

PLUS VITE EN MINIMAX.

EFFET DES COULÉES SUR LA VITESSE EN 100M 4 NAGES CHEZ 67 NAGEURS NON EXPERTS

MÁS RÁPIDO CON EL MINIMAX.

EFFECTO DE LAS INMERSIONES EN LA VELOCIDAD DE NADO EN LOS 100 METROS ESTILOS EN 67 NADADORES NO EXPERTOS

FASTER IN MINIMAX.

EFFECT OF THE UNDERWATER SWIMMING ON THE SPEED IN 100M MEDLEY FOR 67 NOT EXPERT SWIMMERS

Luc Collard
Professeur, Université Paris Descartes, UFR STAPS
luc.collard@parisdescartes.fr
lucstaps@gmail.com

Corinne Fantoni
Docteur en STAPS, Université Paris Descartes
corinne.fantoni@parisdescartes.fr

Joseba Etxebeste Otegi
Professor, Universidad del País Vasco, EHU
joseba.etxebeste@ehu.es

Fecha recepción: 24-04-2017
Fecha aceptación: 03-02-2018

Résumé

Les performances chronométriques de 67 nageurs sont comparées lors de la réalisation de deux 100m 4 nages en petit bassin (25m). Le premier 100m est nagé sans contrainte, le plus vite possible. Pour le second 100m, les nageurs doivent utiliser leur « minimax » – minimum de coups de bras en surface et maximum de vitesse – selon un barème préalablement établi. Ils sont ainsi amenés à valoriser les ondulations sous-marines dans le respect réglementaire. Tous les nageurs sont convaincus d'être plus performants lors du premier 4 nages sans contrainte, alors que les 29 meilleurs du groupe vont plus vite en maximisant leurs immersions dans l'épreuve du «minimax».

Mots-clefs: natation, performance, minimax, 4 nages, coulées

Resumen

Se comparan los tiempos de 67 nadadores durante la realización de dos pruebas de 100 metros estilos en piscina de 25 m. En el primer intento se nadan los 100 metros estilos lo más rápidamente posible y sin ninguna restricción. Para los segundos 100 m, los nadadores deben usar su "minimax" – mínimo número de brazada en superficie y la máxima velocidad en función de una tabla-baremo previamente establecida. De este modo, se les empuja a valorar las oscilaciones corporales subacuáticas permitidas por el reglamento de la federación de natación. Todos los nadadores están convencidos de tener un mejor rendimiento en los primeros 100 m estilos sin restricción que en los segundos, aunque los 29 mejores nadadores del grupo son más rápidos al maximizar sus inmersiones en el evento "minimax".

Palabras clave: natación, rendimiento, minimax, estilos de nado, buceo

Abstract

The swim times of 67 swimmers were compared during the performance of two 100-meter individual medleys in a short course (25 meter) pool. The first medley was swum as fast as possible and in the absence of any particular stylistic constraints. For the second medley, the swimmers had to use their "minimax" – minimum strokes, maximum speed – according to a pre-established scheme. The athletes were thus encouraged to use underwater dolphin kicking, to the extent permitted by the sport's rules. All the swimmers were convinced that they had swum more rapidly in the first (unconstrained) medley, whereas the 29 better swimmers in the group more quickly by maximizing their immersions in the minimax trial.

Keywords: swimming, performance, minimax, medley, underwater dolphin kicking

Introduction

Comment l'être humain fait-il pour se mouvoir le plus vite possible dans l'eau ? En poussant l'eau directement vers l'arrière, évidemment ! Et bien alors, citez donc un seul mammifère marin s'y prenant ainsi... (Il n'y en a pas).

Il peut sembler étonnant que l'Institution sportive n'ait retenu aucun des modes de propulsion inspirés par la sélection naturelle (Collard et al., 2008). Les crawlleurs, papillonneurs, dossistes et brasseurs se meuvent de façon plus proche des chevaux, des éléphants ou des rats dans l'eau que des phoques, des orques ou des dauphins, dont la propulsion est pourtant bien plus adaptée à la vitesse...

Tirant l'essentiel de leur propulsion des bras (Counsilman, 1986), les nageurs s'appuient sur des masses d'eau qu'ils dirigent majoritairement vers l'arrière (Sanders, 1998; Troup, 1992; Wood & Holt, 1979). Ils profitent ainsi des forces de traînée propulsive (« drag-based propulsion ») dirigées à l'opposé des appuis (Cappaert & Rushall, 1994; Holt, 1989; Sanders, 1997a, 1997b; Sprigings & Koehler, 1990). Restant en surface, les nageurs maintiennent une partie du corps en dehors des résistances aquatiques ; surtout à haute vitesse où les meilleurs crawlleurs réussissent à se hisser littéralement au-dessus de l'eau, à la façon des hors-bord (Vennell et al., 2006). Le positionnement en surface permet en outre de faciliter la respiration et d'utiliser un retour aérien des bras vers l'avant (en dos, crawl et papillon) offrant ainsi moins de résistance qu'un retour des bras sous-marin (brasse). Revers de la médaille, d'autres résistances au déplacement ignorées des profondeurs se forment en surface (résistance de vagues, traînées de remous). Hertel (1966) estime que nager en surface peut augmenter les résistances à l'avancement par 5. Et puis les possibilités propulsives sont 20% plus faibles en surface qu'à une profondeur de 60cm (Chollet, 2000).

Aussi, pour améliorer le rendement de nage, l'évolution a mis sur une autre logique. Les espèces les plus adaptées au monde aquatique se déplacent vite et longtemps en s'immergeant profondément (Webb, 1975; Williams et al., 1992). Mais, afin de ne pas avoir à perdre de l'énergie dans le retour sous-marin des appuis, les mammifères marins ont abandonné les forces de traînée propulsive pour s'orienter vers les forces de portances propulsives « lift-based propulsion » (Fish, 1996). Même les membres supérieurs performants des phoques ou des otaries ne leur servent qu'à se lancer ou à changer promptement de direction. Recherchant de la vitesse, ces mammifères semi-aquatiques collent leurs antérieurs sur le corps et ondulent latéralement (Fig. 1).

	Mode de propulsion privilégié	Position la plus fréquente	Nages sportives	Illustrations animales	
Nage	Force de traînée	Surface	Crawl, Papillon, Brasse, Dos	Rat, Chien, Cheval	Efficiéce propulsive & énergétique ↓ +
		Sous-marine		Ornithorynque, tortue luth	
	Force de portance	Surface		Alligator, Iguane	
		Sous-marine		Dauphin, Espadon, Phoque	

Fig 1. Modes de propulsion aquatique des humains par comparaison à d'autres espèces animales. La natation sportive privilégie le mode de propulsion le moins approprié au milieu aquatique (adapté de Fish, 1993, 1996).

Les forces de portance s'appliquent à 90° des forces de traînées (Brown & Counsilman, 1971; Maglischo, 1982; Schleihauf, 1978). Durant les oscillations pelviennes, dans un plan vertical chez les dauphins ou dans un plan horizontal chez les crocodiles, les forces de traînée propulsive tendent à déplacer le corps de haut en bas ou de droite à gauche. Les forces de portance propulsive sont produites par effet de dépoliarisation et bénéficient d'un rendement qui étonne encore la communauté scientifique. Ceci est rendu sous le nom de « paradoxe de Gray ». Gray (1936) a estimé la puissance nécessaire pour qu'un dauphin puisse nager comme il le fait (vite et longtemps), considérant les résistances à l'avancement compte tenu de son coefficient de forme (Cx) et de sa surface du maître couple (S, projection du contour du dauphin sur un plan à 2 dimensions placé perpendiculairement à lui)... Le calcul indique que, pour obtenir les performances réellement observées, la puissance musculaire requise devrait être multipliée par 7.

En fait, les actions « onduloscatoires » créent un effet de pompe (« undulating pump » (Müller et al., 1997) ou « suction effect » (Shouveiler et al., 2005) sur la surface du corps ayant pour effet d'accélérer les masses d'eau de moindre pression de l'avant vers l'arrière. L'exercice de cet effet de pompe n'est possible que si et seulement si : d'une part, l'animal est suffisamment immergé, afin que l'eau puisse être

dépressurisée d'un côté du corps et pressurisée de l'autre et, d'autre part, si ce dernier possède déjà une vitesse initiale pour que le fluide dépressurisé s'écoule le long du corps vers l'arrière. Autrement dit, l'effet de succion ne se fait qu'à une valeur de Reynolds élevé : $Re=LU/v$, où L est la longueur de l'animal, U sa vitesse et v la viscosité du milieu d'accomplissement divisée par sa densité. C'est la raison pour laquelle, contrairement aux idées reçues, en recherche de vitesse les poissons et les mammifères marins n'essayent pas d'échapper aux résistances aquatiques en procédant à des sauts hors de l'eau : ils s'immergent davantage (Lighthill, 1969). Les bonds en dehors de l'eau ont d'autres finalités : échapper au contrôle de prédateurs, respirer ou communiquer. Les démarrages depuis la vitesse 0 se font par brutal changement de direction ou par usage des nageoires pectorales (Lighthill, 1975) recourant un instant aux forces de traînée propulsive. L'effet de pompe est prolongé par un fouetté de la partie arrière (nageoire caudale chez les poissons et mammifères marins) générant du vortex. Tous 2 – suction effect et vortex de Von Karman (Perelli et al., 2013) – participent des forces de portance propulsive.

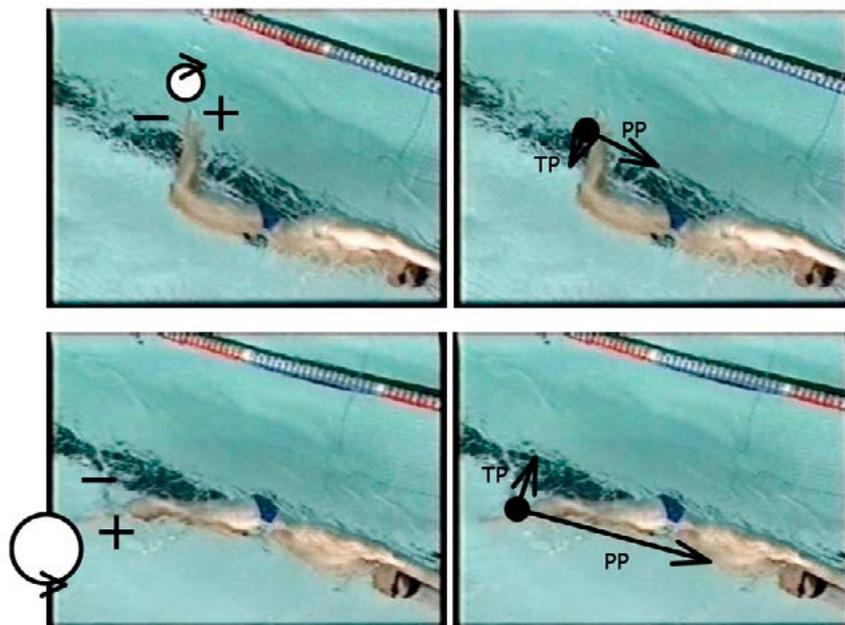


Fig 2. Phase extrême de l'oscillation des jambes et forces générées. Ici la légende du crawl : Alexander Popov, à l'entraînement. La création des forces de traînée propulsive (TP) se fait par réaction opposée à l'action des jambes : orientées perpendiculairement au déplacement, elles tendent à s'annuler en s'additionnant. Les forces de portance propulsive (PP) s'exercent toujours à 90° des forces de traînée ; dirigées vers l'avant, elles sont – dans cette illustration d'entraînement où le tronc reste fixe – essentiellement générées par la création de vortex suivant le fouetté des pieds. Du fait du blocage de l'articulation du genou, la phase d'extension des jambes est toujours plus propulsive que la phase de flexion (adapté de Sfakiotakis et al., 1999).

Le nageur est tout à fait capable de s'exercer à la propulsion par portance (Fig 2) ce que les spécialistes nomment désormais les Underwater Dolphin Kicks (Averianova, Nikodelis, Konstantakos, Kollias, 2016; Atkison, Dickey, Dragunas & Nolte, 2014; Choi, 2015; Connaboy et al., 2015; Hillmeyer, 2015; Martin, 2015; Wei, Mark & Hutchison, 2014). Son anatomie ne lui permet pas d'onduler de tout son corps aussi bien qu'une anguille. Sa relative rigidité du tronc le cantonne davantage à recourir aux oscillations des jambes-pieds (Gatta et al., 2012), déclenchées par l'ondulation du bassin (Arellano et al., 2002; Colobert, et al., 2004). À l'instar des autres mammifères marins, les éthologues le classeraient dans la catégorie des espèces « carangiform » (pour carangue, une espèce de poisson) ou « thunniform » (pour thon) possédant de 1/2 à 3/4 du corps relativement rigide (Lindsey, 1978). C'est précisément la forme offrant le potentiel de vitesse le plus élevé (Guillaume et al., 2003; Lighthill, 1960; Von Loebbecke et al., 2009).

Fort de ces constats, on peut légitimement s'interroger : que se passerait-il si des nageurs étaient forcés à se propulser en s'immergeant plus qu'ils n'ont l'habitude le faire ? À recourir au mode de propulsion par portance ? La politique de la Fédération Internationale de Natation (FINA) est plutôt de limiter les coulées (15m après chaque départ et chaque virage en Free style, Backstroke et Butterfly) et de ce fait, les entraîneurs et professeurs d'Éducation physique ont tendance à les considérer comme un élément annexe de la propulsion. Mais que se passerait-il si on les incitait ? La question ne se pose pas pour les épreuves de 1/2 fond (400m, 800m, 1500m), les capacités d'apnées dynamiques des nageurs étant trop limitées (Zamparo et al., 2005) et la gestion du potentiel énergétique trop importante (Figueiredo et al., 2013). Mais sur de courtes distances ? Les nageurs iraient-ils plus vite sous l'eau – sans entraînement préalable ? C'est l'hypothèse que nous allons tester en soumettant des nageurs non experts au jeu du Minimax.

Méthodes

Soixante sept étudiants sportifs de sexe masculin sont recrutés au sein d'une Faculté des sciences du sport (UFR STAPS, Université de Picardie Jules Verne, France). Leur niveau en natation est hétérogène (ils font de 1 à 2 minutes au 100m Nage libre) mais ils sont tous capables de réaliser un 100m 4 nages dans le respect réglementaire.

Lors d'une première séance, nous leur demandons de réaliser la meilleure performance possible dans cette épreuve en petit bassin (25m). Les étudiants savent qu'ils seront notés sur cette prestation selon un barème établi. À leur insu, une vingtaine d'étudiants d'une autre promotion, assis dans les gradins, décomptent leurs nombres de coups de bras en surface (ArmSurface). De type « recherche observationnelle » l'investigation ne nécessite pas d'autorisation spéciale. Les étudiants sont assurés par leur mutuelle, obligatoire pour s'inscrire dans une Université française. L'expérience fait partie d'un cycle de cours.

Lors d'une séance suivante, dans la même piscine, nous proposons aux 67 étudiants de participer à l'évaluation de leur Minimax. Il ne s'agit pas du « minimax » au sens de la théorie de jeux (Shubik, 1982) mais de la recherche du « minimum » de coups de bras en surface pour réaliser ce 100m 4 nages, avec le « maximum » de vitesse. Toutes les règles édictées par la FINA devant être respectées. Inévitablement, les déplacements sous-marins pour les 4 nages et les ondulations en papillon, dos, et crawl en particulier sont ainsi privilégiés (15m d'immersion autorisés par bassin de 25m en papillon, dos et crawl : soit 60% de la distance nagée ; en brasse, un mouvement de bras jusqu'aux cuisses, une ondulation et une action de ciseaux de jambes sont permis : soit de 6 à 13m immergés après le virage).

Cette épreuve est également prise en compte dans l'évaluation finale des étudiants sportifs : ceci garantit l'implication des nageurs. Pour chacun, la note est obtenue en additionnant la performance (en secondes) au nombre de coups de bras réalisés en surface. Plus le chiffre total obtenu est petit, meilleure sera la note. Le barème est confectionné à partir d'observations empiriques préalables des nageurs d'une autre promotion (pour fixer la moyenne et l'étendue) ainsi que des meilleures prestations mondiales en petit bassin (pour fixer le 20/20, Table 1). Ces considérations nous amènent à différencier le barème selon la taille (donc l'envergure) des nageurs (Pelayo et al., 1996; Sidney, 1996; Smith, 1978).

Table 1. Barème du Minimax valorisant les ondulations et la recherche de vitesse sur un 100m 4 nages. Le test du Minimax consiste à additionner le temps (en secondes) réalisé lors du 100 m et le nombre de coups de bras en surface dans les 4 nages (papillon, dos, brasse, crawl). Le barème tient compte de la taille. Il est réservé aux nageurs de sexe masculin. Par exemple, un garçon de plus d'1,85 m réalise 75 secondes et 50 coups de bras en surface. Son Minimax est de $75+50=125$; sa note est de 16/20.

Une fois les deux épreuves passées, nous pouvons comparer les performances réalisées lorsque les nageurs cherchent à aller librement le plus vite possible sur un 100m 4 nages et lorsqu'ils sont obligés, sur cette même distance, de privilégier les actions sous-marines et notamment les ondulations (Underwater Dolphin Kicks). On peut ainsi voir, selon le niveau d'expertise, l'efficacité des mécanismes de portance propulsive.

Note /20 Garçons*	Taille $\geq 1,85m$	$+1,85m > T \geq 1,75m$	$+1,75m > T \geq 1,65m$	Taille $< +1,65m$
20	105	110	115	120
19	110	115	120	125
18	115	120	125	130
17	120	125	130	135
16	125	130	135	140
15	130	135	140	145
14	135	140	145	150
13	140	145	150	155
12	145	150	155	160
11	150	155	160	165
10	155	160	165	170
09	160	165	170	175
08	165	170	175	180
07	170	175	180	185
06	175	180	185	190
05	180	185	190	195
04	185	190	195	200
03	190	195	200	205
02	195	200	205	210
01	200	205	210	215
00	>200	>205	>210	>215

* pour les filles, il y aurait lieu d'ajouter +10 à chaque nombre.

Les variables pour expliquer la vitesse de nage (codage : '<80sec' au 100m 4 nages signifiant 'rapide') seront : (i) la distance totale d'immersion (codage : 'underwater<20m', pour retour rapide en surface ; 'underwater>20m', pour valorisation des coulées), (ii) également consécutif du Minimax, le nombre de coups de bras en surface (codé : 'numbArmSurface<50', pour moins de 50 mouvements en surface pour parcourir le 100m ; '50<numbAS<70', pour nombre de mouvements de surface compris entre 50 et 70 inclus ; 'numbArmSurface>70', pour un nombre de coups de bras en surface strictement supérieur à 70), (iii) et enfin l'envergure de bras des nageurs (codée : 'size>1,85m', pour strictement plus d'1,85 mètres, '1,75<size<1,85', pour une envergure comprise entre ces deux mesures en mètres, et 'size<1,75m' pour les nageurs de petite taille dont l'envergure n'excède pas 1,75 mètres). Ces variables seront testées par régression logistique à l'aide du logiciel Tri2 développé par Cibois (2017).

Résultats

Tous les nageurs réussissent à effectuer moins de coups de bras en surface lors du test de Minimax. La moyenne est alors de 57,4 contre 74,1 lorsque les sportifs cherchent à nager librement le plus vite possible. Les écarts-types sont respectivement de 6,51 et 9,22, signes d'une hétérogénéité de niveau technique. La corrélation de rang entre les 67 performances en 4 nages sans contrainte et les 67 performances en minimax est significative et positive avec K (de Kendall)=+0,63, p<0,01, ce qui signifie que le niveau en nage valorisant les Underwater Dolphin Kicks est proportionnel au niveau de nage classique : les nageurs les plus rapides sur le 100m 4 nages libres le sont aussi à l'épreuve du minimax.

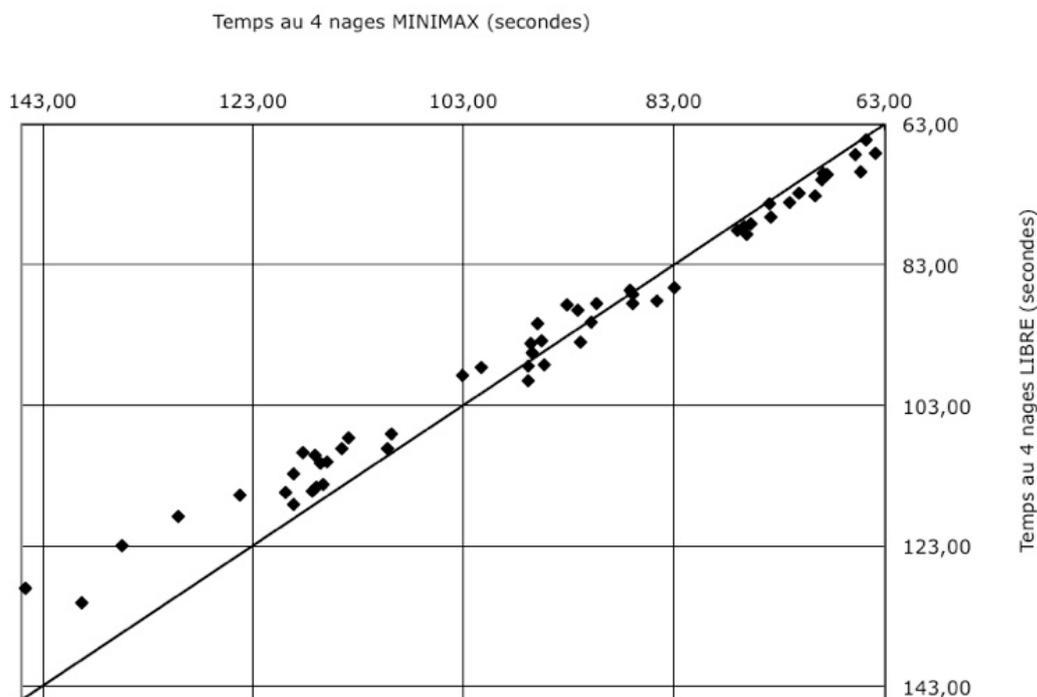


Fig 3. Croisement des performances des 67 nageurs au 4N en Minimax (ligne) et au 4N sans contrainte (colonne). Chaque point correspond à un nageur. La bissectrice sépare les nageurs selon qu'ils vont plus vite au 100m 4 nages sans contrainte (points au dessus) ou plus vite au 100m 4 nages en minimax (points en dessous). On remarque que les meilleurs temps (en haut et à droite) sont en faveur des nageurs allant plus vite au Minimax. À l'inverse, les nageurs les plus lents (en bas à gauche) vont plus vite avec le 4 nages sans contrainte. Au centre, les nageurs moyens se répartissent de part et d'autre de la bissectrice.

Le croisement des résultats entre les deux épreuves (Fig 3) révèle la présence de 2 sous-groupes distincts

— Les 29 nageurs plus rapides en Minimax (Ti=78,3 sec, SD=9,9) qu'en épreuve libre nagée le plus vite possible (Ti=80,28 sec, SD=9,84). Les différences entre les deux épreuves sont significatives au test de Student-Fisher (t=9,1) à p<0,01.

— Représenté par les 38 autres nageurs, le deuxième sous-groupe se définit par le fait qu'il nage moins vite en Minimax (Ti=109,9 sec, SD=14,6) qu'en épreuve libre (Ti=105,21 sec, SD=12,1) et significativement moins vite dans les deux épreuves que le sous-groupe 1 (t=6,23, p<0,01). Pour le sous-groupe 2, les différences entre les deux épreuves sont significatives (t=8,1) à p<0,01.

Afin de voir si la vitesse de nage est indexée à la valorisation des coulées et non, par effet de chaînage, à d'autres variables : comme l'envergure ou l'amplitude de coups de bras, on procède à une régression logistique pour l'épreuve du Minimax.

Soit la modalité à expliquer

<80sec (réalisation du 100m 4 nages en moins de 80 secondes, soit une bonne vitesse de nage pour ces nageurs polyvalents). Prenons une situation de référence : nageurs de moins d'1,75 d'envergure (size<1,75m), effectuant entre 50 et 70 coups de bras en surface durant leur épreuve de Minimax (50<numbAS<70, soit une fréquence dans la moyenne) et restant immergés moins de 20 mètres au total des 3 virages et du départ plongé (underwater<20m, soit moins de 5 mètres par virage, c'est-à-dire : ne valorisant pas les coulées) (Table 2). La proportion estimée est de 20,7% de l'effectif. Pour chacune des autres modalités, on calcule les effets marginaux toutes choses égales par ailleurs. Le fait d'être grand (size>185m) agit sur la vitesse de nage (+20,3%) mais de façon non significative. Il en va de même pour l'amplitude de nage – dont l'augmentation (numbArmSurface<50) est faiblement corrélée à la vitesse (+7,5%). Seule, la longueur des coulées (underwater>20m) est annexée significativement à la variable expliquée (<80sec) avec un effet marginal de +24,8% à p<0,01. Ce n'est pas du fait de leur envergure et de leur amplitude de nage que les nageurs non experts réalisent de meilleures performances en 100m 4nages, mais bien parce qu'ils restent plus longtemps sous l'eau. Cela dit, en l'état de la recherche, il n'est pas possible de dire si cette corrélation relève d'une causation.

Table 2.

Régression logistique destinée à repérer les facteurs explicatifs de la modalité <80sec (temps rapide pour parcourir le 100m 4 nages). L'envergure (ENV) et le nombre de cycles de bras en surface (BRA) sont sans effet sur la vitesse élevée de nage. Par contre, le fait de rester immerger longtemps (underwater>20m) est lié aux meilleures performances.

Edité par Tri ²				
Base :	SwimMinimax			
Type de modèle :	Régression Logistique			
modalité à expliquer :	<80sec	Coefficient	Chances ref.	
Situation de référence :	size<1,75m + 50<numbAS<70 + underwater<20m	-1.5751	0.2070	
Variables explicatives				
	Intitulé	Coefficient	odds ratio	Effet marginal
ENV -	size>1,85m	1.0612	2.89	20,30% ns
	1,75<size<1,85	0.0964	1.10	1,40% ns
	size<1,75m	ref.	ref.	ref.
BRA -	numbArmSurface<50	0.4561	1.58	7,50% ns
	50<numbAS<70	ref.	ref.	ref.
	numbArmSurface>70	0.2280	1.26	3,50% ns
COU -	underwater>20m	1.2507	3.49	24,80% ***
	underwater<20m	ref.	ref.	ref.

Discussion et conclusion

Le fait qu'une partie (29/67) des nageurs aille plus vite avec la consigne du Minimax qu'en épreuve libre ne laisse pas de surprendre. Lors du premier 100m 4nages libre, les étudiants cherchaient à maximiser leur performance en recouvrant plus tôt la surface, convaincu qu'ils tiraient avantage à se comporter comme cela. À leur corps défendant, ils se passaient d'une technique propice à la vitesse (Collard et al., 2013). «Le problème de la technique n'est pas un problème technique » soulignait Parlebas (1984, p. 20). Le problème de la technique est lié aux représentations vécues que les nageurs ont de leur corps et de ses possibilités dynamiques d'intervention. Les techniques de nage ne sont pas naturelles mais culturelles (Mauss, 1936). Ce sont des choix de société : des tactiques du corps (Parlebas, 1999). Des choix guidés par des représentations, comme la peur de la noyade, très présente en Occident depuis le Moyen-Âge (Chauvaud, 2007).

Habités à s'entraîner en surface, ils ont façonné un schéma corporel ajusté aux déplacements permettant d'assurer les échanges respiratoires sur de longues distances. La natation, comme toute technique du corps, est un système de montage artificiel façonnant la personnalité des exécutants en profondeur dans une direction donnée. À la différence des autres animaux, l'homme invente de toutes pièces ses techniques. La transmission culturelle est analogue à la transmission génétique en ce sens que tout en étant fondamentalement conservatrice, elle tend à subir des mutations. Il se peut que de nouvelles techniques d'immersion soient les nouveaux mutants de la natation. Mais cette nouvelle tactique du corps reste subordonnée aux capacités d'apnée dynamique des nageurs.

Au-delà des problèmes de représentations du corps, la surprise des résultats vient aussi du fait que les 29 nageurs ayant amélioré leur performance en valorisant les coulées n'ont eu aucun entraînement en la matière. C'est dire le potentiel de cette Cinquième nage (Collard, 2009). Cela dit, les progrès affectent les meilleurs des nageurs étudiés. Dans notre pool de sportifs, les nageurs de moindre niveau ne tirent pas bénéfice des coulées. De même, facteurs déterminants dans les performances de haut niveau (Pelayo et al., 1996; Sidney, 1996 ; Smith, 1978), l'envergure de bras et l'amplitude de nage sont sans effet sur la vitesse de nage de notre pool d'étudiants sportifs.

Les procédés visant à améliorer cette cinquième technique de nage méritent d'être valorisés pour l'entraînement. Le jeu du Minimax est une façon pédagogique de forcer à rester plus longtemps immergé tout en recherchant la vitesse de nage. La présente recherche montre qu'il peut être bénéfique à des nageurs de niveau moyen cherchant à maximiser les mécanismes de portance propulsive.

Références

- Arellano, R., Pardillo, S., & Gavilán, A. (2002). Underwater undulatory swimming: Kinematic characteristics, vortex generation and application during the start, turn and swimming strokes. In Proceedings of the XXth International Symposium on Biomechanics in Sports, Universidad de Granada.
- Atkison, R. R., Dickey, J. P., Dragunas, A., & Nolte, V. (2014). Importance of sagittal kick symmetry for underwater dolphin kick performance. *Human movement science*, 33, 298-311.
- Averianova, A., Nikodelis, T., Konstantakos, V., & Kollias, I. (2016). Rotational kinematics of pelvis and upper trunk at butterfly stroke: Can fins affect the dynamics of the system?. *Journal of Biomechanics*.
- Brown, R.M., Counsilman, J.E. (1971). The role of lift in propelling swimmers. In J.M. Cooper (Ed.), *Biomechanics* (pp. 179-188). Chicago: Athletic Institute.
- Cappaert, J. & Rushall, B.S. (1994). *Biomechanical analyses of champion swimmers*, Spring Valley, CA: Sports Sciences Associates.
- Chauvaud, F. (2007). *Corps submergés, corps engloutis: une histoire des noyés et de la noyade de l'Antiquité à nos jours*. Amherst Media, Inc.
- Choi, T. (2015). Learning from the Dolphins: How Anterior Motion Affects the Dolphin Kick. *Bulletin of the American Physical Society*, 60.
- Chollet, D. (2000). *Natation sportive, approche scientifique*. Paris: Vigot.
- Collard, L., Auvray, E., & Bellaunay, I. (2008). Why have swimmers neglected the "fish kick" technique? *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 8(3), 18-26.
- Collard, L. *La cinquième nage. Natation & théorie de l'évolution*. Paris: Atlantica.
- Collard, L., Gourmelin, E., & Schwob, V. (2013). The fifth stroke: the effect of learning the dolphin-kick technique on swimming speed in 22 novice swimmers. *Journal of Swimming Research*, 21(1).
- Colobert, B., Bideau, B., Nicolas, G, Fusco, N. (2004). Théorie des corps allongés pour la nage avec palmes. In Pelayo (Ed), 3ème Journées Spécialisées de Natation (pp. 131-132). Lille : publibook.
- Connaboy, C., Naemi, R., Brown, S., Psycharakis, S., McCabe, C., Coleman, S., & Sanders, R. (2015). The key kinematic determinants of undulatory underwater swimming at maximal velocity. *Journal of Sports Sciences*, 1-8.
- Counsilman, J. E. (1986). *Competitive swimming manuel*. Indiana: Counsilman Co Inc.
- Figueiredo, P., Toussaint, H. M., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2013). Relation between efficiency and energy cost with coordination in aquatic locomotion. *European journal of applied physiology*, 113(3), 651-659.
- Fish, F.E. (1993). Power output and propulsive efficiency of swimming bottlenose dolphins. *J. Exp. Biol.*, 185:179-193.
- Fish, F.E. (1996). Transitions from drag-based to lift-based propulsion in mammalian swimming. *Amer. Zool.*, 36: 628-641.
- Gatta, G., Cortesi, M., & Di Michele, R. (2012). Power production of the lower limbs in flutter-kick swimming. *Sports Biomechanics*, 11(4), 480-491.
- Gray, J. (1936). Studies on animal locomotion. VI. The propulsive powers of the dolphin. *J. Exp Biol. Vol 13*, 192-199.
- Guillaume, J.L., Piat, E. (2003). Conception et modélisation d'un microrobot nageur. *RS-JESA*, vol 37, 1, 31-48.
- Hertel, H. (1966). *Structure, form, movement*. New York: Reinhold.
- Hillmeyer, S. R. (2015). *The Effect of Different Styles of Underwater Kicking on Velocity in Swimming*.
- Holt, L.E. (1989). *Swimming velocity with and without lift forces*. Unpublished paper, Sports Sciences Laboratory, Canada: Dalhousie University.
- Lighthill, M.J. (1960). Note on the swimming of slender fish. *J. Fluid Mech.*, 9: 305-317.
- Lighthill, M.J. (1969). Hydrodynamics of aquatic animal propulsion- a survey. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1: 413-446.
- Lighthill, M.J. (1975). *Mathematical biofluidynamics*. Philadelphia: SIAM.
- Lindsey, C.C. (1978). Form, function and locomotory habits in fish. In W.S. Hoar & D.J. Randall (Eds). *Fish Physiology*, vol VII. Locomotion (pp. 1-100), New York.
- Maglischo, E.W. (1982). *Swimming faster*. Chico : Mayfield Publishing Compagny.

- Martin, J. (2015). Go Fast With The Flow. *Mechanical Engineering*, 137(5), 40.
- Mauss, M. (1936). Les techniques du corps. *Journal de psychologie*, 32(3-4), 365-86.
- Müller, U.K., Van Den Heuvel B. L. E., Stamhuis, E.J., Videler J.J. (1997). Fish foot prints: morphology and energetics of the wake behind continuously swimming mullet. *J. Exp Biol.*, 200: 2893-2906.
- Parlebas, P. (1984). La dissipation sportive, *Culture Technique*, 13, 19-37.
- Parlebas, P. (1999). Les tactiques du corps. In *Approches de la culture matérielle. Corps à corps avec l'objet*. Paris : L'Harmattan, pp. 29-43.
- Pelayo, P., Sidney, M., Kherif, T., Chollet, D., & Tourny, C. (1996). Stroking Characteristics in Freestyle Swimming and Relationships With Anthropometric Characteristics. *Journal of applied biomechanics*, 12(2).
- Perelli, A., Leoncini, D. A., Sandroni, G., Faggioni, O., Zunino, R., & Soldani, M. (2013). Design and performance analysis of the mechanical structure of a piezoelectric generator by Von Karman vortexes for underwater energy harvesting. In *OCEANS-Bergen, 2013 MTS/IEEE* (pp. 1-8). IEEE.
- Sanders, R.H. (1997a). Extending the 'Schleihau' model for estimating forces produced by a swimmer's hand. In B.O. Eriksson & L. Gullstrand (Eds), *Proceedings of the XII FINA World Congress on Sports Medicine* (pp. 421-428). Goteborg, Sweden: Chalmers Reproservice.
- Sanders, R.H. (1997b). Hydrodynamic characteristics of a swimmer's hand with adducted thumb: implications for technique. In B.O. Eriksson & L. Gullstrand (Eds), *Proceedings of the XII FINA World Congress on Sports Medicine* (pp. 429-434). Goteborg, Sweden: Chalmers Reproservice.
- Sanders, R.H. (1998). Lifting Performance in aquatic sports. Keynote address at the XVI International Symposium of Biomechanics in Sports, Konstanz, Germany, 21-25/07.
- Schleihau, R.E. (1978). *Swimming propulsion: a hydrodynamic analysis*, Fort Lauderdale, Floride : American Swimming Coaches Association.
- Schouveiler, L., Hover, F.S., Triantafyllou, M.S. (2005). Performance of flapping foil propulsion. *J. Fluids Struct.*, 20: 949-959.
- Sfakiotakis, M., Lane, D.M, Davies, B. (1999). Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE, J. Oceanic Engineering*, vol 24, 2, 237-252.
- Shubik, M. 1982, *Game Theory in the Social Sciences*, Massachusetts Institute of Technology, The MIT press.
- Sidney, M. (1996). Tethered forces in crawl stroke and their relationship to antropometric characteristics and sprint swimming performance, *Journal of human movement studies*, 31.
- Smith, L. (1978). Anthropometric measurements, and arm and leg speed performance of male and female swimmers as predictor of swim speed, *Journal of sports medicine and physical fitness*, 18.
- Sprigings, E. J. & Koehler, J.A. (1990). The choice between Bernoulli's or Newton's model in predicting dynamic lift, *International Journal of Sport Biomechanics*, 6, 235-245.
- Troup, J.P. (1992). *International Center for Aquatic Research Annual: studies by the International Center for Aquatic Research 1991-92*, Colorado Springs, CO: United States Swimming Press.
- Vennell R., Pease D., Wilson, B. (2006). Wave drag on human swimmers. *J Biomech.* 39(4): 664-671.
- Webb, P.W. (1975). Hydrodynamics and energetics of fish propulsion. *Bull Fish Res Bd Can.*, 190: 149-158.
- Wei, T., Mark, R., & Hutchison, S. (2014). The fluid dynamics of competitive swimming. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46, 547-565.
- Von Loebbecke, A., Mittal, R., Fish, F., & Mark, R. (2009). Propulsive efficiency of the underwater dolphin kick in humans. *Journal of biomechanical engineering*, 131(5), 54504.
- Williams, T.M., Friedl, W.A., Fong, M.L., Yamada, R.M. (1992). Travel at low energetic cost by swimming and wave-riding bottlenose dolphins. *Nature*, 355: 821-823.
- Wood, T.C. & Holt, L.E. (1979). *A fluid dynamic analysis of the propulsive potential of the hand and forearm in swimming*, in *Swimming III*, Baltimore, MD: University Park Press.
- Zamparo, P., Bonifazi, M., Faina M., Milan A. (2005). Energy cost of swimming of elite long distance swimmers. *Eur J Appl Physiol.*, 94(5-6): 697-704.