



Modifications biomécaniques, musculaires et cognitives induites par un programme d'apprentissage de huit semaines des ondulations sous-marines chez des nageurs adolescents bien entraînés

Marc Elipot, Philippe Hellard, Frédéric Puel, Julien Morlier, Jean René Cazalets

► To cite this version:

Marc Elipot, Philippe Hellard, Frédéric Puel, Julien Morlier, Jean René Cazalets. Modifications biomécaniques, musculaires et cognitives induites par un programme d'apprentissage de huit semaines des ondulations sous-marines chez des nageurs adolescents bien entraînés. 5èmes Journées Spécialisées de Natation, Faculté des Sciences du Sport et de l'EP, Lille 2, May 2014, Lille, France. hal-04437359

HAL Id: hal-04437359

<https://hal.science/hal-04437359>

Submitted on 4 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modifications biomécaniques, musculaires et cognitives induites par un programme d'apprentissage de huit semaines des ondulations sous-marines chez des nageurs adolescents bien entraînés.

Elipot, M^a., Hellard, P^{c,d}., Puel, F^e., Morlier, J^b., Cazalets, JR^b.

^a Univ. Paris Descartes Paris V..

^b Univ. Bordeaux, INCIA, UMR CNRS 5287, Bordeaux, France.

^c Fédération Française de Natation (FFN), Pantin, France.

^d Institut de Recherche bioMédicale et d'Épidémiologie du Sport (IRMES), Paris, France.

^e Faculté des sciences du sport, Université de Rouen, CETAPS, Upres EA 3832, Mont Saint-Aignan, France.

Introduction

L'analyse de la distribution temporelle des différentes phases des courses a montré que le départ pouvait représenter jusqu'à 26% de la totalité du temps total de l'épreuve (Cossor et Mason, 2001) et les virages jusqu'à 40% (Lyttle et al., 2005 ; Thayer et Hay, 1984 ; Blanksby et al., 1998). L'analyse de ces phases de la course au cours des Jeux Olympiques d'Athènes a montré que 0,11 s séparait les médaillés olympiques des non médaillés alors que 0,1 s les séparait déjà à la fin de la phase sous-marine des départs. L'acquisition et l'amélioration des ondulations sous-marines qui composent la plus grande partie de ces phases des départs et des virages constitue par conséquent une dimension majeure d'un entraînement de haut niveau. Représenter de façon schématique, l'activité motrice des nageurs lors de la réalisation de mouvements ondulatoires sous-marins peut être représentée par deux composantes distinctes et en interaction réciproque. La première composante est une composante locomotrice impliquant les membres inférieurs du corps du nageur (cuisses, jambes et pieds). Cette composante a pour objectif la production de forces de propulsion à partir de la réalisation des mouvements ondulatoires. La seconde composante du mouvement serait alors une composante posturale. Elle regroupe les actions de membres supérieurs et aurait pour objectif principal la réduction des résistances hydrodynamiques ainsi que le transfert des forces propulsives créées par la composante locomotrice. Les recherches sur l'analyse des résistances hydrodynamiques agissant sur le nageur lors de la phase sous-marines (Lyttle et al., 1998 ; Maiello et al., 1998 ; Lyttle et al., 2000 ; Benjanuvatra et al., 2012 ; Toussaint et al., 2002 ; Baly, 2003 ; Vennel et al., 2006 ; Marinho, 2009a, b ; Marinho, 2010 ; Costa, 2010) ont distingué, quatre principaux facteurs d'influence, la vitesse de déplacement des nageurs, la rugosité de la surface de contact entre le nageur et l'eau, la profondeur de déplacement du nageur, la position et l'orientation de chacun des segments du corps du nageur. Les travaux les plus récents (Lyttle et al., 1998, Vennel et al., 2006 ; Marinho et al., 2010) utilisant les techniques de modélisation numérique de la dynamique des fluides ont mis en évidence que les forces de traînées appliquées à un corps placé en extension totale (bras au-dessus des épaules) et se déplaçant à une vitesse de 2,5 m.s⁻¹ sont deux fois plus faibles lorsque ce corps était immergé à 3 mètres de profondeur que lorsqu'il se situait à 1 mètre de profondeur. Pour ce qui concerne l'optimisation posturale permettant de réduire les résistances hydrodynamiques Marinho et al., 2009a, b ont montré que les résistances hydrodynamiques et les coefficients de traînée étaient significativement

plus faibles lorsque les nageurs adoptaient et maintenaient une posture au cours de laquelle les bras étaient placés en extension totale au-dessus des épaules. Pease et Vennel (2010) ont aussi montré que la diminution de l'angle d'attaque du segment tronc bras (correspondant à l'angle formé entre ces segments et le vecteur vitesse lié au déplacement relatif du corps dans le fluide) était associé à la diminution des résistances hydrodynamiques à l'avancement.

Les ondulations sous-marines d'un nageur ont été assimilées aux mouvements propulsifs d'espèces de poissons carangiformes ou aux mouvements de surfaces oscillantes (Ungerechts et al., 1998 ; Triantafyllou et al., 2000 ; Arellano et al., 2002, 2008). Le déplacement sous-marin observé chez différentes espèces est le plus souvent accompli par l'intermédiaire d'une série de mouvements ondulatoires impliquant la sollicitation de tout ou partie du corps de l'individu. Ces mouvements engendrent une propulsion vers l'avant grâce à un mécanisme de transfert de moment depuis le corps de l'individu vers le fluide l'entourant (McHenry et al., 1995). Lors d'un déplacement dans un fluide, la propulsion relative au mouvement d'une surface oscillante est permise grâce à la séparation périodique de structures formant des vortex (Guglielmini et al., 2004). La production des forces de poussée et l'efficacité de propulsion sont essentiellement dépendantes de la nature de la suite de vortex créée par le mouvement oscillant de la surface propulsive (vortex de Karman réguliers résistifs versus vortex de Karman inversés propulsifs). La nature de cette suite est fonction de l'angle d'attaque de la surface propulsive, du nombre de Strouhal et de la relation existant entre les mouvements de pilonnement et de tangage responsables de l'oscillation de la surface propulsive (Triantafyllou et al., 1991 ; Anderson et al., 1998 ; Fish et Rohr, 1999 ; Triantafyllou et al., 2002 ; Read et al., 2003 ; Guglielmini et al., 2004 ; Hover et al., 2004 ; Schouveiler et al., 2005 ; Connaboy et al., 2009).

Les théories cognitives du contrôle et de l'apprentissage moteur proposent un modèle du contrôle du mouvement volontaire qui s'étage à trois niveaux, le système nerveux central, le système nerveux périphérique et les effecteurs musculaires. Face au problème évident que causerait l'obligation de commander et de contrôler individuellement l'ensemble des muscles impliqués dans la production d'un mouvement, ces théories postulent que le cerveau adopte et met le plus souvent en place des modes de coordinations articulaires et musculaires sous la forme de synergies (Bernstein, 1967 ; Latash, 2008). Le cerveau va alors contrôler collectivement les différents éléments grâce à l'envoi d'une commande motrice unique.

La démonstration explicite et la modélisation réfèrent à au cadre théorique de l'apprentissage socio-cognitif par observation (ASCO) (Bandura, 1986). Selon cette perspective cognitive, quatre processus président à la construction d'un modèle interne. Il s'agit des processus attentionnels (sélectionner les indices pertinents), des processus mnésiques (memoriser les comportements observés), de reproduction motrice (traduire les représentations en action) et des processus de motivation (directs, vicariants, sentiment d'efficacité personnelle). Le courant des théories dynamiques du contrôle moteur bien que reconnaissant le pilotage cognitif des activités sensori-motrices minore l'importance des représentations conscientes surtout pour les activités à fortes contraintes énergétiques et neuro-musculaires (Zanone et Kelso, 1992 ; Vereijken et Bongaardt, 1998 ; Delignières, 2004). Dans le cadre de l'approche

dynamique, le comportement moteur serait plutôt représenté comme un système complexe qui confronté à un ensemble de contraintes internes (articulaires, squelettiques, neuromusculaires, cognitives) et externes (constituées par les propriétés du milieu) favoriserait l'émergence de patterns techniques préférentiels. Mc Cullagh Weiss et Ross (1989) ont développé une approche intégratrice de l'ASCO pour l'acquisition des habiletés motrices. Ces auteurs ont mis en évidence des axes de réflexion intégrant la perspective développementale de Yando, Seitz et Zigler (1978), la perspective écologique, la problématique de la répétition mentale, et le rôle des feedback.

Il n'existe pas de travaux qui ont analysé la dynamique d'apprentissage des ondulations sous-marines selon une perspective d'une approche intégrée de l'apprentissage à long terme. L'objectif de ce travail a été d'analyser chez 8 nageurs adolescents bien entraînés les modifications biomécaniques, neuro motrices et cognitives induites par un programme d'apprentissage spécifique de 8 semaines.

Méthode

Huit nageurs Français (13-15 ans) bien entraînés (10-12 heures/sem) ont participé à cette étude. Le programme d'apprentissage des ondulations sous-marines a été réalisé pendant 8 semaines, 3 fois par semaine (selon une durée de 30 minutes par session). Le programme était composé de quatre types de situations d'apprentissage inspirées de la perspective développementale de Yando, Seitz et Zigler (une orientation de l'action à partir de l'explicitation du modèle optimal de la tâche à réaliser, l'acquisition d'habiletés sensori-motrices et énergétiques à partir de situations d'entraînement à sec et dans l'eau, une régulation des actions à partir de retours d'informations immédiats visuels et cinématiques, des exercices statiques et dynamiques de contrôle postural et moteur et enfin une manipulation des contraintes des tâches à réaliser). Six caméras de type mini-DV (576×720) ont été placées sous l'eau de façon à enregistrer une zone allant du 5^{ème} mètre de la piscine jusqu'au 15^{ème} mètre. Le placement de caméra permettait de visualiser de façon continue une série de marqueurs placés sur un des côtés du nageur. Ces marqueurs étaient collés au niveau des principales articulations, à savoir, l'extrémité des doigts, le poignet, le coude, l'épaule, la tête, la hanche, le genou, la cheville et l'extrémité des orteils (figure 2). Ces marqueurs ont été suivis manuellement sur les images vidéo et leurs positions exprimées sous la forme de coordonnées pixels.

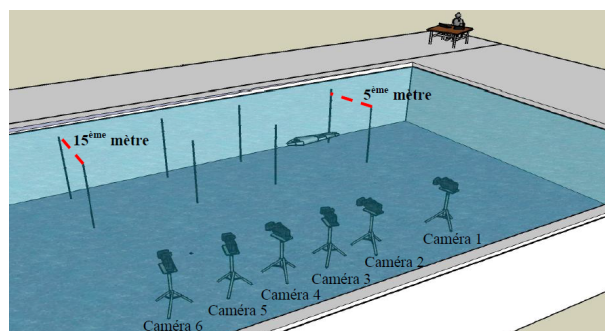


Figure 1: Représentation du protocole d'expérimentation.

Seize mires de calibration montées sur 4 barres distinctes ont été placées dans chacune des zones de calibration de façon à former une structure de calibration rectangulaire et recouvrant l'intégralité du volume de la zone concernée. Les images filmées ont été déramées. Les trames paires et impaires ont été conservées pour l'analyse. La fréquence d'échantillonnage des données obtenues étaient alors de 50 Hz. L'ensemble des repères anatomiques sélectionnés pour cette étude ont été suivis manuellement image par image. De façon à minimiser les erreurs d'identification durant cette étape, les deux côtés du nageur ont été considérés comme étant symétriques et seuls les marqueurs fixés sur le côté droit ont été suivis. Une interface spécialement créée à cet usage à partir du logiciel Matlab (The Mathworks Inc.) a été utilisée pour réaliser ce suivi. Neuf repères anatomiques ont été identifiés sur les sujets : l'extrémité des orteils, la malléole externe, le centre du genou, la crête de l'épine iliaque, l'acromion, l'extrémité des doigts, le centre du poignet, le centre du coude et enfin le centre de la tête. Une méthode de calibration et de reconstruction a été spécifiquement développée pour cette étude (Elipot et al., 2010). L'espace filmé a été calibré à partir d'un algorithme de calibration 3D inspiré de la méthode DLT (Abdel-Aziz et Karara, 1971). La précision de la calibration a été estimée sous la forme du calcul de l'erreur de reconstruction (Kwon et Fiaud, 2002). Ces erreurs moyennes étaient respectivement de 0,8 cm et 0,76 cm pour les évaluations pre-test et post-test (erreurs maximales : 1,3 et 1,27 cm). Les paramètres de calibration obtenus, les coordonnées pixels des marqueurs ont pu être transformées en coordonnées métriques. La position du centre de masse a été calculée à partir des coordonnées métriques des points indiqués ci-dessus et des tables anthropométriques de Dempster (Dempster, 1959).

Les données obtenues ont alors été filtrées par un filtre butterworth (fréquences de coupure incluses entre 3 et 6 Hz). Les vitesses articulaires et du centre de masse ainsi que les angulations articulaires ont été calculées. Les angles d'attaque de la main, de l'avant-bras, du bras, du tronc, de la cuisse, de la jambe et du pied ont également été identifiés. Il est enfin à noter qu'un cycle ondulatoire débute et s'achève lorsque la cheville atteint son point le plus haut.

Les données EMG ont été obtenues grâce à l'utilisation d'électrodes de surface tripolaire (diamètre : 10 mm ; distance inter-électrode : 10 mm) connectées au système d'acquisition EMG sans fil KineMyo (Kine ehf inc.). L'activité des muscles gastrocnémien, rectus femoris, biceps fémoral, du grand fessier, et l'erector spinae au niveau de la vertèbre lombaire T3. Les signaux EMG obtenus ont alors été rectifiés et filtrés par un filtre butterworth à 5 Hz. Les enveloppes des signaux EMG ont alors pu être calculées. Les signaux EMG ont été synchronisés aux données cinématiques et découpés pour chaque cycle ondulatoire. L'aire sous la courbe (intégrale) a été calculée pour chaque contraction. Finalement la durée des contractions, le délai entre le début du cycle ondulatoire et le début de la contraction ainsi que le délai entre le début du cycle ondulatoire et le pic de contraction le plus important ont été estimés.

Des entretiens d'auto-confrontation ont été organisés immédiatement après chaque série de deux essais selon les principes généraux de cette méthode dans le cadre du programme du cours d'action (Theureau, 2006). Chaque nageur a été individuellement confronté à l'enregistrement

audiovisuel de l'essai et incité à « se remettre dans l'essai » afin de décrire et commenter chronologiquement et de façon détaillée son expérience au cours de son déroulement. Deux chercheurs ont conduit séparément mais simultanément les entretiens. Chacun a aidé le nageur à préciser l'explicitation et la description de son expérience à chaque instant de l'essai grâce à des relances portant sur ses sensations (e.g., qu'est-ce que tu sentais juste à ce moment), ses perceptions (e.g., qu'est-ce que tu percevais juste à ce moment), ses focalisations (e.g., qu'est-ce que tu cherchais à faire), ses pensées et ses interprétations.

Résultats

Les analyses cinématiques ont montré que tous les nageurs avaient amélioré leurs vitesses après le programme d'entraînement de 8 semaines. Le ratio amplitude/fréquence a été modifié pour les nageurs caractérisés initialement par les plus faibles valeurs de fréquences. Pour ces nageurs l'amplitude de l'ondulation a été diminuée et la fréquence a été augmentée. Pour tous les nageurs les angles d'attaque des membres supérieurs ont diminué et l'efficacité propulsive (interpollée à partir du nombre de Strouhal et des angles d'attaque des membres inférieurs) a été améliorée. Les analyses des coordinations motrices ont montré que pour 6 nageurs une synergie spécifique a été créée ou renforcée afin de contrôler les membres supérieurs. De plus 5 nageurs ont montré une organisation motrice nouvelle et plus complexe afin de contrôler les membres supérieurs. Tous les nageurs ont aussi développé une nouvelle coordination contrôlant conjointement les hanches et les épaules.

Les patterns de contractions musculaires ont été profondément modifiés. D'une part, la durée de contraction des muscles des membres inférieurs a été réduite alors que la durée de contraction des muscles lombaires est demeurée identique. D'autre part, la quantité totale de contraction a été augmentée pour les muscles des membres inférieurs (contractions plus toniques) et réduite pour les muscles lombaires (contractions plus phasiques). De plus les pics de contraction de chaque muscle ont été resynchronisés.

Les discours des nageurs aux entretiens d'auto-confrontation ont été catégorisés en 3 catégories principales puis en sous catégories. L'évolution de l'analyse du cours d'action est montrée sur la figure 2.

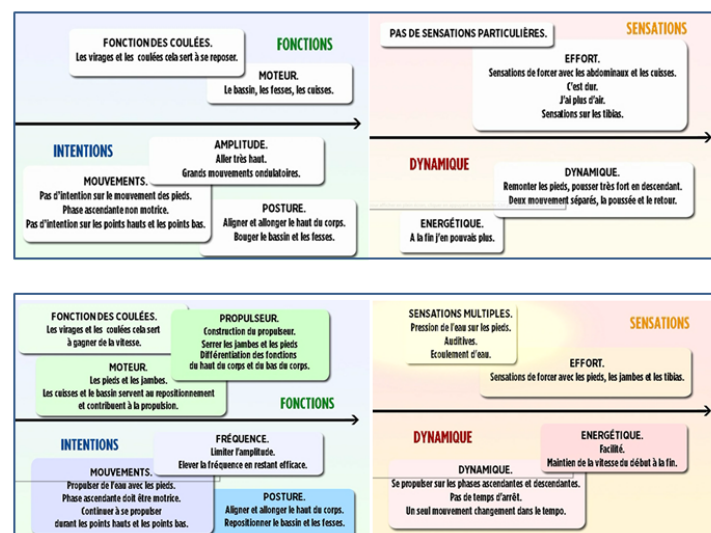


Figure 2: Analyse du discours des nageurs avant (rectangle du haut) et après (rectangle du bas) la période d'apprentissage.

Il apparaît qu'un programme d'entraînement des ondulations sous-marines de 3 séances de 45 minutes par semaine durant une période de 8 semaines conduit selon une approche intégrative inspirée de l'apprentissage socio cognitif par observation à induire de profondes transformations biomécaniques, musculaires et cognitives. Durant les 8 semaines les nageurs ont ajusté le ratio amplitude/fréquence des ondulations, ils ont réorganisé leurs coordinations motrices et musculaires et ont transformé leurs représentations, intentions, focalisations et perceptions.

References

- Abdel-Aziz, Y. I., et Karara, H. M. (1971). Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry. In : ASP Symposium on Close Range Photogrammetry (pp. 1-18). Church : Falls.
- Anderson, J. M., Streitlien, K., Barrett, D. S., Triantafyllou, M. S. (1998). Oscillating foils of high propulsive efficiency. *Journal of Fluid Mechanics*, 360, 41-72.
- Arellano, R. (2008). Hydrodynamics of swimming propulsion. In : M. Sidney, F. Potdevin, P. Pelayo (Eds.), *Actes des IVth Journées Spécialisées de Natation* (pp. 21-35). Lille, France : Université de Lille.
- Arellano, R., Pardillo, S., and Gavilan, A. (2002). Underwater undulatory swimming: kinematic characteristics, vortex generation and application during the start, turn and swimming strokes. In K. E. Gianikellis (Ed.), *Proceedings of the XXth International Symposium on Biomechanics in Sports*. Caceras, Espagne : Université de Extremadura.
- Arellano, R., Pardillo, S., Gavilan, A. (2003). Usefulness of the Strouhal number in evaluating human underwater undulatory swimming. In : J. C. Chatard (Ed.), *Biomechanics and Medicine in Swimming IX* (pp. 33-38). Saint-Etienne, France : Université de Saint-Etienne.
- Babinski, J. (1899). De l'asynergie cérébelleuse. *Revue Neurologique*, 7, 806-816.
- Bandura, A. (1986). *Social Foundations of Thought and Action*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Bernstein, N. (1967). *The Coordination and Regulation of Movements*. New York, Pennsylvania : Pergamon Press.
- Connaboy, C., Coleman, S., Sanders, R.H. (2009). Hydrodynamics of undulatory underwater swimming: A review. *Sports biomechanics*, 8(4), 360-380.
- Cossor, M. J., Mason, B. R. (2001). Swim turns performances at the Sydney 2000 Olympic Games. In : J. R. Blackwell, R. H. Sanders, *Proceedings XIXth the International Symposium on Biomechanics in Sports* (pp. 65-69). San Francisco, Californie : Université de San Francisco.
- Dempster, W. T., Gabel, W. C., Felts, W. J. L. (1959). The anthropometry manual work space for the seated subject. *American Journal of Physiology and Anthropometry*, 17, 289-317.
- Elipot, M. (2011). *Biomécanique et contrôle moteur en natation : Application des nouvelles techniques de calibration de caméra à l'analyse cinématique en natation et identification des*

coordinations motrices lors des phases sous-marines des départs plongés chez des nageurs de haut niveau. Thèse de doctorat. Université Paris Descartes. Paris.

Hay, J.G., Guimaraes, A.C.S., Grimston, S.K. (1983). A quantitative look at swimming biomechanics. *Swimming technique*, 20, 11-17.

Hover, F. S., Haugsdal, O., Triantafyllou, M. S. (2004). Effect of angle of attack profiles in flapping foil propulsion. *Journal of Fluids and Structures*, 19, 37-47.

Kwon, Y-H. Fiaud, V. (2002). Experimental issues in data acquisition in sport biomechanics: camera calibration. In : G. Giakas (Ed.), *Proceedings of the XXth International Symposium on Biomechanics in Sports* (pp. 3-14). Caceres, Espagne: Université de Extremadura.

Latash, M. L. (2008). *Synergy*. New York, Pennsylvania : Oxford University Press.

Latash, M., Levin, M. F., Schoz, J. P., Schöner, G. (2010). Motor control theories and their applications. *Medicina (Kaunas)*, 46(6), 382-392.

Lyttle, A.D., Blanksby, B.A., Elliot, B.C., Lloyd, D.G. (1998). The effect of depth and velocity on drag during the streamlined glide. *Journal of Swimming Research*, 13, 15-22.

Lyttle, A.D., Elliot, B., Blanksby, B.A., Lloyd, D.G. (1999). An instrument for quantifying the hydrodynamic drag of swimmers-a technical note. *Journal of Human Movement Studies*, 37(5), 261-270.

Lyttle, A.D., Blanksby, B.A., Elliot, B.C., Lloyd, D.G. (2000). Net forces during tethered simulation of underwater streamlined gliding and kicking techniques of the freestyle turn. *Journal of Sports Sciences*, 18, 801-807.

McCullagh, P., Weiss M, & Ross, D. (1989). Modeling considerations in motor skill acquisition and performance : An integrated approach. *Exercise and Sport Sciences Review*, 17, 475-513.

Maglischo, E. W. (2003). *Swimming fastest*. Champaign : Human Kinetics.

Pease, D.L., Vennell, R. (2010). The effect of angle of attack and depth on passive drag. In: P.L. Kjendlie, R.K. Stallman, J. Cabri (Eds.), *Biomechanics and Medicine in Swimming X* (p.122-124). Oslo, Norvège: Université d'Oslo.

Theureau, J. (2000). Anthropologie cognitive & analyse des compétences. In : *L'analyse de la singularité de l'action*. Paris : PUF, 171-211.

Triantafyllou, M.S., Triantafyllou, G.S., Gopalkrishnan, R. (1991). Wake mechanics for thrust generation in oscillating foils. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 3, 2835-2837.

Triantafyllou, M.S., Techet, A.H., Zhu, Q., Beal, D.N., Hover, F.S., Yue, D.K.P. (2002). Velocity control in fish-like propulsion and manoeuvring. *Integrative and Comparative Biology*, 42, 1026-1031.

Vennell, R., Pease, D., Wilson, B. (2006). Wave drag on human swimmers. *Journal of Biomechanics*, 39, 664-671.

Yando, R., Seitz, V., Zigler, E (1978). *Imitation a developmental perspective*. Lawrence Erlbaum. Assoc., Hillsdale, N.J.