail aérobie, de travail anaérobie alactique et de travail anaérobie lactique dans les épreuves de course de plat en athlétisme (italien) *Atletica Leggara* 204, janv. 1977.
- MC ARDLE W.D., GLASER R.M. and MAGEL J.R. — Metabolic and cardiorespiratory response during free swimming and treadmill walking. *J. Appl. Physiol.* 30 : 733-738, 1971.
- ASTRAND P.O. and ENGLESSON S. — A swimming flume. *J. Appl. Physiol.* 33 : 514, 1972.
- BARTHEL K.M. — Three dimensional kinematic analysis of the hand and hip in the butterfly swimming stroke. Thèse de doctorat, Washington State University, Pullman, U.S.A., 1974.
- BONEN A. et KEMP N.H. — Physiological, metabolic and practical considerations for training swimmers. *Physical Education* 3 (3) : 10-15, 1977.
- BONEN A., WILSON B.A., YARKONY M. and BELCASTRO A.N. — Maximal oxygen uptake during free, tethered and flume swimming. *J. Appl. Physiol.* : Respirat. Environ. Exercice Physio. 48; 232-235, 1980.
- BULGAKOVA N.S. — Sélection et préparation du jeune nageur. (Livre en russe) Moscou, 1978.
- CAZORLA G. — Contribution à l'étude de la performance en natation. Mémoire pour le diplôme de l'Institut national du sport et de l'Education physique (I.N.S.E.P.) 1978.
- CAZORLA G. — La consommation maximale d'oxygène du nageur. Mémoire I.N.S.E.P. Compte rendu de recherche, déc. 1982(a).
- CAZORLA G., MONTPETIT R., FOUILLOT J.P. et CERVETTI J.P. — Etude méthodologique de la consommation maximale d'oxygène au cours de la nage. *Cinesiologie*, 83 : 33-36, 1982 (b).
- CAZORLA G. — Métabolisme et activités sportives dans : *Manuel de l'éducateur sportif*, Vigot Edit., Paris, 1982 (c).
- CAZORLA G., DUFORT C., MONTPETIT R. et CERVETTI J.P. — The influence of active recovery from swimming exhausting work on the lactate metabolism. Communication : International congress of : Biomechanics and medicine of swimming. Amsterdam, 1982. Dans : *Biomechanics and Medicine in swimming*. International series on sport Sciences. Ed. Baltimore University Park Press, vol. 14, 244-250, 1983.
- CAZORLA G. et MONTPETIT R. — Niveau d'entraînement et spécificité de la consommation maximale d'oxygène chez le nageur. *Motricité humaine*. Institut national du sport et de l'éducation physique, 1 : 50-55, 1983 (a).
- CAZORLA G. et CHATARD J.-C. — Evaluation du niveau technique du nageur à partir de l'étude de sa consommation d'oxygène mesurée au cours de la nage. 2^e journée d'automne. Congrès int. de biomécanique; Carcans 1983.
- CAZORLA G., MONTPETIT R., PROKOP P. et CERVETTI J.P. — De l'évaluation des nageurs de haut niveau à la détection des talents dans : *Spécial Evaluation*. Ed. INSEP, Paris, 1984.
- CHARBONNIER J.-P. — Consommation maximale d'oxygène et aptitude physique du nageur de compétition. Thèse de médecine, Lyon, 1974.
- CHATARD J.-C., LACOUR J.-R. et CAZORLA G. — Influence des facteurs morphologiques sur la performance en natation. 2^e journée d'automne. Congrès int. de biomécanique, Carcans, nov. 1983. Congrès international du sport — Houston, 1984.
- CLARYS J.-P., JISKOOT J. et LEWILLIE — L'emploi de traces lumineuses dans l'analyse biomécanique de différents styles de natation, 1973.
- CLARYS J.-P. et JISKOOT J. — Aspects de la résistance à l'avancement lors de différentes positions du corps chez le nageur. *Sciences et motricité*; 1 : 71-80, 1978.
- CLARYS J.-P. et OLBRECH J. — Electromyographie, télémétrie, mouvements et feed-back. Congrès int. activités physiques, sports et biomécanique. 1^{re} journée d'automne Beg Rohu, nov. 1982.
- CONNAN A., CAZORLA G., LOFI A. et VAN HOECKE J. — Méthode de détermination de la force globale maximale développée au cours de la nage. VI^e Congrès int. de la société de biomécanique, Bruxelles, sept. 1981.
- COSTILL D.L., CAHILL P.J. and EDDY D. — Metabolic responses to submaximal exercise in three water temperatures. *J. Appl. Physiol.* 22 : 628-632, 1967.

Tableau 9. Taille et poids des nageurs finalistes des jeux Olympiques 1968-1980, groupe Hommes.

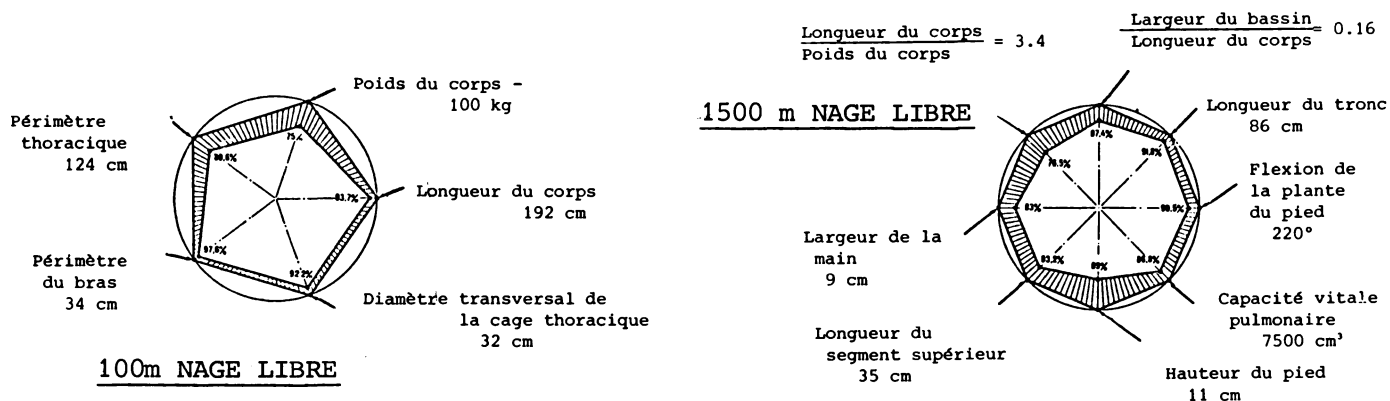
	MEXICO 68		MUNICH 72		MONTRÉAL 76		MOSCOU 80	
	T	P	T	P	T	P	T	P
Libre	182	76,2	184	76,2	191	81,9	192	79,5
Brasse	178	73,7	181	74,1	183	77,5	188	75,0
Dos	183	70,9	183	74,6	186	77,5	190	77,5
Papillon	179	74,9	183	72,3	186	79,6	192	78,5
400 QNI	182	75,6	184	76,1	181	71,6	189	76,0
1500 Libre	170	66,0	173	67,0	179	67,2	184	71,0

T : Taille en cm.
P : Poids en kg.

Tableau 10. Bilan énergétique de la natation de compétition d'après Vinaricky, 1976.

Styles et distances de nage	* Performance (min. sec. et 1/10)	* Vitesse (m/sec)	Débit (Kcal/min)	Dépense totale (Kcal)
Crawl - 100m				
a	00,51,3	1,95	51,8	44,24
b	00,57,6	1,74	39,8	38,2
Crawl - 200m				
a	01,52,8	1,77	41,1	77,25
b	02,03,5	1,62	31,6	65,10
Crawl - 400m				
a	03,58,1	1,68	35,4	140,36
b	04,18,1	1,55	27,2	117,0
Crawl - 1500m				
a	15,32,0	1,61	21,1	329
b	16,50,0	1,49	16,2	273
Dos - 100m				
a	00,56,3	1,78	57,55	54,0
b	01,05,0	1,54	44,3	48,0
Dos - 200m				
a	02,02,0	1,64	43,1	87,5
b	02,19,2	1,44	33,2	77,0
Papillon - 100m				
a	00,54,3	1,84	53,4	48,4
b	01,02,3	1,60	41,1	42,7
Papillon - 200m				
a	02,01,0	1,66	41,8	84,0
b	02,14,0	1,49	32,2	71,7
Brasse - 100m				
a	01,04,0	1,56	45,5	48,2
b	01,14,0	1,35	33,9	48,5
Brasse - 200m				
a	02,19,3	1,43	37,9	87,9
b	02,39,0	1,35	29,2	77,4

* Meilleures performances mondiales réalisées en 1976. (Les gains chronométriques dus au départ et aux virages ne sont pas pris en compte dans les performances.)



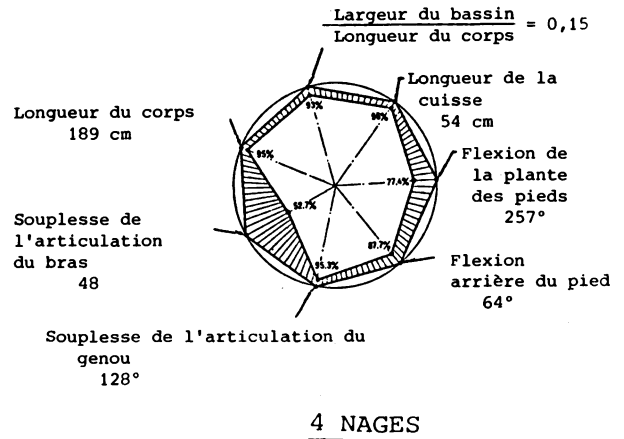
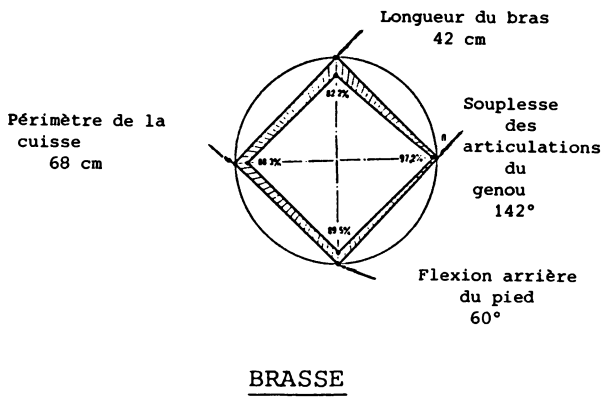
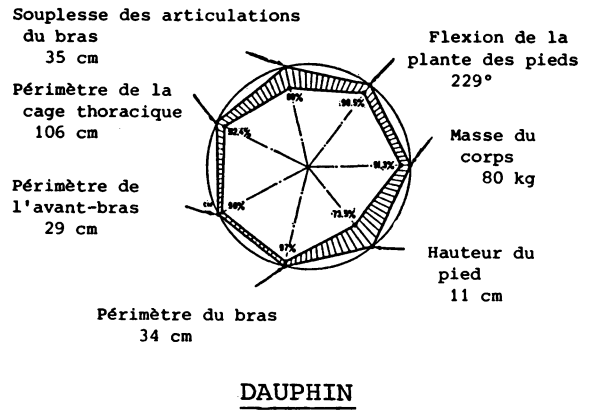
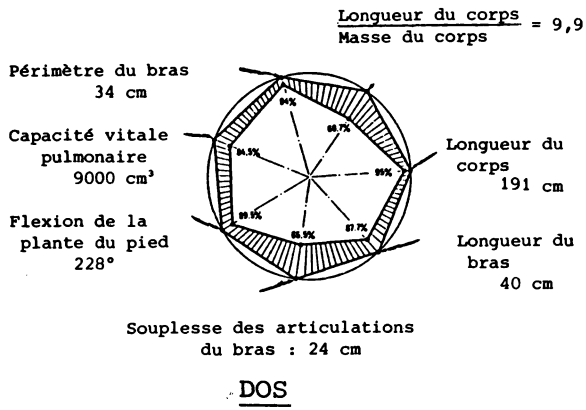
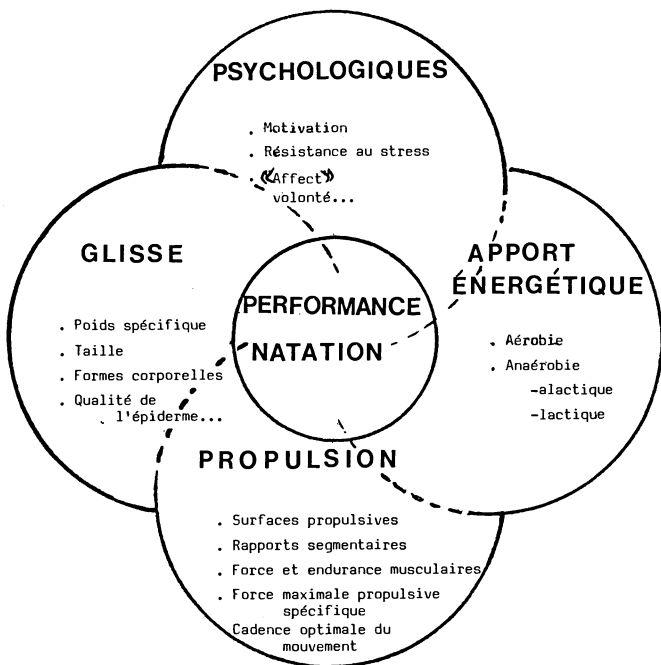


Fig. 27. Modèles morphofonctionnels des nageurs de haut niveau dans les différents styles. Seules les mesures corrélées avec la performance sont retenues. Leurs chiffres indiquent les valeurs maximales et les pourcentages au-dessous desquels il est rare de trouver des nageurs pouvant atteindre des performances élevées. (D'après Bulgakova 1978, partiellement confirmé par nos propres résultats.)



	Style libre		Dos	Dau- phin	Brasse	4 nages
	100 m	1500 m				
200						
150						
100						
50						
0						

Fig. 26. Surface de sections: 1. bidettoïde; 2. bras; 3. avant-bras; 4. taille; 5. bassin; 6. cuisse; 7. genoux; 8. jambe; 9. cheville (d'après Bulgakova).

Fig. 25. Interaction des différentes composantes qui entrent en jeu dans la performance en natation.

- COSTILL D.L. — Muscle biopsy research : Application of fiber composition to swimming. *World clinic yearbook* : 47-54, 1978.
- COUNSILMAN J.E. — Forces in swimming two types of crawl stroke. *Research Quarterly* 26, 2 : 127-139, 1955.
- COUNSILMAN J.E. — *The Science of Swimming*. Englewood Cliffs, Prentice Hall, Inc. 1968.
- COUNSILMAN J.E. — The role of sculling movements in the arm pull. *Swimming world* 10 : 6-7 et 43, 1969.
- COUNSILMAN J.E. — The application of Bernoulli's principle to human propulsion in water. In : *Biomechanics in swimming* : 59-71, Bruxelles, 1971.
- CRAIG A.B. Jr. and PENDERGAST D.R. — Relationships of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming. *Med. sc. Sports* 11 : 278-283, 1979.
- CRAIG A.B., J.R. and PENDERGAST D.R. — Relationship of stroke rate, distance per stroke and velocity in competitive swimming. *Medicine and science in sports*, Vol. II, 3 : 278-283, 1979.
- DU BOIS REYMOND R. — Zur physiologie des schwimmens. *Arch. Anat. Physiol.* 29 : 252-279, 1905.
- FAULKNER J.A. — Physiology of swimming and diving. *J. Physiol. of swimming*. Res. Quart. 37 : (1) 14-20 et 24, 1966.
- FELD R. — Die hydrodynamische wirkung des armes und des hand beim schwimmen. Diplomarbeit an der Deutschen Sporthochschule Köln, 88, 1974.
- FELD R., THIERER R. et WILKE K. — Etude de l'effet hydrodynamique du trajet moteur de la main dans le crawl (allemand). Beiheft zu leistungssport : schimmisport R.F.A. 14 : 4-30, 1978.
- FOLKOW B., HAGLUND U., JODAL M. and LUNDGREN O. — Blood flow in the calf muscle of man during heavy rhythmic exercise. *Acta Physiol. Scand.* 81 : 157-163, 1971.
- GADD G.E. — The hydrodynamics of swimming. *New Sci.* 19 : 483-485, 1963.
- GOLLNICK P.D., ARMSTRONG R.B., SAUBERT IV C.W., PIEHL K. and SALTIN B. — Enzyme activity and fiber composition in skeletal muscle of untrained and trained men. *J. Appl. Physiol.* 33 : 312-319, 1972.
- GUEZENNEC Y., CAZORLA G., DEFFER G., MORILLON D. et PESQUIES P.C. — Réponse du système renine-angiotensine à l'exercice physique en position couchée et debout. Association des physiologistes. Congrès Int. de physiologie de l'environnement, Université de Bordeaux, 1984.
- HOLMER I. and ASTRAND P.O. — Swimming trainings and maximal oxygen. *J. Appl. Physiol.* 33 : 510-513, 1972.
- HOLMER I. — Physiology of swimming man. *Acta physiol. Scand.* supp 407, Stockholm 1974 (a).
- HOLMER I. — Propulsive efficiency of breaststroke and freestyle swimming. *Europ. J. Appl. Physiol.* 33 : 95-103, 1974 (b).
- HOLMER I. — Energy cost of arm stroke leg kick, and the whole stroke in competitive swimming styles. *Europ. J. Appl. Physiol.* 33 : 105-118, 1974 (c).
- HOLMER I. and BERGH U. — Metabolic and thermal response to swimming in water at varying temperatures. *J. Appl. Physiol.* 37 : (5) : 702-705, 1974 (d).
- HOLMER I., STEIN E.M., SALTIN B., EKBLOM B. and ASTRAND P.O. — Hemodynamic and respiratory responses compared in swimming and running. *J. Appl. Physiol.* 37 : 49-54, 1974 (e).
- HOLMER I., LUNDIN A. and ERIKSSON B.O. — Maximum oxygen uptake during swimming and running by elite swimmers. *J. Appl. Physiol.* 36 : 711-714, 1974 (f).
- HONG S.K., CERRETELLI P., CRUZ J.C. and RAHN H. — Mechanics of respiration during submersion in water. *J. Appl. Physiol.* 27 : 535-538, 1969.
- HOUSTON M.E. — Metabolic responses to exercise with special reference to training and competition in swimming. In *Swimming Medicine IV*. Baltimore University Park Press : 207-232, 1978.
- HOUSTON M.E., WILSON D.M., GREEN H.J., THONSON J.A., RANNEY D.A. — Physiological and muscle enzyme adaptation to two different intensities of swim training. *Eur. J. Appl. Physiol.* 46 : 283-291, 1981.
- IKAI M., ISHII K. and MIYASHITA M. — An electromyographic study of swimming. *Res. J. physical education.* (7) 4 : 47-54, 1964.
- ISSOURIN V.B., GLOZKOV A.B. — Comment déterminer les forces de résistance hydromécanique et les forces de traction en natation. In : *Teorija i prakiska fizigeskoy kultury.* 9 : 20-24, 1977.
- ISSOURIN V.B., GLOZKOV A.B., DEMENT'EV A.N. and SKVORTSOV A.B. — Maximal power of locomotion in water. Translate from *Fiziologiya cheloveka*, (5) 4 : 600-606, july-august 1979.
- JOKL P. and JOKL E. — Running and swimming world records. *Journal of sports medicine and physical fitness.* 17 : 213-229, 1977.
- JOKL E. and JOKL P. — World records in running and swimming re-evaluation of data, *British journal of sports medicine.* 12 : 37-38, 1978.
- JURINA K. — Srovnávací studie plavání ryb a člověka. Theori praxe těl vých (étude comparative de la nage du poisson et de l'homme. Théorie et pratique de la culture physique. Traduction INSEP) 20 : 161-166, 1972.
- JURINA K. et JASAN L. — Influence de certaines dimensions du corps sur les conditions hydrodynamiques en natation. Těori a praxe telesne vychovy (tchécoslovaque, traduction INSEP) (1) 4 : 230-236, 1977.
- KARPOVICH P.V. — Water resistance in swimming. *Res. Quart.* 4 : 21-28, 1933.
- KARPOVICH P.V. — Analysis of the propelling force in the crawl stroke. *Res. Quart.* (6) 2 : 49-58, 1935.
- KARPOVICH P.V. and PESTRECOV K. — Mechanical work and efficiency in swimming crawl strokes. *Arbeits Physiologie.* 10 : 504-514, 1939.
- KARPOVICH P.V. — Energy expenditure in swimming. *Amer. J. physiol.* 142 : 140-144, 1944.
- KENT M.R. and ATHA J. — Selected critical transient body positions in breast stroke and their influence upon water resistance. In : 1st International symposium of biomechanics in swimming. Eds. L. Lewillie and J.P. Clarys. Bruxelles : 119-125, 1971.
- KOZEL J. — Zur vermindering des reibungswiderstandes mittels additiven beim schwimmen-leistungssport (R.F.A.) 5 : 1975.
- KREMLYEVA M.N. — Quelques caractéristiques morpho-fonctionnelles des meilleurs nageurs et leur influence sur la vitesse de nage (en russe). *Théorie et pratique de la culture physique* 3 : 1974.
- LAVOIE J.-M., TAYLOR A.W. and MONTPETIT R. — Skeletal muscle fibre size adaptation to an eight week swimming program. *Eur. J. Appl. Physiol.* 44 : 161-165, 1980.
- LAVOIE J.-M. et NADEAU M. — La natation. Dans *Physiologie appliquée de l'activité physique*. NADEAU M./PERONNET E. et coll. Ed. Vigot, Paris (7) : 95-106, 1980.
- LEPERE G.B. et PORTER G.H. — Cardiovascular and metabolic response of skilled and recreational swimmers during running and swimming. *Appl. Science and medicine to sport*. Chap. 24, 1972.
- MAGEL J.R. — Maximum oxygen uptake of College Swimmers. Ph D Dissertation ; University of Michigan, 1966.
- MAGEL J.R. and FAULKNER J.A. — Maximum oxygen uptake of College Swimmers. *J. Appl. Physiol.* 22 : 929-933, 1967.
- MAGEL J.R. — Propelling force measured during tethered swimming in the four competitive swimming styles. *Res. Quart.* 41 : 68-74, 1970.
- MAGEL J.R., FOGIA G.F., MC AARDLEW.D., GUTIN B., PECHARD G.S. and KATCH F.I. — Specificity of swim training on maximum oxygen uptake. *J. Appl. Physiol.* 38 : 151-155, 1975.
- MAGEL J.R., MC ARDLE W.D., TONER M. and DELIO D.J. — Metabolic and cardiovascular adjustment to arm training. *J. Appl. Physiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol.* 45 (1) : 75-79, 1978.
- MARGARIA R., CERRETELLI P., AGHEMO P. and SASSI G. — Energy cost of running. *J. Appl. Physiol.* 18 : 367-370, 1963.
- MARGARIA R., AGHEMO P. and PINERA LIMAS F. — A simple relation between performance in running and maximal aerobic power. *J. Appl. Physiol.* 38 (2) : 351, 1975.
- MILLER D.I. — Biomechanics of swimming. *Exercise and sport sciences reviews* 3 : 219-248, 1975.
- MIYASHITA M., HAYASHI Y. and FURUHASHI H. — Maximum oxygen intake of Japanese top swimmers. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 10 : 211-216, 1970.
- MIYASHITA M. — Arm action in the crawl stroke. In : *Swimming II*. Int. series on sport sciences : 167-173, 1975.
- MONTPETIT R.-R., LEGER L.-A., LAVOIE J.-M. and CAZORLA G. — VO₂ max. during free swimming using the backward extrapolation of the O₂ recovery curve. *Eur. J. Appl. Physiol.* 47 : 385-391, 1981.
- MONTPETIT R.-R. — Maximal voluntary propelling force in swimming. In : *ASCAC world clinic year book*, R.M. OUSLEY (ed.) : 279-286, 1982 (a).
- MONTPETIT R.-R. — Efficiency, economy and energy expenditure in swimming. In : *ASA world clinic year book*, R.M. OUSLEY (ed.) : 83-92 Ft. Lauderdale, USA, 1982 (b).
- MONTPETIT R.-R. et CAZORLA G. — La détection du talent en natation. In : *La Revue de l'entraîneur*. Association canadienne des entraîneurs : 26-32, juil.-sept. 1982 (a).

MONTPETIT R.-R. and CAZORLA G. — The influence of the force gravity and body drag on the energy cost of swimming the front crawl. Int. congress: Biomechanics and medicine of swimming. Amsterdam, 1982 (b).

MONTPETIT R.-R., CAZORLA G. and LAVOIE J.-M. — Aerobic energy cost of swimming the front crawl at high velocity in International class and adolescent swimmers. In: Proceedings of the congress in biomechanics and medicine in swimming, Amsterdam, 1982 and: Biomechanics and Medicine in swimming. International series on sport sciences. Vol. 14, 228-234, 1983.

MONTPETIT R.-R. — La morphologie du nageur, un facteur important. In: *Natation Québec* 1: n° 3, 18-19, fév.-mars 1983.

NYGAARD E. and NIELSEN E. — Skeletal muscle fiber capillarization with extreme endurance training in man, in: ERIKSSON B.E. and FURBERG: *Swimming medicine* IV, Baltimore, University Park Press: 282-293, 1978.

ONOPRIENKO B.I. — Méthodes de détermination de l'efficacité des efforts de poussée dans les différents styles de nage. *Teoriya i prakiska fiziceskoj kulture*, 12: 12-13, 1976.

PENDERGAST D.R., DI PRAMPERO P.E., CRAIG J.R., A.B., WILSON D.R. and RENNIE D.W. — Quantitative analysis of the front crawl in men and women. *J. Appl. Physiol.* 43 (3): 475-479, 1977.

PENDERGAST D.R., DI PRAMPERO P.E., CRAIG J.R., A.B. and RENNIE D.W. — The influence of selected biomechanical factors on the energy cost of swimming, in: ERIKSSON B. and FURBERG: *Swimming medicine* IV, Baltimore, University Park Press: 367-378, 1978.

DI PRAMPERO P.E. and RENNIE D.W. — *Body drag and efficiency in swimming.*

DI PRAMPERO P.E., PENDERGAST D.R., WILSON D.W. and RENNIE D.W. — Energetics of swimming in man, *J. Appl. Physiol.*, 37, 1, 1974.

DI PRAMPERO P.E., PENDERGAST D.R., WILSON D.W. and RENNIE D.W. — Blood lactic acid concentration in high velocity swimming, in: ERIKSSON B. and FURBERG: *Swimming medicine* IV, Baltimore, University Park Press: 367-378, 1978.

PRANCE H.D. and SCHMIDT-NIELSEN K. — The metabolic cost of swimming in ducks. *J. exp. biol.*, 53: 763-777, 1970.

PRUD'HOMME R., CONNAN A., MARTIN P., LAVOIE J.-M., MONTPETIT R.-R. and CAZORLA G. — Mesure dynamique de la force propulsive maximale en natation. Ass. canadienne-française pour l'avancement des sciences, mai 1980.

RENNIE D.W., DI PRAMPERO P.E. and CERRETELLI P. — Effects of water immersion on cardiac output, heart rate, and stroke volume of man at rest and during exercise. *Medicina dello sport*, 24: 223-228, 1971.

ROWELL L.B., MURRAY J.A., BRENGELMANN G.L. and KRANING II K.K. — Human cardiovascular adjustments to rapid changes in skin temperature during exercise. *Circ. Res.*, 24: 711-724, 1969.

SAWKA M.N., KNOWLTON R.G., MILES D.S. and CRITZ J.B. — Post-competition blood lactate concentrations in collegiate swimmers. *J. Appl. Physiol.* 41: 93-99, 1979.

SCHLEIHAUF F. — A biomechanical analysis of freestyle aquatic skill, in: COUNSILMAN J. — *Competitive manual swimming*, Englewood Cliffs, 1977.

SHEPARD J.R., GODIN G. and CAMPBELL R. — Characteristics of sprint, medium and long distance swimmers. *Europ. J. Appl. Physiol.* 32: 99-116, 1974.

SMITH L. — Anthropometric measurements and arm and leg speed performance of male and female swimmers as predictors of swim speed. *J. Sports Med.* 18: 153-168, 1978.

STRÖMME S.B., INGJER F. and MEEN H.D. — Assessment of maximal aerobic power in specifically trained athletes. *J. Appl. Physiol. Respirat. Environ. Exercise physiol.* 42: 833-837, 1977.

THRALL W.R. — A performance analysis of the propulsive forces of the flutter Kick. Doctoral dissertation. State University of Iowa, 1960.

TORRE C. — Theorie des sportschwimmens. Kinematische Überlegungen zum Kraulen In: *Sportwissenschaft*, 2: 1-76, 1972.

VRIJENS J., HOEKSTRA J., BOUCKERT J. and VAN TYVANCK P. — Effects of training on maximal working capacity and haemodynamic response during arm and leg exercise in a group of paddlers, *Europ. J. Appl. Physiol.* 34: 113, 1975.

VINARICKY R. — Bilan énergétique en natation (en tchécoslovaque, traduction INSEP). *Teorie a praxe telesne vycchovy*, 2: 98-106, 1976.

WUTSCHERK H. — 1. Mesures du corps et type de conformation corporelle de nageuses de haut niveau (traduction INSEP). 2. Essai de la

délimitation de la conformation corporelle des nageurs de haut niveau (nage libre et dauphin) *Wissenschaftliche zeitschrift des deutschen sporthochschule für körperkultur*. 1: 65-139, 1968.

YOSHIZAWA M., OKAMOTO T., KUMAMOTO K.D. RA P., TOKUYAMA H. and OKA H. — Electromyographic study of two styles in the breast-stroke as performed by top swimmers, in: *International series on biomechanics* VIB, Vol 2b: 126-131, 1978.

Notes.

1. A la demande de la Direction technique nationale de la Fédération française de natation, c'est à cette date que, pour la première fois en France, s'est constituée une équipe pluridisciplinaire de chercheurs autour des thèmes: la détection du talent, la sélection sportive, le suivi du nageur de haut niveau, l'amélioration des conditions de la pratique et les répercussions psychologiques et biologiques de la pratique de la natation à un haut niveau. En outre, dans le cadre d'une convention franco-québécoise ces travaux se sont conjointement développés dans plusieurs centres français de recherche et à l'université de Montréal.

2. Le lecteur non spécialisé voudra bien se référer au lexique situé en encadré pour trouver une définition aux termes utilisés par les auteurs.

3. Voir définition dans l'encadré.

4. Voir définition dans l'encadré.

5. Niveau moyen, ce qui par exemple en crawl se traduit par: 1 min au 100 m, 2 min 08 au 200 m, 4 min 28 au 400 m, 19 min au 1500 m.

6. Niveau mondial.

Quelques définitions.

Trainée: force qui s'oppose à la translation d'un corps dans un fluide (synonyme: résistance). C'est cette force qu'il est possible de diminuer en réduisant le maître-couple.

Translation: mouvement continu d'un solide dont toutes les parties gardent une direction constante.

Maître-couple: le couple est une pièce qui entre dans la construction d'un fuselage et se trouve placé perpendiculairement à celui-ci. Le maître-couple représente la plus grande surface de la coupe frontale du corps en mouvement.

Friction: en mécanique des fluides, la friction représente l'ensemble des causes qui provoquent la dégradation de l'énergie mécanique en chaleur au cours de l'écoulement d'un fluide dans un conduit, ou du glissement d'un corps dans un fluide.

Couche limite: lors du glissement d'un corps dans un fluide, l'écoulement des molécules le long des parois se réalise sous forme de « plans moléculaires ». Le premier plan acquiert la même vitesse que celle du corps, entraînant les plans suivants à une vitesse décroissantes. La zone située entre la paroi du corps et le plan où les molécules ne subissent plus l'influence du mouvement du corps, détermine la couche limite. Fig. 8.

Écoulements laminaire et turbulent: à l'intérieur de la couche limite, les molécules d'eau s'écoulent à la manière de lames qui glisseraient les unes sur les autres, d'où le nom d'écoulement laminaire. Au delà d'un point T dit de transition (ou point critique), de laminaire l'écoulement devient turbulent. Ce point critique dépend de la forme du corps, de la vitesse de l'écoulement et de la viscosité du milieu. Cet ensemble est représenté par le nombre de Reynolds: Re.

Nombre de Reynolds: coefficient sans dimension défini par la formule:

$$Re = \frac{V.L.G}{\mu} \quad \text{ou}$$

V = vitesse moyenne du corps

L = longueur du corps

G = densité du fluide

μ = coefficient de viscosité.

Viscosité: résistance d'un liquide à l'écoulement uniforme et sans turbulence. Elle se manifeste par une difficulté plus ou moins grande de l'écoulement des molécules ou plans moléculaires parallèles. La viscosité s'exprime en poises dans le système CGS.

Nombre de Froude: la résistance déterminée par le système de vagues est fonction du nombre de Froude. Paramètre sans dimension basé sur la longueur (L) du corps en translation dans l'eau; ce nombre s'exprime par l'équation:

$$Fr = \frac{L^2 V^2 \gamma / G}{\gamma L^3} = \frac{V}{(GL) \frac{L}{2}}$$

L: longueur du corps; V: vitesse, γ poids spécifique (pesé en immersion); G: attraction de la pesanteur.

Énergétique:

ATP: adenosine triphosphate, molécule dont le catabolisme en adenosine diphosphate (ADP) et monophosphate (AMP) libère l'énergie nécessaire à la contraction musculaire.

VO2: volume d'oxygène consommé par unité de temps ou, consommation d'oxygène.

VO2 max: consommation maximale d'oxygène.