

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

PAR
GRÉGORY CZAPLICKI

ANALYSE DE LA FLEXIBILITÉ ARTICULAIRE DE LA CHEVILLE LORS DU
BATTEMENT DESCENDANT CHEZ DIFFÉRENTS GROUPES DE NAGEURS

OCTOBRE 2006

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

ABSTRACT

Analysis of the ankle's flexibility during the downbeat kick in different groups of swimmers

The buoyancy forces in water force the swimmer to hold a horizontal body position by moving his arms and legs. It is known that the swimming kick has a fundamental role in the bearing of aquatic balance as well in propulsion. The foot has to push water backward, requiring important ankle flexibility. Earlier studies showed that in the flutter kick the propulsive forces are generated during the downbeat. The purpose of this study is to measure and compare the range of motion at the ankle joint in plantar flexion, during the downbeat front kick, in different groups of swimmers. As the articular flexibility decreases with age, the oldest swimmers should be the least flexible. The relationship between ankle flexibility, sex and age was examined in 24 subjects. Six groups of 4 swimmers performed 50 meters in free style, using 4 different skills (complete stroke, pull-buoy, kick-board, fins). Underwater motions were filmed and analyzed in angular measures with a goniometer. Results showed that age has a significant effect on the ankle flexibility, during the downbeat kick: best competitive swimmers, who were also the oldest, presented the best angular values. Sex did not appear as a significant factor. Among the 4 swimming skills, the difference between complete stroke and stroke with kick board is the only one which was not found significant. Hence, kick is not more efficient for enhancing ankle flexibility when legs move without arms than when both are used. For all swimmers, the swimming skill with fins had the results closest to the outside

measures. To improve the ankle flexibility thanks to swimming, fins could be recommended. This study confirms that best swimmers are as flexible in water as outside.

Key words: swimming, kick, ankle, flexibility

RÉSUMÉ

Les forces de flottabilité dans l'eau obligent le nageur à conserver sa position corporelle horizontale en bougeant les jambes et les bras. Il est prouvé que le battement de jambes joue un rôle fondamental dans le maintien de l'équilibre et aussi dans la propulsion. Le pied doit pousser l'eau vers l'arrière, nécessitant une importante amplitude articulaire au niveau de la cheville. Des recherches ont prouvé que durant le battement de jambes de crawl, les forces propulsives sont générées pendant la phase descendante du battement. Le but de cette étude est de mesurer et comparer l'amplitude de la cheville en flexion plantaire lors du battement de jambes descendant, en crawl, chez différents groupes de nageurs. Comme la flexibilité articulaire diminue avec l'âge, les sportifs les plus âgés devraient en principe être les moins flexibles. La relation entre la flexibilité à la cheville, le sexe et l'âge a été examinée chez 24 sujets. Six groupes de quatre nageurs ont été invités à effectuer 50 mètres en crawl, avec 4 modalités de nage différentes (nage complète, pull-buoy, planche, palmes). Les mouvements sous-marins ont été filmés puis analysés en termes d'amplitude angulaire. Ils ont été comparés avec des mesures de flexion plantaire hors de l'eau, à l'aide d'un goniomètre. Les résultats démontrent que l'âge a un effet significatif sur l'amplitude articulaire de la cheville, lors du battement descendant : les nageurs ayant le meilleur niveau de compétition, qui sont aussi les plus âgés, présentent les meilleures valeurs angulaires. Le sexe n'apparaît pas être un facteur significatif. Des quatre modalités de nage, seule la différence entre la nage complète et les jambes seules n'a pas atteint la significativité. Ainsi, le battement de jambes n'est pas

plus efficace, en termes d'amplitude articulaire à la cheville, lorsque les jambes sont utilisées sans les bras que les deux ensemble. Pour tous les nageurs, la modalité de nage avec les palmes présente les résultats se rapprochant le plus des valeurs mesurées hors de l'eau. Pour améliorer la flexibilité de la cheville grâce à la natation, l'utilisation des palmes peut donc être recommandée. Cette étude confirme le fait que les meilleurs nageurs sont aussi flexibles dans l'eau que hors de l'eau.

Mots clés : natation, battement de jambes, cheville, flexibilité

REMERCIEMENTS

Une sincère reconnaissance est exprimée aux étudiants de la maîtrise en sciences de l'activité physique à l'UQTR, Johan Caudroit et Amélie Grillet, pour l'aide apportée lors du processus expérimental. Mes remerciements vont également aux entraîneurs du club de natation Les Mégophias de Trois-Rivières Luc Boivin, Pascal Dufresne et Marc-Antoine Savard, pour la mise à disposition du matériel expérimental ainsi que de leur groupe de nageurs. L'auteur est particulièrement reconnaissant envers les vingt-quatre sujets dont la disponibilité a été profitable. Enfin, cette étude n'aurait pu être complétée sans les contributions au travail d'analyse statistique et à la correction du professeur Louis Laurencelle, mon directeur de recherche.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----|
| RÉSUMÉ | i |
| REMERCIEMENTS..... | iii |
| CHAPITRES..... | 1 |
| INTRODUCTION | 1 |
| Problématique | 2 |
| Définitions..... | 3 |
| Contraintes méthodologiques..... | 4 |
| Hypothèses..... | 4 |
| But de la recherche..... | 5 |
| RECENSION DES ÉCRITS..... | 6 |
| Principes de base de la natation | 6 |
| L'intérêt du battement de jambes..... | 9 |
| La technique efficace du battement de jambes | 12 |
| L'articulation de la cheville | 13 |
| MÉTHODOLOGIE..... | 17 |
| Sujets..... | 17 |
| Tâche du sujet | 18 |
| Appareillage..... | 18 |
| Procédures..... | 19 |
| Instructions données au sujet | 21 |

| | |
|---|----|
| RÉSULTATS | 23 |
| Procédures statistiques | 23 |
| DISCUSSION ET CONCLUSION | 29 |
| Effets de l'âge | 29 |
| Exercices à utiliser pendant l'entraînement | 30 |
| Limites de l'étude | 31 |
| RÉFÉRENCES | 34 |
| ANNEXE A. Anatomie de la cheville | 36 |
| ANNEXE B. Données brutes..... | 38 |

CHAPITRE I

INTRODUCTION

La natation permet à l'homme de se mouvoir dans l'eau sans l'aide d'équipement. La faculté de nager n'étant pas naturelle, l'être humain doit apprendre différentes techniques pour rendre efficaces ses mouvements aquatiques. Suite aux nombreuses noyades survenant l'été, plusieurs pays ont adapté des mesures favorisant l'apprentissage de la natation à l'école et dans les clubs sportifs. La proprioception des enfants étant encore plus approximative dans l'eau que sur le milieu terrestre, les enseignants et entraîneurs doivent proposer des exercices techniques permettant une découverte des sensations kinesthésiques en milieu aquatique. Or, lors de la nage, le corps étant à l'horizontale, seuls les membres supérieurs sont visibles. L'apprentissage des mouvements de jambes se fait donc essentiellement par des sensations proprioceptives. Dans cette optique, la planche de nage est un objet flottant facilitant l'enseignement des quatre mouvements de jambes autorisés par la Fédération Internationale de Natation Amateure (FINA) : ondulations de papillon, battements de dos crawlés et de crawl, ciseaux de brasse. Elle permet de maintenir le haut du corps à la surface et oblige le nageur à se servir efficacement de ses membres inférieurs, sans utiliser les bras.

Lors de l'apprentissage du battement de jambes en crawl, les enseignants et entraîneurs demandent aux nageurs d'effectuer un mouvement partant de la hanche,

avec une flexion du genou peu marquée et se finissant par un fouetté du pied en hyperextension très souple. Counsilman, entraîneur de l'équipe olympique américaine en 1964 et considéré comme le père de la recherche en natation, écrivait : « La flexibilité, ou la mobilité, est une qualité désirable pour un athlète parce qu'elle permet une exploitation maximale de force, vitesse et coordination » (Counsilman, 1968). Cette idée est répandue chez les entraîneurs mais peu de recherches ont mesuré l'impact de la flexibilité sur l'efficacité du fouetté du pied.

Cette étude descriptive vise à apporter un nouvel éclairage sur le rôle de la cheville lors du battement de jambes de crawl grâce à la comparaison de trois groupes de nageurs et quatre modalités de nage. Les résultats attendus pourraient être utiles à l'enseignement de la natation en appuyant le choix d'une méthode d'apprentissage.

Problématique

Afin de se déplacer dans le milieu aquatique et conserver un équilibre horizontal, le nageur doit utiliser efficacement ses jambes. Le battement de jambes n'étant pas un mouvement naturel, un apprentissage est alors nécessaire. Le fouetté du pied en fin de mouvement nécessite une bonne flexibilité de la cheville. Or, des recherches médicales sur l'amplitude en flexion (plantaire et dorsale) sur différentes catégories de sujets ont démontré qu'elle diminue avec l'âge (Boone 1981; Nigg 1992). Les nageurs les plus âgés devraient donc avoir de moins bonnes mesures angulaires à la cheville. Cependant, le haut niveau de compétition qui leur est imposé ne permet pas une rigidité des mouvements. Le problème est donc de comparer les mesures angulaires à la cheville chez

des nageurs de trois groupes d'âge différents, lors de quatre modalités de nage, pour déterminer si le niveau de compétition est un facteur de flexibilité.

Définitions

Le crawl :

Cette nage asymétrique est la plus rapide des quatre réglementées par la FINA. Les caractéristiques biomécaniques de cette nage permettent d'effectuer des longues distances en minimisant le coût énergétique. Elle est donc la plus utilisée à l'entraînement.

Le battement de jambes en crawl :

Lorsque le nageur est en position horizontale sur le ventre, les jambes effectuent un mouvement alternatif de haut en bas avec un battement partant de la hanche, puis allant par les genoux vers les chevilles dans un mouvement ressemblant à celui d'un fouet.

Amplitude de mouvement :

Elle se réfère à l'amplitude totale de mouvement que l'articulation de la cheville est capable d'atteindre.

Flexion plantaire :

Appelé également extension du pied, ce terme est utilisé pour décrire la position du pied penchant vers le bas.

Contraintes méthodologiques

Les différences anthropométriques entre les sujets et les particularités de leur technique individuelle de nage ont une influence que nous n'avons pas contrôlée sur nos résultats. Aussi, la prise de mesure hors de l'eau avec le goniomètre ne permet pas d'avoir des données au degré près ; une estimation de l'ordre de cinq degrés est plus réaliste. Le dispositif utilisé pour filmer le mouvement sous l'eau nécessite l'utilisation d'une caméra VHS puis d'une télévision et d'un magnétoscope, la précision visuelle obtenue étant moindre que celle d'un appareillage numérique.

Hypothèses

Dans un devis de recherche descriptive, nous nous proposons de documenter les hypothèses de travail suivantes :

1. Il existe une relation entre le niveau de compétition et la flexibilité de la cheville lors du battement de jambes, quelle que soit la modalité de nage.
2. Les valeurs de flexion plantaire forcée chez les nageurs experts seniors sont semblables hors de l'eau et dans l'eau.
3. Les jeunes nageurs ont une flexion plantaire similaire à celles des plus expérimentés hors de l'eau, mais ne l'utilisent pas lors du battement de jambes dans l'eau.
4. La flexion plantaire pourrait être améliorée par l'utilisation des palmes.

But de la recherche

Notre objectif est donc de mesurer et comparer l'amplitude de la cheville en flexion plantaire chez différents groupes de nageurs, en utilisant différentes modalités de mesure.

CHAPITRE II

RECENSION DES ÉCRITS

Principes de base de la natation

Nager nécessite un déplacement à la surface ou dans l'eau à l'aide de mouvements appropriés. L'être humain vivant essentiellement sur le milieu terrestre, le nageur¹ novice doit construire une nouvelle locomotion afin de s'exprimer dans le milieu aquatique. Savoir nager, c'est : « à partir d'un équilibre statique volontaire, réaliser de manière autonome une suite de mobilisations segmentaires visant à déplacer le corps dans l'élément aquatique, avec la capacité de terminer ce déplacement en équilibre stable » (Chollet, 1997). Le maintien de la position horizontale du corps dans l'eau, caractéristique de la natation, passe par des phénomènes biomécaniques. Un corps inerte à l'horizontale ne peut se maintenir dans cette position. Effectivement, la pesanteur s'applique au centre de gravité alors que la poussée d'Archimède s'applique au centre de poussée. Le corps subit alors un couple de redressement (voir figure 1). Ainsi, de manière à conserver son équilibre horizontal, le nageur doit être en constante équilibration : « c'est la fonction grâce à laquelle l'homme maintient à tout moment son équilibre » (Gribenski, 1980). L'action des bras et des jambes stabilise le corps dans la position horizontale tant qu'une vitesse minimale est maintenue. Pour Counsilman: «Le battement

¹ L'usage du masculin est générique et n'indique pas le sexe du nageur ou de la nageuse.

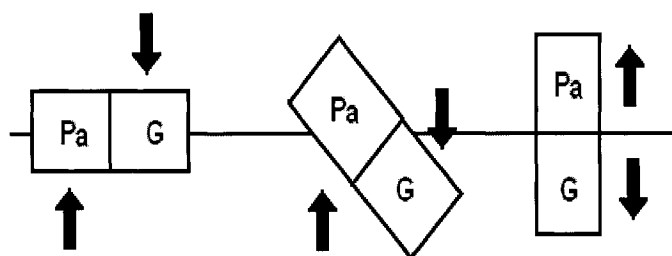


Figure 1 : Couples de redressement exercés par la poussée d'Archimède (Pa) et par la pesanteur (G)

de jambes sert surtout à stabiliser le corps et à maintenir les pieds dans une position surélevée et profilée » (Counsilman 1977).

L'objectif de l'entraînement en natation est de développer chez le nageur les qualités physiques qui lui permettront de produire et maintenir la plus grande vitesse possible pendant toute la durée de la course, et de développer parallèlement les qualités techniques sur le plan hydrodynamique et propulsif spécifiques à l'élément liquide (Pelayo, 2004). Ces objectifs passent par l'amélioration de la propulsion et la diminution des résistances à l'avancement. Il a été constaté que les meilleurs nageurs présentent les valeurs de résistance les plus faibles. Or, les masses d'eau déplacées restituent partiellement au nageur une force caractérisée par une intensité et une direction. Ce sont ces deux facteurs qui conditionnent l'efficacité de la propulsion du nageur. Les lois hydrodynamiques montrent que l'intensité de la force augmente avec la vitesse de déplacement des surfaces propulsives. La direction des forces propulsives est importante. L'efficacité de la propulsion d'un nageur est déterminée également par sa capacité à diriger la résultante des forces créées dans la même direction et dans le sens opposé au déplacement en cours.

Dans cette optique d'efficience du mouvement aquatique, le battement de jambes a un rôle fondamental dans le maintien de l'équilibre (latéral, sagittal et frontal) et aussi dans la propulsion. Pour limiter le roulis du corps, l'action croisée du battement doit être importante. Le mouvement part de la hanche et se termine par un fouetté du pied en hyperextension très souple. Plus la distance est courte, plus le rôle propulsif des jambes doit être important. Quelle que soit la distance, le battement permet la conservation de l'équilibre horizontal.

Au niveau hydrodynamique, un certain nombre d'auteurs (Barthels 1974 ; Counsilman 1971) ont montré que, si la troisième loi des mouvements de Newton ou loi « d'action – réaction » justifie la forme du mouvement de nage, les particules de fluide initialement inertes doivent être repoussées vers l'arrière. Il paraît plus aisé d'effectuer ce mouvement avec les extrémités des membres supérieurs qu'avec celles des membres inférieurs. Pourtant l'équilibration se maintient en grande partie grâce à l'action des jambes. Le pied doit donc pousser l'eau vers l'arrière, nécessitant une importante amplitude articulaire au niveau de la cheville. Si les pieds ne sont pas tendus, leur surface de propulsion se trouve diminuée et la poussée réduite (voir figure 2).

Durant la phase descendante, l'extension de la cheville est facilitée par la pression hydrodynamique que crée la vitesse du mouvement (Palmer 1985). Pour Maglischo (2003), les pieds vont propulser les nageurs en avant plus efficacement, s'ils ont une amplitude adéquate en flexion plantaire. Parce que son habileté à étendre ses pieds et ses

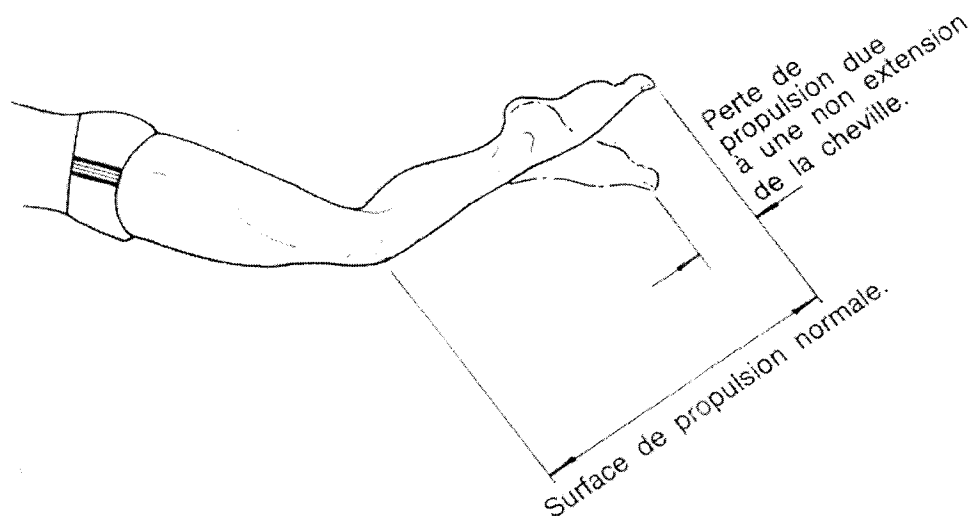


Figure 2 : Différence de surface propulsive en fonction de la position du pied

chevilles devrait être meilleure que la moyenne, le nageur expert devrait être capable de maintenir une orientation vers l'arrière avec ses pieds durant une portion du battement. En conséquence, il devrait être capable de générer une force propulsive sur une plus longue portion du battement descendant. Les nageurs devraient être capables d'étendre leurs chevilles à plus de 70° de la verticale (Maglischo, 2003). Ceux qui ne possèdent pas cette habileté auraient besoin d'augmenter l'amplitude de mouvement avec des exercices spéciaux conçus pour la flexibilité de la cheville.

L'intérêt du battement de jambes

Une question au sujet du battement de jambes revient souvent : « Dans quelle mesure le battement de jambes est-il propulsif ? ». Ce sujet a été débattu pendant de nombreuses années. Jusqu'à récemment, l'opinion qui prévalait niait que le battement de jambes joue un rôle propulsif. Cette opinion a changé ces dernières années.

Pour Counsilman, : « Le mouvement vers le bas en crawl est la source principale de propulsion (...), il sert de stabilisateur et de neutralisateur et non de propulseur en crawl » (Counsilman, 1977). Aujourd'hui, il semble certain que le battement de jambes peut jouer un rôle propulsif en poussant l'eau vers l'arrière pour propulser le nageur vers l'avant. Il reste néanmoins encore certains doutes quant à l'intérêt qu'il y a à dépenser son énergie pour utiliser le battement de jambes pour la propulsion. Adrian et ses collaborateurs (1966) ont mesuré que les battements de jambes consomment quatre fois plus d'oxygène que les mouvements de bras. De plus, d'autres chercheurs ont prouvé que le battement de jambes augmentait considérablement le coût énergétique de la natation (Holmer 1972). Il a été observé que plus la course est longue, moins le battement prend d'importance. Effectivement si le nageur a un battement trop fort, une trop grande quantité de sang est canalisée vers les muscles des jambes qui se fatigueront alors plus vite. Il est cependant important d'effectuer des exercices sur les jambes car si elles ne sont pas convenablement entraînées elles se fatigueront et joueront moins bien leur rôle stabilisateur : elles s'enfonceront, ainsi que les hanches, trop bas dans l'eau et se déplaceront latéralement, ce qui aura pour conséquence de créer une résistance considérable.

Différentes études viennent argumenter le rôle fondamental des battements de jambes dans la propulsion. Robertson (1960) a mesuré la vitesse, la force propulsive générée par le battement de jambes et la flexion plantaire. Ses conclusions furent en faveur du rôle de la flexibilité de la cheville pour générer une force propulsive. Une autre étude consistait à prescrire des séances d'étirement des chevilles à un groupe

expérimental, à raison de deux fois cinquante minutes par semaine pendant six semaines, pour vérifier si l'amélioration de la flexibilité engendrait une amélioration de la propulsion en battement de jambes (Healey 1970). Les résultats chronométriques obtenus montrèrent une relation spécifique entre le gain de temps sur une distance de vingt-cinq verges et l'amélioration de la flexibilité des chevilles. Dans sa conclusion, l'auteur recommande de poursuivre en examinant les résultats de nageurs de différents niveaux d'habiletés. Une autre étude plus récente vient contredire le rôle de la flexibilité des chevilles dans la vitesse de nage en battement de jambes (Mookerje, 1995). L'auteur a mesuré la flexion plantaire hors de l'eau, à l'aide d'un goniomètre, puis il a étudié la relation de ces angles avec des données chronométriques sur une distance de vingt-cinq verges. Les corrélations n'ont pas révélé de lien significatif entre les temps et la flexion plantaire. Ces études contradictoires se basent sur des comparaisons entre individus du même âge et sur des distances très courtes parcourues à haute intensité. Pour juger de l'efficacité d'un mouvement, il paraît plus approprié de l'analyser à la vitesse la plus pratiquée pendant les entraînements. Afin de connaître le rôle de la flexibilité articulaire de la cheville dans la propulsion en crawl, l'idéal est de comparer différents niveaux d'habiletés avec des données angulaires sur des modalités de nage diverses.

Ainsi, le peu d'intérêt accordé par les études au battement de jambes provient de son rôle dans la nage : une dépense énergétique élevée pour un résultat propulsif faible. Les chercheurs (et les entraîneurs) ont donc tendance à vouloir améliorer en priorité les mouvements de bras. Il est cependant indéniable que le battement sert à la fois de stabilisateur et de propulseur sur les courtes distances.

La technique du battement de jambes efficace

La technique du battement de jambes consiste en des balayages diagonaux alternés des jambes. La poussée latérale du battement sert à compenser le déplacement du corps qui résulte du retour du bras. Bien que les jambes se déplacent quelque peu latéralement pendant les battements, les directions principales restent de bas en haut et de haut en bas, c'est pourquoi les deux mouvements principaux du battement de jambes ont été désignés sous les noms de battement ascendant et battement descendant.

Pour Costill (1992), le battement descendant est un mouvement de type fouetté qui commence par une flexion de la hanche suivie d'une extension du genou. La jambe commence son battement vers le bas après avoir atteint le sommet du battement vers le haut précédent. Lorsque le battement de jambes est exécuté correctement, la jambe doit être relâchée de sorte que c'est la pression de l'eau qui repousse la jambe vers le haut, en fléchissant le genou quand le nageur commence à abaisser ses cuisses. Peu après, la jambe suit la cuisse, par une extension active vers le bas, dans un mouvement de fouetté. La pression de l'eau pousse la jambe vers le haut amenant le pied en extension, les orteils pointant vers le haut (en flexion plantaire), le pied en inversion (tourné vers l'intérieur). Une capacité supérieure à la moyenne pour étendre le pied (pointes tendues) constitue un avantage décisif pour les nageurs dans le battement de jambes. En effet, elle leur permet de maintenir un angle d'attaque qui autorise le déplacement de l'eau vers l'arrière plus longtemps pour chaque battement vers le bas.

Pour Maglischo (2003), les battements ascendants en crawl ne sont probablement pas propulsifs. Contrairement à la croyance populaire, le but premier du battement

ascendant en crawl est probablement la mise en position des jambes pour exercer une force propulsive dans le prochain battement descendant. Pour cette raison, le battement ascendant devrait être fait doucement si bien qu'une très petite force musculaire soit requise pour le réaliser.

L'articulation de la cheville

L'articulation de la cheville se comporte comme une pince à serrage élastique (ou mortaise) qui possède un certain degré d'adaptation aux contraintes latérales. Les principaux mouvements du pied sont la flexion et l'extension réalisées grâce à de puissants muscles. L'articulation tibio-fibulo-talienne permet essentiellement un mouvement de flexion (flexion plantaire et flexion dorsale). Comme pour tous les organes, l'amplitude articulaire du pied évolue avec l'âge. Par exemple, la flexion dorsale est de 25° à l'âge de 1 an et de 15° à 7 ans (Diméglio, Hérisson et Simon 1998). Le pied est le premier organe à entrer en puberté, c'est aussi le premier organe à s'arrêter de grandir. De cinq ans à la puberté, la croissance de la cheville a un rythme, au niveau du cartilage inférieur du tibia, de 0,8 cm par an. À la puberté, il existe en général une hypertonie des muscles péroniers, engendrant une réduction de la pronosupination. L'amplitude de la flexion dorsale est alors réduite. La particularité de la cheville de l'enfant et de l'adolescent par rapport à la cheville de l'adulte réside dans la présence des cartilages de croissance et leur situation par rapport aux ligaments latéraux et péronéo-tibiaux. À cette disposition ligamentaire s'ajoutent la particularité physiologique de la cheville serrée ou laxa, l'âge de l'enfant et de l'adolescent, la nature du sport pratiqué.

Ainsi, la flexibilité de l'articulation de la cheville a tendance à diminuer naturellement à partir de la puberté alors que les nageurs ont intérêt à conserver une amplitude maximale tout au long de leur carrière.

Une recherche approfondie permet de connaître les normes de flexion plantaire et dorsale pour la population générale. L'American Association of Orthopaedic Surgeons et l'American Medical Association donnent des valeurs de 20° en flexion plantaire et respectivement 50° et 40° en flexion dorsale (voir figure 3). Des études mieux

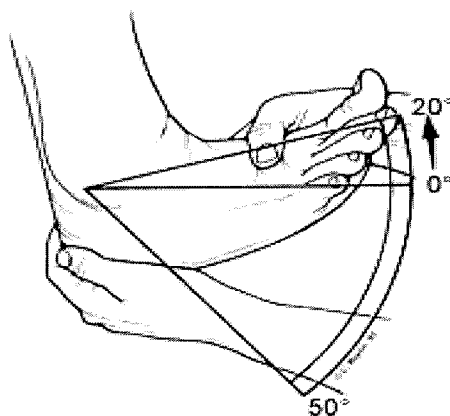


Figure 3 : Amplitude articulaire de la cheville

cibles fournissent des résultats plus précis en fonction de l'âge et du sexe. Les effets du sexe sur l'amplitude de mouvement sont spécifiques à l'articulation et aux mouvements et sont souvent reliés à l'âge. Nigg et associés (1992) ont trouvé des différences de sexe dans le mouvement de la cheville mais ont déterminé que ces différences changeaient avec l'âge. Les seules différences de sexe notées par Boone, Walker et Perry (1981) furent que les femmes de 1 à 9 ans et celles de 61 à 69 ans ont une amplitude de

mouvement significativement plus grande en flexion plantaire que leurs contemporains masculins. Bell et Hoshizaki (1981) ont noté que chez les 124 femmes et 66 hommes âgés de 18 à 88 ans de leur étude, les femmes entre 17 et 30 ans avaient une plus grande amplitude de mouvement en flexion plantaire et dorsale que les hommes du même groupe d'âge.

Tableau 1

Effets de l'âge sur les mouvements de la cheville : valeurs moyennes (Boone, 1981)

| <i>Âge</i> | 6 – 12 ans | 13 – 19 ans | 20 – 29 ans |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|
| <i>Nombre</i> | n = 17 | n = 17 | n = 19 |
| <i>Flexion dorsale</i> | 13.8° ± 4.4° | 10.6° ± 3.7° | 12.1° ± 3.4° |
| <i>Flexion plantaire</i> | 59.6° ± 4.7° | 55.5° ± 5.7° | 55.4° ± 3.6° |

Tableau 2

Comparaison de l'amplitude de mouvement selon le sexe et l'âge (Nigg et coll., 1992)

| <i>Âge</i> | 20 – 59 ans | | 60 – 79 ans | |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <i>Sexe</i> | Hommes | Femmes | Hommes | Femmes |
| <i>Flexion dorsale</i> | 26.1° ± 6.5° | 24.9° ± 6.1° | 25.9° ± 4.0° | 19.6° ± 4.7° |
| <i>Flexion plantaire</i> | 40.5° ± 8.1° | 44.4° ± 7.7° | 35.0° ± 5.8° | 41.2° ± 6.5° |

D'après les tableaux 1 et 2 et les études précédemment citées, il apparaît que les femmes ont en moyenne une meilleure flexibilité en flexion plantaire et dorsale que les hommes. La flexibilité diminue avec l'âge, malgré des périodes de stagnation à

l'adolescence. Ce phénomène est dû à une rigidité naturelle des articulations mais aussi à une augmentation de la masse musculaire des muscles péroniers et du triceps sural. Ainsi, afin de conserver et d'améliorer l'amplitude de mouvement, les sportifs doivent s'étirer régulièrement. Même si le milieu aquatique est moins contraignant pour les articulations, la répétition de mouvements cycliques oblige également les nageurs à prendre soin de leurs articulations.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Sujets

Les participants sont recrutés parmi les adhérents du Club de Natation Mégophias de Trois-Rivières. Le but est de comparer les âges, sexes et niveaux de pratique. Malgré le fait que la natation chez les jeunes au Québec soit essentiellement un sport féminin, l'échantillon de chaque niveau est mixte et composé de quatre sujets pour chaque sexe. Afin de viser un éventail de nageurs le plus diversifié possible, trois groupes d'âges significatifs sont choisis : 10-11 ans, 14-16 ans, 18-22 ans (groupe des seniors).

Les plus jeunes, âgés de 10 à 11 ans, ont acquis les bases de la natation et débutent la compétition. Ils ont une bonne flexibilité articulaire, ils sont en pleine croissance mais n'ont pas encore développé une proprioception propre à ce sport. Ils sont tous de niveau « novice ».

Le groupe des 14-16 ans est composé de nageurs dont la croissance osseuse arrive à son terme. Il existe de nombreuses disparités de taille, de masse musculaire et de flexibilité entre les adolescents. La plupart des nageurs de ce groupe pratiquent depuis plus de six ans et ont acquis de bons repères aquatiques. Ils sont de niveau « Provincial 1 » ou « Provincial 2 ».

Enfin, l'échantillon du groupe des seniors ne comprend que des nageurs majeurs. Comme ils ont tous plus de dix ans de pratique de la natation, l'intérêt est de comparer

leurs données avec celles des adolescents pour tenter de savoir si leur flexibilité résulte de la répétition du battement de jambes pendant toutes ces années ou s'ils sont naturellement plus souples. Tous les seniors ont obtenu leur standard national canadien (de niveau junior ou senior).

Comme pour la plupart des sports, le niveau d'habileté s'acquiert avec le nombre d'années de pratique. La formation de ces échantillons a couplé une catégorie d'âge avec un niveau de pratique. Même si des nageurs atteignent le haut niveau très jeunes, leurs cas sont rares. Cette étude vise à généraliser des résultats pour une population de sportifs suivant une évolution « normale » : progression constante au fil des années, jusqu'à un sommet vers 25 ans. Lors de l'analyse des résultats, la variable « âge » fait également référence au niveau de pratique : les critères ne seront jamais dissociés.

Tâche du sujet

La première mesure s'effectue hors de l'eau. Le sujet est assis avec le genou fléchi à 90°. Comme l'expérimentateur place le pied en flexion plantaire maximale, le sujet n'a aucun effort à fournir. Ensuite, la consigne donnée aux nageurs est d'effectuer quatre allers-retours en crawl, à allure moyenne, sans accentuer le battement et avec une technique de nage naturelle. La modalité de nage change à chaque fois.

Appareillage

Le dispositif mis en place se compose d'une caméra aquatique fixée à une tige, elle-même soutenue par un chariot. Ce dernier est relié à un magnétoscope enregistreur et une télévision. L'analyse des vidéos est effectuée grâce à des arrêts sur image par une enregistreuse professionnelle (voir figure 4).

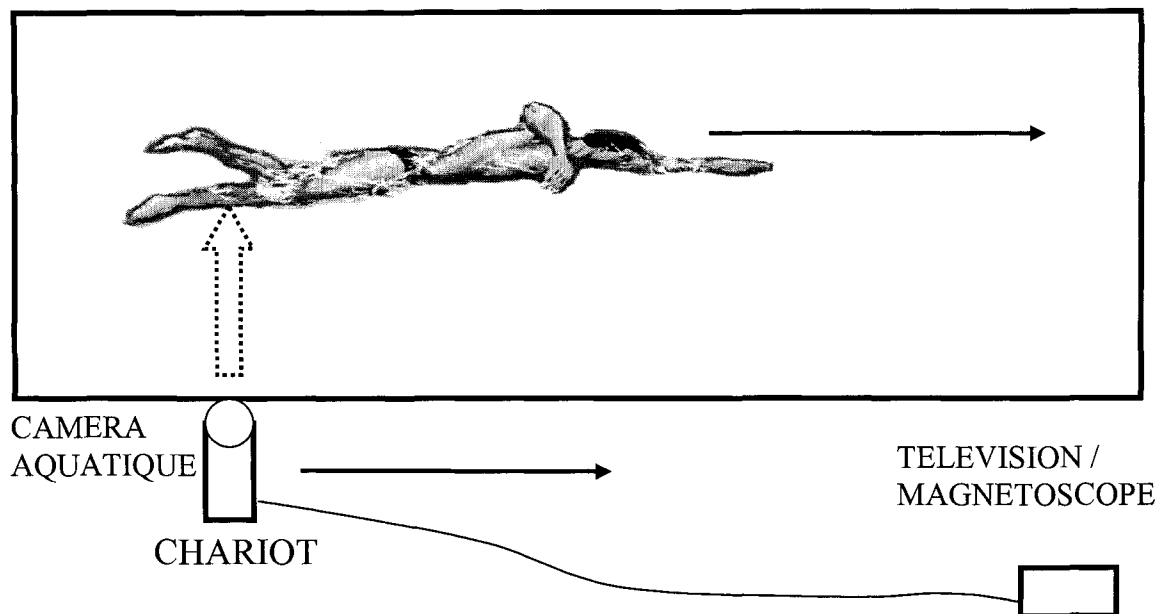


Figure 4 : Dispositif permettant de filmer le nageur en action

Procédures

Les nageurs passent par groupe de deux ou trois, pendant que les autres poursuivent leur pratique. La séance se déroule en six phases. Dans un premier temps, le protocole est expliqué et détaillé. La deuxième phase est une mesure de l'amplitude maximale en flexion plantaire hors de l'eau, à l'aide d'un goniomètre. Pendant les mesures angulaires, le sujet étant assis hors de l'eau, le second expérimentateur collecte des informations sur le sujet. Le goniomètre est un outil flexible avec la même fonction qu'un rapporteur d'angle. Afin de mesurer l'angulation de la cheville en flexion plantaire, Norkin et White (2003) recommandent plusieurs étapes. Le sujet est assis avec le genou fléchi à 90°. Le pied est en position 0° d'inversion et d'éversion. Le centre du pivot du goniomètre est placé sur le faciès latéral de la malléole latérale. Le bras proximal est aligné avec la ligne

médiane de la fibula, utilisant la tête de la fibula comme référence. Le bras distal est aligné parallèlement au faciès latéral du cinquième métatarse.

La première partie est nagée sans matériel, en crawl, à allure moyenne, afin de reproduire au mieux la nage la plus utilisée à l'entraînement servant ici de mesure de référence. La deuxième partie nagée est réalisée à l'aide d'un *pull buoy* (objet flottant) attaché par un élastique et coincé entre les deux malléoles. Le but est de vérifier la flexibilité de la cheville en position neutre, sans mouvement volontaire du pied. La troisième partie requiert une planche, de manière à ne mouvoir que les jambes et donc comparer avec la mesure précédente. La quatrième partie est nagée avec des palmes aux pieds et les bras. Il s'agit de vérifier l'hypothèse que l'action des palmes accentue l'amplitude des chevilles chez tous les groupes de nageurs. La durée totale d'expérimentation est environ de dix minutes par sujet.

De manière à atténuer l'effet des bulles d'air lors de la phase descendante du battement et conserver une bonne qualité de l'image vidéo, les prises de vue de côté sont effectuées à vitesse de nage moyenne. Un opérateur pousse le chariot le long du mur en suivant le nageur, tandis qu'un autre lui indique la vitesse à suivre en fonction des images observées sur le moniteur. Le film obtenu sur la VHS est visionné sur une enregistreuse professionnelle qui séquence à 60 images par seconde : le but est de trouver la position du pied la plus basse lors du battement descendant. L'angulation du pied est mesurée directement sur la télévision à l'aide d'un goniomètre. Les trois points de repère sont : le milieu du tibia, le talus et le métatarse V (petit orteil) (voir figure 5). Prises dans la

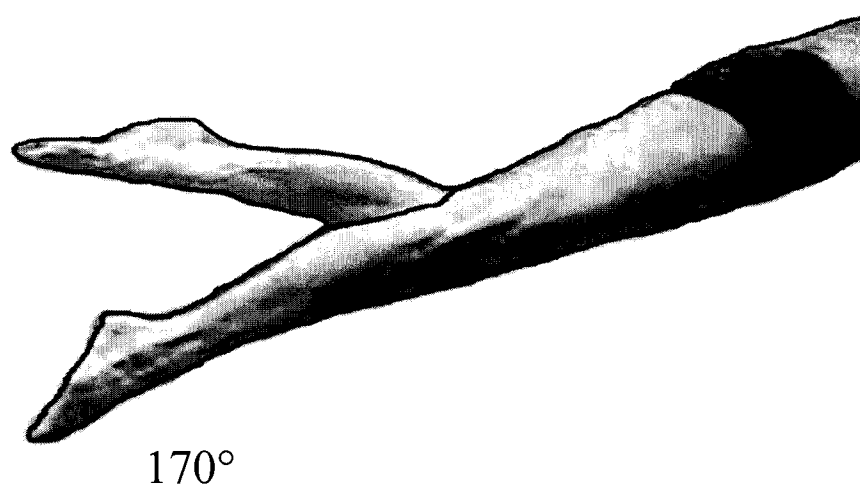


Figure 5: Image retouchée d'un nageur senior

même position, les images permettent de comparer la flexibilité maximale de la cheville des nageurs des trois groupes en fin de battement descendant.

Afin d'augmenter la précision des données, dix cycles (cinq pour chaque cheville) de battements consécutifs sont choisis à partir de la séquence la plus nette du 50 mètres crawl. Les cinq mesures obtenues représentent la position du même pied pour chaque cycle de battement. Comme la jambe est parfois en rotation lors du battement (surtout chez les experts), le calcul de la moyenne et de l'écart type paraît judicieux.

Instructions données au sujet

Une fois l'échauffement aquatique terminé, il est demandé au sujet de se sécher, de s'asseoir, puis de répondre au questionnaire. Il doit détendre les muscles de ses membres inférieurs au maximum afin de faciliter la mesure prise à l'aide du goniomètre. Ensuite il lui est demandé d'effectuer quatre allers-retours dans le bassin de 25 mètres, en crawl, en conservant une allure moyenne et sans accentuer le battement (entre quatre

et six battements de jambes par cycle de bras), avec une technique de nage naturelle.

Afin de rester à équidistance de la caméra, le nageur doit suivre une ligne au fond du bassin.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Procédures statistiques

La qualité de la caméra et du rendu vidéo ne permet pas de mesurer l'angle au degré près ; ainsi la moyenne de cinq prises de vue par côté est calculée à partir de la position la plus basse du pied reflétant mieux la valeur réelle. Le crawl est une nage asymétrique dans le plan sagittal : le mouvement est le même des deux côtés mais réalisé en opposition temporelle. En calculant le coefficient de corrélation entre chaque côté, pour l'ensemble des sujets, il ressort une similitude presque exacte entre les données. Quelle que soit la modalité de nage, le coefficient de corrélation entre les angles au pied droit et ceux au pied gauche est supérieur à 0,95 et tend vers une corrélation positive parfaite (tableau 7, en annexe). Les données peuvent donc être calculées sur la moyenne des dix mesures de chaque sujet, ce pour chaque modalité de nage.

De plus, nonobstant le manque de précision, les écarts-types relativement faibles obtenus pour chaque sujet indiquent une certaine stabilité des mesures d'angle, et une certaine crédibilité peut être accordée aux résultats (tableau 3).

Tableau 3

Moyennes des valeurs (en degrés) par sous-groupe de quatre nageurs

| <i>Âge</i> | 10 - 11 ans | | 14 - 16 ans | | 18 - 22 ans | |
|-------------------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| <i>Sexe</i> | Hommes | Femmes | Hommes | Femmes | Hommes | Femmes |
| <i>Nage</i> | 157,3 | 158,3 | 163,8 | 167,5 | 170,8 | 174,7 |
| <i>complète</i> | (4,9) | (3,8) | (7,1) | (4,9) | (1,7) | (5,3) |
| <i>Bras seuls</i> | 150,6 | 150,5 | 157,0 | 163,6 | 162,6 | 164,7 |
| | (3,0) | (4,6) | (7,7) | (3,3) | (4,4) | (6,5) |
| <i>Jambes</i> | 158,8 | 160,3 | 166,4 | 170,2 | 168,7 | 172,3 |
| <i>seules</i> | (2,1) | (3,4) | (6,6) | (1,7) | (2,9) | (6,5) |
| <i>Palmes</i> | 159,8 | 165,7 | 169,9 | 172,5 | 171,5 | 174,2 |
| | (4,9) | (5,0) | (2,7) | (1,6) | (2,2) | (5,8) |

Afin de connaître l'élément déterminant dans la flexibilité de la cheville lors du battement de jambes, une analyse de variance (ANOVA) est nécessaire. Il s'agit de vérifier si les moyennes des six groupes de sujets (deux sexes et trois catégories d'âge) évalués sur quatre modalités de nage engendrent des différences significatives (tableau 5). Il existe donc deux variables : le sexe (A) et l'âge (B), ainsi que des conditions répétées (C_R). Les résultats sont donc calculés selon un plan d'analyse de variance de type $A \times B \times C_R$ (tableau 6). Grâce à la loi de probabilité F de Fisher, on peut connaître quelle variable est significative dans la production du meilleur mouvement.

Le sexe

La variable « sexe » n'a entraîné aucune variation significative de l'angle de la cheville, que ce soit par elle-même ou en interaction avec l'âge ou la modalité de nage.

Les données et conclusions peuvent donc être regroupées pour les deux sexes.

L'âge

En ne considérant que cette variable, la différence d'âge est un facteur significatif dans la production du meilleur mouvement, au seuil de 1%. Les jeunes ont des valeurs significativement inférieures à celles des plus âgés (tableau 4) : 157,6 pour le groupe de 10-11 ans, 166,4 pour les 14-16 ans et 169,9 pour les 18-22 ans.

Tableau 4

Moyenne des valeurs (en degrés) par groupe d'âge

| | Nage complète | Bras seuls | Jambes seules | Palmes | Total |
|-------------|---------------|------------|---------------|--------|-------|
| 10 - 11 ANS | 157,8 | 150,5 | 159,5 | 162,7 | 157,6 |
| 14 - 16 ANS | 165,7 | 160,3 | 168,3 | 171,2 | 166,4 |
| 18 - 22 ANS | 172,7 | 163,6 | 170,5 | 172,8 | 169,9 |

Les modalités

En prenant en compte les quatre modalités, il existe une différence significative au seuil de 1%. Examinant ces quatre conditions, il est possible de mettre à part celle nagée avec les bras uniquement car elle est la seule où aucune flexion des pieds n'est effectuée. De plus, les valeurs mesurées pour cette modalité sont nettement inférieures à celles des trois autres, pour n'importe quel groupe d'âge : il se pourrait que cette

modalité fausse le calcul de la différence significative. Non pas, car, en excluant la condition 2, une variation significative à 1% est encore présente entre les trois conditions restantes.

Pour savoir si les modalités ont des différences significatives entre elles, l'application de la *méthode HSD de Tukey* est appropriée (tableau 6). Or, elles diffèrent toutes les unes des autres, sauf nage complète et jambes seules qui ne diffèrent pas.

L'âge et les modalités

Il existe une interaction significative au seuil 5% entre l'âge et les modalités. Cette indication très générale suggère de scruter les variations observables entre ces deux facteurs.

Tableau 5

Sommaire de l'ANOVA de l'angle maximal de la cheville chez des nageurs des deux sexes et de trois niveaux d'âge, sous quatre modalités de nage

| Source | <i>dl</i> | CM | <i>F</i> | Signification |
|--------------|-----------|---------|----------|---------------|
| Total | 95 | 63,35 | | |
| Sujets | 23 | 174,02 | | |
| Sexe (A) | 1 | 231,88 | 3,469 | ns |
| Âge (B) | 2 | 1274,21 | 19,063 | 0,01 |
| A x B | 2 | 9,47 | <1 | |
| Intra(AB) | 18 | 66,84 | | |
| Intrasujets | 72 | 28,00 | | |
| Modalité (C) | 3 | 504,42 | 78,213 | 0,01 |
| A x C | 3 | 1,10 | <1 | |
| B x C | 6 | 15,34 | 2,379 | 0,05 |
| A x B x C | 6 | 9,90 | 1,535 | ns |
| C x Sujets | 54 | 6,45 | | |

Tableau 6

Différences entre les moyennes des modalités (et quotients *q* dans la parenthèse), selon la méthode HSD de Tukey¹

| Différence | Bras | Jambes | Palmes |
|------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| NC | 7,246 * (13,98) | -0,696 (-1,34) | -3,517 * (-6,784) |
| Bras | | -7,942 * (15,32) | -10,763 * (-20,76) |
| Jambes | | | -2,821 * (-5,44) |

¹ L'astérisque indique une différence significative à 1%

La figure 6 apporte un éclairage sur les différences observées entre les catégories d'âge. Les courbes de modalités entre les deux groupes de 10-11 ans et 14-16 ans sont quasiment parallèles. Les valeurs sont croissantes dans l'ordre des modalités : bras seuls, nage complète, jambes seules, palmes. L'absence de différence significative entre les modalités nage complète et jambes seules pourrait être attribuable, en partie, au groupe d'âge 18-22 ans. Effectivement, seulement chez les seniors, l'amplitude maximale obtenue par les palmes est aussi atteinte en nage naturelle : les moyennes d'angle se superposent.

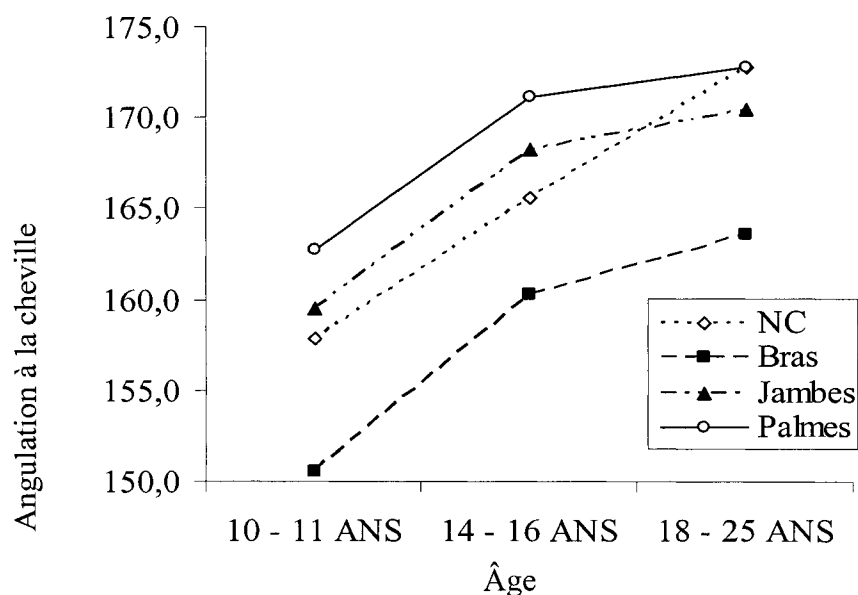


Figure 6. Comparaison entre les groupes d'âge

CHAPITRE V

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les recherches précédentes (Costill 1992, Maglischo 2003) ont montré que le battement descendant était propulsif à condition d'orienter efficacement les surfaces. Basée sur la théorie proposant que l'eau propulsée vers l'arrière déplace le corps vers l'avant, l'expérience menée tentait de documenter le rôle du pied dans ce phénomène. Ne pouvant mesurer la force propulsive, la recension d'ouvrages spécialisés a permis de démontrer que plus l'articulation de la cheville est souple, plus le mouvement de fouetté du pied, en fin de battement descendant, est propulsif.

Effets de l'âge

L'hypothèse principale de cette étude est l'existence d'une relation entre le niveau de compétition et la flexibilité de la cheville lors du battement de jambes, quelle que soit la modalité de nage : rappelons que les échantillons formés associent une catégorie d'âge à un niveau de pratique. Les résultats de l'étude démontrent que l'âge (donc le niveau de pratique) est le facteur primordiale de cette hyperlaxité. Même si des études ont prouvé que la flexibilité disparaissait avec les années hors de l'eau, la séniorité du nageur est un facteur significatif pour la flexibilité de la cheville, lors du battement de jambes. La répétition de mouvements contraignants au cours du temps pourrait être à l'origine de ce phénomène. De plus, Healey (1970) a démontré qu'un programme d'étirement des

chevilles amenait une amélioration de l'amplitude articulaire et une meilleure propulsion lors du battement de jambes. Or, plus le niveau de pratique augmente, plus les nageurs passent du temps à s'étirer à la fin de chaque entraînement afin de conserver leur flexibilité. Par ailleurs, le sexe semble n'avoir aucun effet.

L'analyse des quatre modalités de nage démontre une supériorité des valeurs angulaires pour les palmes chez les 10-11 ans et 14-16 ans, proches des limites articulaires mesurées hors de l'eau. Chez les séniors, l'effet des palmes sur la flexibilité angulaire est moindre car les valeurs mesurées sont semblables à celles atteintes en nage complète. Ainsi, lors de la nage la plus couramment pratiquée à l'entraînement, ils utilisent pleinement leur flexibilité sans avoir besoin de matériel.

Exercices à utiliser pendant l'entraînement

L'intérêt de cette étude est également d'apporter un éclairage sur les exercices proposés pendant les entraînements. Malgré les croyances populaires, l'utilisation de la planche pour améliorer l'amplitude de la cheville n'apparaît pas être plus efficace que la nage sans matériel, pour des nageurs confirmés. Cette observation n'est pas généralisable à un public de débutants, car le novice a tendance à ne pas utiliser ses jambes lors de la nage complète : dans son cas, l'utilisation de la planche est primordiale. Pour des nageurs confirmés, cet objet apporte une aide considérable dans le renforcement musculaire mais ne semble pas plus améliorer la flexibilité articulaire de la cheville qu'avec l'utilisation des bras.

Conformément aux attentes, l'utilisation des bras seuls n'entraîne pas de flexion plantaire maximale. Cet exercice sert à renforcer musculairement les membres supérieurs en stabilisant les membres inférieurs et le tronc, grâce à des objets flottants.

L'une des hypothèses était que la flexion plantaire pouvait être améliorée par l'utilisation des palmes. Notre étude a démontré la supériorité significative de cet exercice par rapport aux autres. De plus, les données mesurées hors de l'eau en flexion plantaire maximale sont semblables à celles obtenues avec les palmes (tableau 9, en annexe). Le coefficient de corrélation entre la mesure en palmes et celle du goniomètre est de 0,80, et la différence absolue moyenne est de 3,2°. Marty Hull, inventeur de palmes d'entraînement spécifiques à la natation (Zoomers ©), explique que ces objets permettent de nager plus vite en amplifiant la force exercée par l'eau sur le corps (Hull, 1990). Plus les palmes sont petites et rigides, plus l'eau amène le pied en flexion plantaire maximale et plus le pied doit forcer pour passer en flexion dorsale. Le nageur travaille donc plus sur ses muscles et ses articulations.

En calculant les coefficients de corrélation entre les deux pieds, il a également été démontré que la natation est un sport symétrique. Bien que le crawl soit une nage dissymétrique, les mouvements sont cycliques. Les actions de chaque côté sont similaires mais décalées dans le temps.

Limites de l'étude

Malheureusement, le nombre restreint de sujets et la technologie employée ne permettent pas de valider entièrement toutes les hypothèses. Le chariot étant poussé par

un opérateur, la caméra n'est pas toujours à la même distance du repère fixé et la prise de vue n'est donc pas toujours parfaitement latérale. L'angle expérimental retenu ne prend pas compte de la rotation de la hanche présente lors de certains battements (surtout chez les experts). De nombreuses images n'ont pas été traitées à cause de ce phénomène. Une variation du rythme et de l'amplitude des battements à cette vitesse est constatée chez les experts mais n'entraîne pas de variation significative de l'amplitude de la cheville. La rotation du bassin entraînant une rotation du pied vers l'intérieur est un biais expérimental important, toutefois le peu de matériel à disposition ne permet pas de le contrer. Un dispositif de capteurs couplé à un système de caméras tridimensionnel apporterait une plus grande précision sur le mouvement de varus équin, mais le milieu aquatique ne s'y prête guère.

L'autre biais expérimental vient de l'utilisation de la cassette VHS pour stocker les données. Un système numérique aurait été plus adéquat pour la précision visuelle, mais son coût et sa mise à l'eau auraient nécessité un dispositif difficile et contraignant. Les données étaient analysées par un goniomètre directement placé sur l'écran de la télévision, la précision étant moindre que celle d'un ordinateur.

Conclusion

En résumé, la séniorité du nageur constitue un facteur de flexibilité de la cheville lors du battement descendant en crawl. S'appuyant sur des recherches antérieures, la présente étude confirme que la position horizontale du corps dépend en partie de la direction des surfaces propulsives. Le maintien d'une équilibration avec le minimum

d'effort est donc un ingrédient important de la performance. Ainsi, pour nager vite, il faut propulser efficacement de l'eau vers l'arrière, tout en diminuant au maximum les résistances à l'avancement.

Cette étude confirme le rôle d'un entraînement soutenu dans la flexibilité de la cheville. Cependant, les causes des effets de la pratique régulière sur l'efficacité apparente du battement de jambes ne sont pas expliquées. Lors de l'entraînement, l'utilisation de la planche pour améliorer la flexibilité articulaire de la cheville n'apparaît pas être plus efficace que la nage complète, à vitesse moyenne. Il serait utile de suivre un groupe de nageurs débutants afin de comprendre le mécanisme améliorant la laxité de la cheville et ses effets sur la performance. L'utilisation de palmes, objet souple procurant une propulsion importante, pourrait en être une solution pour les nageurs les moins souples. Toutefois, la réalisation d'une étude longitudinale est nécessaire à l'approbation de cette hypothèse. Comme le suggère Healey (1970), la pratique régulière d'étirements en fin d'entraînement de natation pourrait également être un autre facteur d'amélioration.

RÉFÉRENCES

- Adrian MJ, Singh M, Karpovich PV (1966). Energy cost of leg kick, arm stroke, and whole crawl stroke. *Journal of Applied Physiology*, 21, 1763-1766.
- Barthels K, Adrian MJ (1974). Three-dimensional spatial hand patterns of skilled butterfly swimmers. *Proceedings of the Second International Symposium on Biomechanics in Swimming* (pp. 154-160), Bruxelles : University Park Press.
- Bell RD, Hoshizaki TB (1981). Relationships of age and sex with range of motion of seventeen joint actions in humans. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences*, 6, 202-206.
- Boone DC, Walker JM, Perry J (1981). Age and sex differences in lower extremity joint motion. *Proceedings of the National Conference, American Physical Therapy Association*. Washington DC.
- Chollet D (1997). *Approche scientifique de la natation*. Paris : Vigot.
- Costill DL, Maglischo JE, Richardson AB (1992). *La Natation*. Paris: Vigot.
- Counsilman JE (1968). *The Science of Swimming*. New Jersey : Prentice-Hall.
- Counsilman JE (1971). The Application of Bernoulli's Principle to Human Propulsion in Water. *Proceedings of the First International Symposium on "Biomechanics in Swimming, Water-Polo and Diving* (pp. 59-71), Bruxelles.
- Diméglio A, Hérisson C, Simon L (1998). *Le pied de l'enfant et de l'adolescent*. Paris : Masson.
- Gribenski A (1980). Equilibration. *Encyclopaedia Universalis* (p. 394-398). Paris.
- Healey JH (1970). A comparative study to determine the relationship between plantar flexion at the ankle joint and success in selected skills in swimming. Mémoire de maîtrise inédit, University of Utah.
- Holmer I (1972). Oxygen uptake during swimming in man. *Journal of Applied Physiology*, 33,502-509.
- Hull M (1990). The Physics of swimming faster. *Swimming Technique*, 25,25-31.
- Maglischo EW (2003). *Swimming Fastest*, Champaign : Human Kinetics.

- Mookerjee S (1995). Relationship between isokinetic strength, flexibility, and flutter kicking speed in female collegiate swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 9, 71-74.
- Nigg BM, Fisher V, Allinger TL (1992). Range of motion of the foot as a function of age, *Foot and Ankle*, 613-336.
- Norkin C, White J (2003). *Measurement of Joint Motion, A Guide to Goniometry*. Philadelphia : F.A. Davis.
- Palmer ML (1985). *Science de l'enseignement de la natation*. Paris : Vigot
- Pelayo P (2004). Une simple affaire de technique. *Toute la natation*, 50, 29-32.
- Robertson DF (1960). Relationship of strength of selected muscle groups and ankle flexibility to the flutter kick in swimming. Mémoire de maîtrise inédit, University of Iowa.

ANNEXE A

Anatomie de la cheville

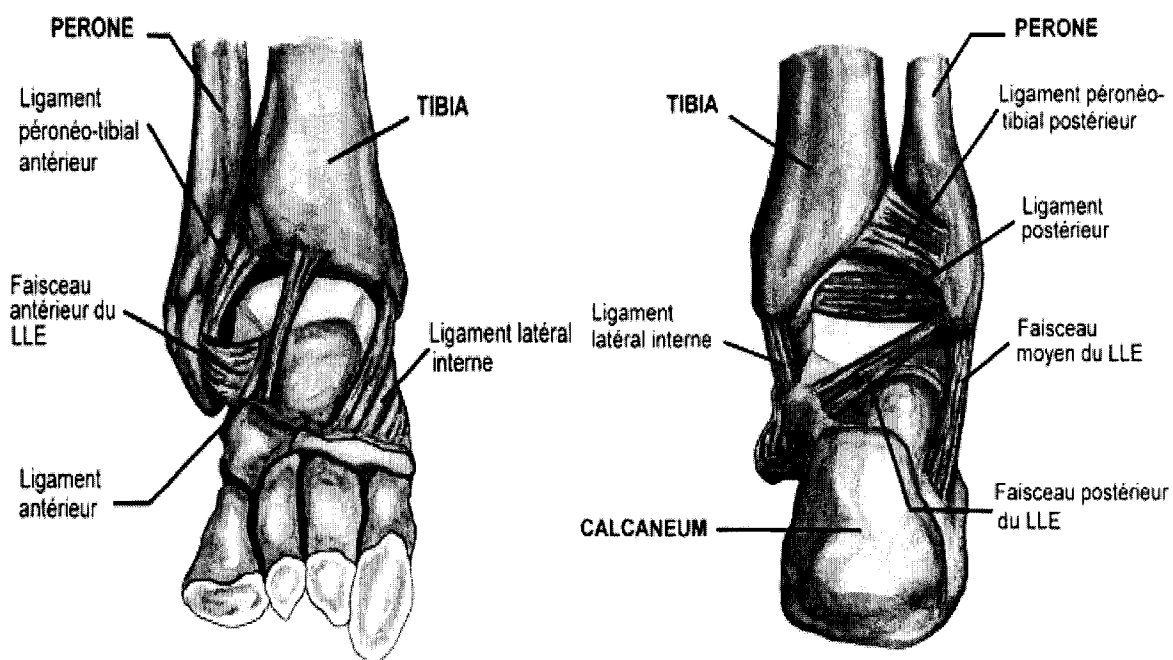


Figure 8 : Vue antérieure et postérieure de la cheville

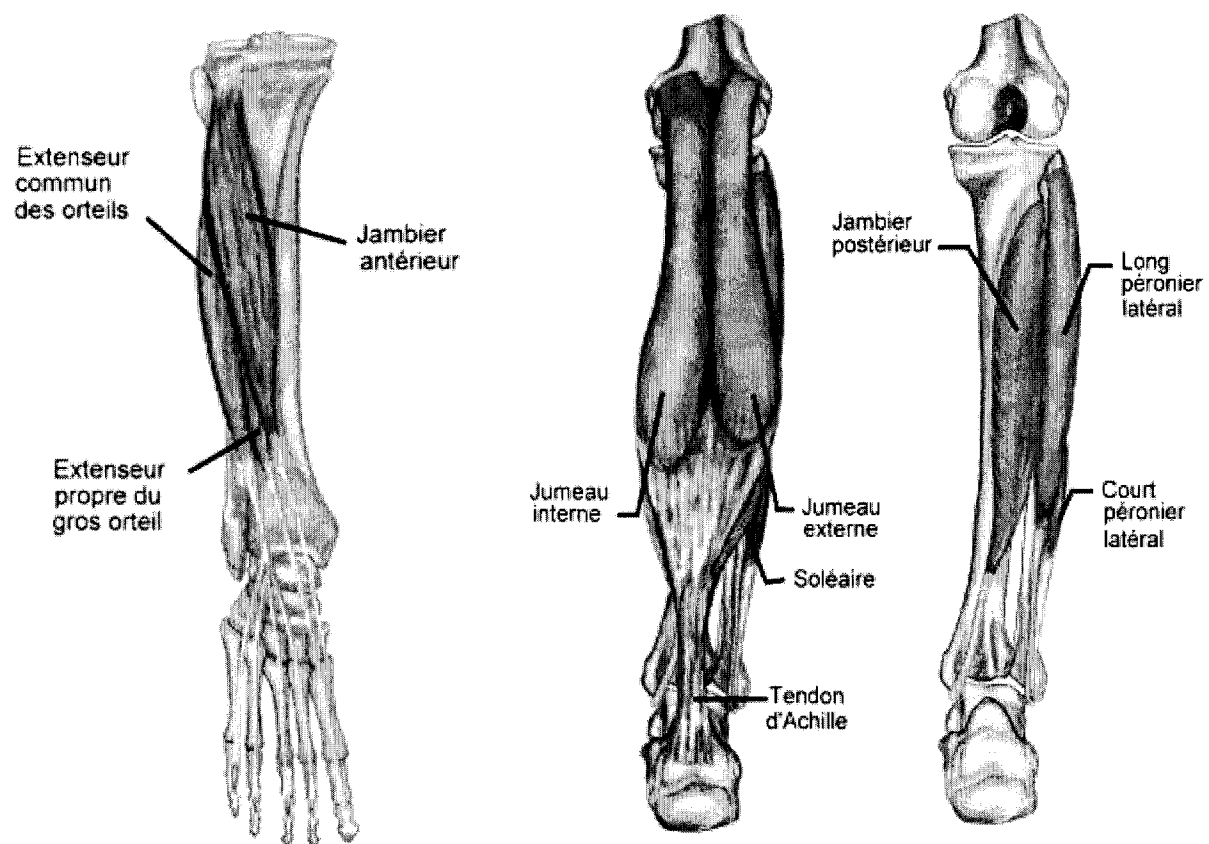


Figure 9 : Muscles extenseurs, triceps sural et muscles de posture extrinsèque

ANNEXE B

Données brutes

Tableau 7

Angles de la cheville pour tous les sujets (pour cinq prises de vue), avec corrélation
gauche-droite

| | NC | Bras | Jambes | Palmes | | NC | Bras | Jambes | Palmes |
|---|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Gauche | 151,2 | 147,4 | 155,0 | 152,8 | Droite | 152,4 | 145,4 | 157,8 | 155,4 |
| | 155,8 | 142,8 | 161,2 | 164,0 | | 156,2 | 146,0 | 164,0 | 163,8 |
| | 164,6 | 155,4 | 160,4 | 171,6 | | 163,4 | 154,8 | 162,4 | 172,6 |
| | 155,0 | 151,2 | 162,0 | 167,0 | | 157,8 | 148,2 | 162,0 | 165,8 |
| | 157,6 | 151,2 | 161,6 | 166,0 | | 157,2 | 153,2 | 162,0 | 165,8 |
| | 157,2 | 152,4 | 155,2 | 161,8 | | 156,2 | 152,8 | 155,2 | 157,0 |
| | 163,8 | 153,2 | 158,6 | 159,0 | | 163,4 | 153,8 | 158,2 | 160,6 |
| | 154,4 | 152,6 | 157,8 | 159,2 | | 158,2 | 149,8 | 159,6 | 159,6 |
| | 159,8 | 166,0 | 168,2 | 172,4 | | 161,0 | 159,8 | 167,2 | 170,6 |
| | 154,0 | 148,8 | 156,2 | 168,4 | | 154,6 | 143,8 | 158,8 | 166,0 |
| | 170,4 | 163,8 | 170,8 | 171,4 | | 173,4 | 161,8 | 171,6 | 171,0 |
| | 168,8 | 161,6 | 171,8 | 168,2 | | 169,2 | 163,8 | 171,8 | 170,6 |
| | 170,2 | 163,6 | 169,8 | 174,8 | | 168,6 | 161,8 | 172,0 | 172,6 |
| | 163,2 | 153,8 | 165,2 | 168,8 | | 161,8 | 158,6 | 165,2 | 169,4 |
| | 169,8 | 169,2 | 172,0 | 173,0 | | 167,6 | 167,4 | 170,0 | 172,0 |
| | 169,2 | 161,2 | 171,4 | 175,8 | | 168,8 | 159,8 | 170,6 | 173,8 |
| | 169,8 | 160,8 | 166,2 | 169,4 | | 170,2 | 158,8 | 166,0 | 168,4 |
| | 173,4 | 169,2 | 171,8 | 174,8 | | 173,2 | 169,2 | 172,0 | 173,6 |
| | 170,2 | 160,2 | 166,4 | 171,8 | | 170,2 | 160,2 | 166,2 | 171,6 |
| | 169,4 | 161,4 | 169,8 | 171,4 | | 170,0 | 161,2 | 170,8 | 170,6 |
| | 170,2 | 161,4 | 168,8 | 167,8 | | 170,8 | 161,6 | 169,2 | 167,6 |
| | 171,2 | 158,2 | 165,8 | 171,6 | | 170,2 | 157,6 | 166,8 | 171,8 |
| | 180,2 | 174,2 | 180,8 | 181,4 | | 183,2 | 171,4 | 181,8 | 181,0 |
| | 174,8 | 166,6 | 172,2 | 176,4 | | 176,8 | 166,2 | 172,6 | 176,0 |
| | | | | | NC | Bras | Jambes | Palmes | |
| Coefficient de corrélation entre les deux côtés | | | | | 0,979 | 0,950 | 0,983 | 0,969 | |

Tableau 8

Moyenne par modalité et par sujet

| Sexe (A) | Âge (B) | | Modalités (C _R) | | | |
|----------|-------------|---|-----------------------------|-------|--------|--------|
| | | | NC | Bras | Jambes | Palmes |
| Hommes | 10 - 11 ANS | 1 | 151,8 | 146,4 | 156,4 | 154,1 |
| | | 2 | 157,6 | 151,2 | 161,6 | 166,0 |
| | | 3 | 163,6 | 153,5 | 158,4 | 159,8 |
| | | 4 | 156,3 | 151,2 | 158,7 | 159,4 |
| | 14 - 16 ANS | 1 | 154,3 | 146,3 | 157,5 | 167,2 |
| | | 2 | 169,0 | 162,7 | 171,8 | 169,4 |
| | | 3 | 169,4 | 162,7 | 170,9 | 173,7 |
| | | 4 | 162,5 | 156,2 | 165,2 | 169,1 |
| | 18 - 25 ANS | 1 | 170,0 | 159,8 | 166,1 | 168,9 |
| | | 2 | 173,3 | 169,2 | 171,9 | 174,2 |
| | | 3 | 170,2 | 160,2 | 166,3 | 171,7 |
| | | 4 | 169,7 | 161,3 | 170,3 | 171,0 |
| Femmes | 10 - 11 ANS | 1 | 156,0 | 144,4 | 162,6 | 163,9 |
| | | 2 | 164,0 | 155,1 | 161,4 | 172,1 |
| | | 3 | 156,4 | 149,7 | 162,0 | 166,4 |
| | | 4 | 156,7 | 152,6 | 155,2 | 160,2 |
| | 14 - 16 ANS | 1 | 160,4 | 162,9 | 167,7 | 171,5 |
| | | 2 | 171,9 | 162,8 | 171,2 | 171,2 |
| | | 3 | 168,7 | 168,3 | 171,0 | 172,5 |
| | | 4 | 169,0 | 160,5 | 171,0 | 174,8 |
| | 18 - 25 ANS | 1 | 170,5 | 161,5 | 169,0 | 167,7 |
| | | 2 | 170,7 | 157,9 | 166,3 | 171,7 |
| | | 3 | 181,7 | 172,8 | 181,3 | 181,2 |
| | | 4 | 175,8 | 166,4 | 172,4 | 176,2 |

Tableau 9

Comparaison entre les mesures avec les palmes et celles obtenues par le goniomètre

| | | | Palmes | Goniomètre | Différence |
|-----------------------------|-------------|-------|--------|------------|------------|
| Hommes | 10 - 11 ANS | 1 | 154,1 | 160 | 5,9 |
| | | 2 | 166,0 | 165 | -1,0 |
| | | 3 | 159,8 | 160 | 0,2 |
| | | 4 | 159,4 | 165 | 5,6 |
| | 14 - 16 ANS | 1 | 167,2 | 165 | -2,2 |
| | | 2 | 169,4 | 175 | 5,6 |
| | | 3 | 173,7 | 170 | -3,7 |
| | | 4 | 169,1 | 170 | 0,9 |
| | 18 – 22 ANS | 1 | 168,9 | 170 | 1,1 |
| | | 2 | 174,2 | 180 | 5,8 |
| | | 3 | 171,7 | 170 | -1,7 |
| | | 4 | 171,0 | 175 | 4,0 |
| Femmes | 10 - 11 ANS | 1 | 163,9 | 170 | 6,1 |
| | | 2 | 172,1 | 170 | -2,1 |
| | | 3 | 166,4 | 165 | -1,4 |
| | | 4 | 160,2 | 155 | -5,2 |
| | 14 - 16 ANS | 1 | 171,5 | 165 | -6,5 |
| | | 2 | 171,2 | 170 | -1,2 |
| | | 3 | 172,5 | 175 | 2,5 |
| | | 4 | 174,8 | 170 | -4,8 |
| | 18 - 22 ANS | 1 | 167,7 | 170 | 2,3 |
| | | 2 | 171,7 | 175 | 3,3 |
| | | 3 | 181,2 | 180 | -1,2 |
| | | 4 | 176,2 | 175 | -1,2 |
| Coefficient de corrélation | | 0,809 | | | |
| Différence absolue moyenne | | 3,168 | | | |
| Différence absolue maximale | | 6,1 | | | |