



Apport du profilage force-vitesse pour l'évaluation du transfert de la préparation physique à sec vers la performance en natation sprint de haut niveau

Yannis Raineteau

► To cite this version:

Yannis Raineteau. Apport du profilage force-vitesse pour l'évaluation du transfert de la préparation physique à sec vers la performance en natation sprint de haut niveau. Education. Université Rennes 2, 2025. Français. [⟨NNT : 2025REN20008⟩](#). [⟨tel-05157833⟩](#)

HAL Id: tel-05157833

<https://theses.hal.science/tel-05157833v1>

Submitted on 11 Jul 2025

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.



HAL Authorization

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE RENNES 2

ECOLE DOCTORALE N° 646

*Education, Langages, Interactions, Cognition, Clinique,
Expertise*

Spécialité : STAPS

Par **Yannis RAINETEAU**

Apport du profilage force-vitesse pour l'évaluation du transfert de la préparation physique à sec vers la performance en natation sprint de haut niveau

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le 1er Avril 2025

Unité de recherche : Laboratoire Mouvement, Sport, Santé (M2S)

Rapporteurs avant soutenance :

Jean-Benoît MORIN
Jeanne DEKERLE

Professeur, Université Jean Monnet (Saint-Etienne)
Maître de conférences et HDR, Université de Brighton

Composition du Jury :

Examineurs :
Frédérique HINTZY
Caroline NICOL
Robin PLA

Professeure, Université Savoie Mont Blanc (Chambéry)
Professeure, Aix-Marseille Université
Docteur, Membre expert de la Fédération Française de Natation

Directeur de thèse : Benoît BIDEAU
Co-directeur de thèse : Guillaume NICOLAS

Professeur, Université Rennes 2
Maître de conférences, Université Rennes 2

REMERCIEMENTS

Je voudrais commencer par remercier la **Dr Jeanne Dekerle** et le **Pr Jean-Benoît Morin** d'avoir accepté de mettre leur expertise à contribution dans ce travail de thèse au travers leur rôle de rapporteurs. Je remercie également la **Pr Frédérique Hintzy** et la **Pr Caroline Nicol** d'avoir accepté d'examiner cette thèse. Nul doute que nos échanges pourront permettre d'améliorer la qualité du travail et me serviront dans la suite de mes réflexions sur le sujet.

Je tiens à remercier les membres de l'encadrement de ces travaux. Merci **Benoît Bideau** pour ton appui logistique lors du déroulé de cette thèse. Ta capacité à trouver des solutions aux situations compliquées que peut vivre un doctorant a été précieuse. Merci **Guillaume Nicolas** pour ta rigueur et ton perfectionnisme scientifique, la qualité des papiers publiés et des publications à venir en a été grandement impactée. Merci **Nicolas Bideau** d'avoir su apercevoir la direction et la forme globale que je voulais donner à cette thèse, je me suis senti compris dans mon travail grâce à nos échanges. Enfin, un grand merci également à **Robin Pla**. La production de tous ces travaux de thèse a été le fruit de ta disponibilité sans faille, ta capacité à mettre en relation les personnes, et ton implication sans égale dans tous les sujets concernant la natation et le sport de manière générale. Ton encadrement pendant ces années de thèse a été une source d'inspiration professionnelle et humaine pour moi. Les opportunités que tu m'as offertes dans le monde de la natation de haut niveau m'étaient inimaginables et je ne suis pas près de les oublier.

Merci aux acteurs financiers de cette thèse. Merci à l'EUR Digisport, et plus particulièrement aux porteurs de ce projet : **Benoît Bideau, Richard Kulpa** et **Françoise Rannou – Bekono**, d'avoir créé un cadre favorable au confort des doctorants, tant sur les aspects financiers qu'humains et matériels. J'espère que mes contributions scientifiques et ma participation à la vie étudiante et professionnelle de l'EUR auront été à la hauteur du soutien que vous m'avez apporté. Merci à la Fédération Française de Natation qui m'a permis, au travers des aides financières, de pouvoir me déplacer partout en France et à l'international pour pouvoir récolter des données et participer à différentes actions d'optimisation de la performance. En particulier, merci **Denis Auguin, Julien Issoulié** et **Rémi Duhautois** de m'avoir permis un contact privilégié avec la haute performance durant ces trois années.

Merci à tous les entraîneurs et préparateurs physiques avec qui j'ai eu l'honneur de collaborer dans le cadre de cette thèse et en dehors. En particulier, merci **Aliénor** et **Gaëtan Lainé, Antoine Fournot, Camille Fontaine, Cyril Vieu, Fabien Leblond, Federico Brumana, Martin Encinas, Mathieu Neuillet, Morgan Dufour, Philippe Schweitzer** et **Yoris Grandjean** pour votre confiance. Vous avez tous joué un rôle extrêmement important dans ce travail par votre engagement. Merci **Karim Bousalem**, tu as été l'un des instigateurs de ce travail grâce à tes enseignements sur l'entraînement de nageurs de haut niveau que tu m'as offerts pendant mes deux années de Master. Merci aux nageurs pour

leur implication lors des manip, en particulier merci **Florent Manaudou** pour ta confiance, collaborer avec toi pendant une saison a été une expérience enrichissante.

Merci à l'ensemble des membres du service Optimisation de la Performance de la FFN. Nos échanges étaient intéressants, inspirants et drôles. En particulier, merci à **Alexia, Camille, Clément, Nathan et Simon** pour les bons moments passés en compétition, en séminaire ou en session de tests. Je souhaite à tout le monde d'avoir des collègues comme vous ! Merci aux conseillers techniques de la Fédération que j'ai eu le plaisir de côtoyer : **Benjamin, Cécile, Céline, Eric D, Eric R, Mathias, Pierre et Séverine**. Je vous dois une partie de ce travail grâce à des échanges qui m'ont construit professionnellement et grâce à des moments de vie agréables.

Merci à la « Team M2S ». Merci à l'ensemble de l'équipe **d'enseignants chercheurs** pour leurs discussions constructives et les bons moments échangés. Merci au personnel administratif : **Carole, Gaelle, Joelle, Nathalie**. Vous êtes indispensables à la vie du labo, votre disponibilité et votre générosité étaient d'une grande aide dans ce travail. Merci **Ricardo** pour l'aide apportée sur tous les aspects théoriques qui concernent la natation. Un grand merci aux **collègues doctorants, ingénieurs**. Plus que des collègues, vous êtes de véritables amis qui ont fait du laboratoire un lieu de vie exceptionnel. Les pauses café, les déjeuners, les soirées, les sorties vélo, course à pied, les séances de musculation au garage ou tout autre moment passé ensemble resteront des souvenirs heureux gravés dans ma mémoire.

Merci à la « Team SEPHN » : **Iwen, Jeremy, Quentin et Vincent**. Nos relations depuis le Master ont inspiré une partie de ces travaux ainsi que ma vision actuelle de la performance. J'ai apprécié également pouvoir discuter de beaucoup d'autres sujets avec vous.

Un grand merci à **Annaëlle**, nous avons pu partager tant de choses inoubliables en plus de notre passion commune pour les sciences du sport. Tous les moments passés avec toi étaient des parenthèses de sérénité, dans les bons moments comme dans les moments difficiles de la thèse. Merci à ta famille, **Olivier, Delphine, Léandre** : votre accueil chaleureux en toutes circonstances me mettait du baume au cœur. Enfin, je souhaite remercier chaleureusement ma famille, mes proches. **Papa, Maman, Joshua, Evanne, Johann, Margotte**. Bien sûr, votre implication dépasse le cadre de ce travail et je ne pourrai jamais vous remercier assez de ce que vous m'avez apporté depuis tout petit. Les valeurs que vous m'avez inculquées ont raisonné et continueront de raisonner dans la façon que j'ai de travailler et plus globalement dans ma façon d'envisager le monde autour de moi.

DIFFUSION DES RÉSULTATS

Ce travail de thèse a fait l'objet des publications et communications suivantes.

Publications en relecture ou acceptées dans des revues internationales à comité de lecture en lien avec la thématique :

- **Raineteau, Y.**, Pla, R., Bideau, B., Bideau, N., & Nicolas, G. From dry-land to the water: Training and testing practices of strength and conditioning coaches in high level French sprint swimmers. *Frontiers in Sports and Active Living* – **Publiée**
- **Raineteau, Y.**, Nicolas, G., Bideau, B., Bideau, N., & Pla, R. Associations between load-velocity profiling and race parameters of elite swimmers in the 100 and 200m freestyle events. *Frontiers in Sports and Active Living* – **Publiée**
- **Raineteau, Y.**, Pla, R., Bideau, B., Bideau, N., & Nicolas, G. Are dry-land force-velocity abilities related to in-water load-velocity profiles? A study on high-level sprint swimmers. *European Journal of Sport Science* – **Soumise**
- **Raineteau, Y.**, Pla, R., Bideau, B., Bideau, N., & Nicolas, G. Maximal strength training effects on dry-land force-velocity characteristics, swimming load-velocity profiles and drag parameters. *Journal of Strength and Conditioning Research* – **Soumise**
- **Raineteau, Y.**, Nicolas, G., Bideau, B., Bideau, N., & Pla, R. Monitoring dry-land force-velocity profiles and in-water load-velocity profiles over the season: a case study on five elite swimmers. *International Journal of Performance Analysis in Sport* – **En cours de rédaction**

Publications en relecture ou acceptées dans des revues internationales à comité de lecture sur des thématiques différentes :

- Pla, R., Leroy, A., **Raineteau, Y.**, & Hellard, P. International Swimming League: Do Successive Events Lead to Improve Swimming Performance? *International Journal of Sports Physiology and Performance* – **Publiée**
- Pla, R., **Raineteau, Y.**, Barbier, X., & Aubry, A. Physiological Key Determinants of Elite Open-Water Swimmers - **Publiée**

Congrès internationaux avec actes :

- **Raineteau, Y.**, Peterson Silveira, R., Bideau, B., Bideau, N., Pla, R., Nicolas, G., The relationship between load-velocity profiles and spatiotemporal parameters in elite 100 m and 200 m freestyle swimmers *European Congress of Sport Science*, Paris, France, Juillet 2023 - **Poster**

- **Raineteau, Y.**, Nicolas, G., Duchateau, C., DERNONCOURT, E., Peterson Silveira, R., Bideau, B., Bideau, N., & Pla, R. The relationships between dry-land force-velocity profiles and front crawl load-velocity profiles in elite swimmers. *XIVth International Symposium on Biomechanics and medicine in swimming*, Leipzig, Allemagne, Septembre 2023, p. 421 – **Communication orale**

Conférences :

- **Raineteau, Y.**, Transfert des programmes d'entraînement à sec en vue de l'optimisation de la performance en natation sprint. *Séminaire Préparation Physique, Fédération Française de Natation*, INSEP, Paris, France, Octobre 2023

LEXIQUE DES ABRÉVIATIONS

IRM : charge maximale sur une seule répétition

D_a : Force de traînée active

DC : Développé couché

$F_{\max}$: Force maximale théorique (ex situ)

F_{prop} : Force propulsive (in situ)

F-V : Force-vitesse

GC : Groupe contrôle

GE : Groupe expérimental

η_P : Efficacité propulsive

IVV : Variations de la vitesse instantanée

K_a : Coefficient de traînée active

L_0 : Charge maximale théorique (in situ)

L-V : Charge-vitesse

$P_{\max}$: Puissance maximale théorique (ex situ)

SJ : Squat Jump

SL : Distance par cycle (in situ)

SR : Fréquence de nage (in situ)

TA : Tirage allongé

TV : Tirage vertical

$V_{\max}$: Vitesse maximale théorique (ex situ)

V_0 : Vitesse maximale théorique (in situ)

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	11
CADRE THÉORIQUE.....	15
1. LA NATATION SPRINT : ANALYSE DE L'ACTIVITÉ ET FACTEURS DE PERFORMANCE.....	16
1.1. Description de l'activité.....	16
1.2. Normes de classification nationales et internationales des nageurs élités	16
1.3. Les facteurs de la performance en natation sportive.....	18
2. LA PRÉPARATION PHYSIQUE AU COEUR DE LA PERFORMANCE EN NATATION	33
2.1. Bases fondamentales de la préparation physique	33
2.2. Adaptations à l'entraînement et méthodes de développement.....	35
2.3. Corrélations entre les qualités physiques et la performance en natation sprint.....	38
2.4. Pratiques d'entraînement en préparation physique chez les nageurs de haut niveau....	40
3. LE TRANSFERT DE LA PRÉPARATION PHYSIQUE VERS LA NAGE.....	43
3.1. Effets du travail non spécifique à sec sur la performance et les facteurs associés	43
3.2. Approches spécifiques de l'entraînement en résistance et leurs effets sur la performance	46
3.3. Considérations en vue de l'optimisation du processus de transfert.....	49
4. PROFILAGE FORCE-VITESSE AU SERVICE DE LA PRÉPARATION PHYSIQUE ET DE L'ÉVALUATION EN NATATION.....	52
4.1. Evaluation de la relation force-vitesse : de la fibre musculaire isolée au mouvement poly-articulaire.....	52
4.2. Méthodologies d'évaluation de la force et de la vitesse en préparation physique : outils et aspects métrologiques	56
4.3. De l'importance des concepts de profils force-vitesse et charge-vitesse en natation : outils et aspects métrologiques.....	59
4.4. Applications pratiques du profilage force-vitesse en tant qu'outil d'évaluation et d'entraînement.....	67
PROBLÉMATIQUES ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE.....	71
TRAVAUX DE RECHERCHE	75
ETUDE N°1 : QUESTIONNAIRE ADRESSÉ AUX PRÉPARATEURS PHYSIQUES	76
Résumé.....	77
Introduction.....	78
Méthodes.....	79
Résultats.....	81
Discussion	88
Apports de cette étude pour la thèse.....	95
ETUDE N°2 : PROFILAGE CHARGE-VITESSE DANS L'EAU ET PARAMÈTRES DE COURSE.....	97
Résumé.....	98
Introduction.....	99
Méthodes.....	100
Résultats.....	104
Discussion	107
Apports de cette étude pour la thèse.....	109
ETUDE N°3 : PROFILAGE FORCE-VITESSE À SEC ET PROFILAGE CHARGE-VITESSE DANS L'EAU.....	110
Résumé.....	110
Introduction.....	111

<i>Méthodes</i>	111
<i>Résultats</i>	114
<i>Discussion</i>	117
<i>Apports de cette étude pour la thèse</i>	120
ETUDE N°4 : INTERVENTION EN PRÉPARATION PHYSIQUE	121
<i>Résumé</i>	121
<i>Introduction</i>	122
<i>Méthodes</i>	123
<i>Résultats</i>	126
<i>Discussion</i>	128
<i>Apports de cette étude pour la thèse</i>	132
ETUDE N°5 : MONITORING DES PARAMÈTRES FORCE-VITESSE ET CHARGE-VITESSE À HAUT NIVEAU.....	133
<i>Résumé</i>	133
<i>Introduction</i>	134
<i>Méthodes</i>	135
<i>Résultats</i>	140
<i>Discussion</i>	142
<i>Apports de cette étude pour la thèse</i>	145
DISCUSSION GÉNÉRALE	147
1. PRINCIPAUX RÉSULTATS	148
2. LIMITES	149
3. PERSPECTIVES.....	150
<i>Pour l'évolution des pratiques d'évaluation</i>	150
<i>Pour l'évolution des pratiques d'entraînement</i>	154
CONCLUSION GÉNÉRALE	159
APPLICATIONS PRATIQUES DES RÉSULTATS	161
RÉFÉRENCES	162
LISTE DES TABLEAUX	210
LISTE DES FIGURES	211
ANNEXES	215
ANNEXE A : EXEMPLE DE RAPPORTS FOURNIS AUX ENTRAÎNEURS DANS LE CADRE D'UN SUIVI DES QUALITÉS AQUATIQUES (FICHE N°1) ET À SEC (FICHE N°2).....	215
<i>Fiche n°1</i>	215
<i>Fiche n°2</i>	216
ANNEXE B : QUESTIONNAIRE DISTRIBUÉS AUX PRÉPARATEURS PHYSIQUES ET ENTRAÎNEURS CONCERNÉS PAR L'ÉTUDE N°1	220

INTRODUCTION GÉNÉRALE

De nombreux domaines influençant la performance, tels que la préparation mentale, le sommeil et la nutrition, offrent, grâce aux avancées récentes en sciences du sport, des pistes prometteuses pour optimiser la préparation des athlètes. Ces opportunités constituent autant de leviers pour les entraîneurs et les autres professionnels de l'accompagnements du sportif [Haff, 2010]. Leur principal défi réside alors dans l'intégration harmonieuse de ces moyens d'optimiser la performance à l'entraînement spécifique [Barbosa et al., 2021]. Parmi ces domaines, la préparation physique occupe une place centrale, étant communément intégrée à l'entraînement spécifique en raison de ses effets sur la préservation de l'intégrité physique des sportifs et sur la performance [Weldon et al., 2022]. En natation cette préparation physique est effectuée en dehors de l'eau par une grande majorité de nageurs, encore davantage chez le nageur élite. Son origine est parfois attribuée à Robert Kiphuth dans les années 1930, qui est alors entraîneur de l'équipe de natation à l'université de Yale aux Etats-Unis [Cureton, 1975]. Celui-ci, dépassé par le nombre de nageurs dans l'équipe universitaire et la petite taille du bassin mis à disposition, décide de mettre en place des entraînements à sec pour une partie du groupe, les deux sous-groupes se partageant tour à tour le bassin. Les résultats probants de ses nageurs en compétition à la suite de cette innovation dans la programmation d'entraînement l'amènent à pérenniser cette pratique, contribuant au succès incontestable de l'équipe universitaire. Par la suite, Kiphuth joue un rôle clé dans la diffusion de cette méthode, notamment à travers ses fonctions d'entraîneur de l'équipe américaine de natation, qu'il encadre durant six olympiades [Kevles, 2023].

Le lien étroit entre certaines qualités physiques telles que mesurées hors de l'eau (condition communément appelée "à sec" ou ex situ, dans le manuscrit) et les facteurs de performance en natation, en particulier sur les épreuves de sprint, semble justifier l'intégration d'entraînements à sec dans la préparation des nageurs. Au-delà des résultats issus de la recherche démontrant l'impact positif de ce type de travail sur la performance, cette pratique s'est imposée au plus haut niveau. Elle est ainsi devenue un aspect essentiel de l'entraînement des nageurs de sprint, l'efficacité de cette méthode étant suggérée par l'amélioration significative et concomitante des performances en sprint. Dans le contexte de la natation française, des exemples concrets illustrent l'importance de l'entraînement à sec dans la préparation de nageurs olympiques. En 2004, année où Malia Metella décroche le titre de vice-championne olympique du 50 m nage libre, son programme inclut environ 200 heures d'entraînement hors de l'eau pour près de 1 800 km nagés [Fédération Française de Natation, 2019b]. De même, en 2012, Florent Manaudou, sacré champion olympique sur la même distance, réalise cinq séances hebdomadaires d'entraînement à sec [Barnier, 2012]. Ces exemples, corroborés par des études majoritairement positives, renforcent la légitimité de cette pratique. Néanmoins les contraintes spécifiques et difficiles à appréhender de l'environnement aquatique, rendent l'organisation du travail à sec complexe pour les entraîneurs et les préparateurs physiques. De surcroît, la littérature scientifique manque encore de recommandations pratiques concernant la planification du travail à sec et le transfert des acquis vers la nage en conditions réelles [Fone & van den Tillaar, 2022; Wirth et al., 2022].

L'objectif de cette thèse est donc d'apporter une contribution scientifique et pratique à l'optimisation des programmes d'entraînement, tant à sec (ex situ) que dans l'eau (in situ). Cette démarche s'appuie notamment sur une meilleure compréhension des pratiques de terrain, des mécanismes biomécaniques et des aspects méthodologiques liés à l'entraînement et à l'évaluation des nageurs. Le profilage force-vitesse (F-V) est utilisé comme méthodologie d'évaluation ex situ permettant d'évaluer un large spectre des qualités physiques des nageurs en préparation physique. In situ, le protocole de mesure utilisé est basé sur une méthode de nage semi-attachée qui permet l'évaluation des capacités de propulsion des nageurs. Une des contributions scientifiques de cette thèse consiste à faire le lien entre les résultats issus de ces différentes méthodologies d'évaluation d'une part et la performance en natation d'autre part. Une autre contribution scientifique de ce travail concerne l'utilisation novatrice de la méthode de nage semi-attachée pour l'estimation des paramètres de traînée active.

Ces méthodologies d'évaluation des nageurs répondent à la fois à des enjeux scientifiques et pratiques grâce à la précision des mesures, à la facilité d'utilisation des outils et à la rapidité du traitement des données. Une particularité notable de ce travail de thèse réside en effet dans l'application pratique des méthodes grâce à la collaboration étroite avec la Fédération Française de Natation (FFN). Ce partenariat (financement provenant à 50% de la FFN et à 50% de l'Ecole Universitaire de Recherche Digisport) a ainsi créé des conditions de recherche favorables sur le plan scientifique et le plan logistique permettant notamment : (1) des échanges réguliers avec les nageurs, entraîneurs et préparateurs physiques, faisant ainsi émerger des questionnements pratiques et scientifiques (2) une application concrète des travaux en vue de l'optimisation directe de la performance (3) un accès privilégié à la population de très haut niveau, particulièrement précieux durant la période de préparation aux Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024. Ce travail a ainsi apporté des contributions au projet Neptune (« Natation Et Paranatation, Tous Unis pour Nos Elites »), dans le cadre du Programme Prioritaire de Recherche (PPR) « Sport de très Haute Performance » de l'ANR en vue de la préparation aux Jeux Olympiques et Paralympiques (JOP) 2024.

La démarche menée lors de ces travaux de recherche s'inscrit dans une perspective courante des sciences du sport qui consiste en partie à utiliser les résultats de la recherche comme outil d'aide à la décision, souvent sans chercher à généraliser ces résultats à une population plus large que celle étudiée [Haff, 2010]. L'implication d'athlètes de haut niveau dans un processus de recherche et d'amélioration des performances soulève alors des problématiques spécifiques, absentes lors d'études portant sur d'autres populations. Le développement du sportif élite est par exemple optimisé à un niveau si élevé que l'amélioration de certains facteurs ayant un impact sur sa performance pourrait ne pas paraître statistiquement significative [Haff, 2010; Hopkins et al., 1999]. De même, la réalisation d'études expérimentales sur ce type de public nécessite une adaptation et un contrôle particulier des contraintes

qui lui sont appliquées. La construction macroscopique de cette thèse s'est donc voulue, en partie, en adéquation avec les objectifs à court termes de la recherche appliquée en science du sport [D. Bishop et al., 2006] et les contraintes liées à l'engagement auprès des meilleurs nageurs français. Ainsi, les évaluations conduites dans le cadre de cette thèse proposent des protocoles qui aboutissent à des rapports détaillés (cf. Annexe A) et des recommandations précises aux entraîneurs tout en rendant les méthodes de mesure les moins invasives et sollicitantes possibles.

Ce manuscrit s'articule de la manière suivante : le cadre théorique constitue la première partie de ce travail et permet d'introduire le fondement scientifique des travaux menés. Ce cadre théorique permet d'aboutir aux objectifs et aux problématiques auxquelles cette thèse tente de répondre et qui constituent la deuxième partie du manuscrit. Dans la troisième partie, les contributions expérimentales de cette thèse sont présentées. Elles sont articulées autour de cinq études concordantes avec les objectifs cités précédemment. Une première étude, ayant pour point de départ les conduites de terrain, devait permettre d'explorer les pratiques contemporaines en préparation physique à sec et dans l'eau. Deux autres études observationnelles avaient pour but de mettre en lien différentes variables, à la fois à sec et dans l'eau, afin de mieux appréhender leur utilité dans le suivi des qualités physiques et techniques des nageurs. Une étude interventionnelle devait ensuite permettre d'évaluer les effets d'un programme en préparation physique sur des variables mesurées à sec et dans l'eau. La dernière phase expérimentale est une étude de cas de nageurs de haut niveau, dont certains en préparation des JOP de Paris 2024, permettant une mise en application pratique des conclusions tirées des précédentes études. Enfin, la discussion générale met en perspective les principaux résultats afin d'éclairer les contributions scientifiques et pratiques de la thèse.

CADRE THÉORIQUE

1. La natation sprint : analyse de l'activité et facteurs de performance

1.1. Description de l'activité

La performance en natation course repose sur la capacité à se déplacer le plus vite possible dans un environnement aquatique délimité, qu'il s'agisse d'un bassin de 25 mètres (petit bassin) ou d'un bassin de 50 mètres (grand bassin). Ce déplacement peut s'effectuer dans 4 styles de nage différents : le papillon, le dos, la brasse et la nage libre. Certaines épreuves combinent également les quatre styles dans une même course (épreuves de quatre nages). Les distances à effectuer en compétition varient en fonction des styles de nage : de 50 à 1500 m en nage libre, de 50 à 200 m en papillon, dos et brasse et de 100 à 400 m en quatre nages. Lors des compétitions officielles, les nageurs et nageuses peuvent ainsi s'illustrer sur 18 épreuves individuelles différentes lors des compétitions officielles en petit bassin, 17 en grand bassin (le 100 m quatre nages n'existant pas en grand bassin) et 14 lors des Jeux Olympiques (les courses de 50 m papillon, dos et brasse n'étant pas disputées lors de cette compétition) qui se déroulent exclusivement en grand bassin [World Aquatics, 2024a]. Ces courses sont habituellement décrites en 4 phases dans la littérature : la phase de départ qui comprend le temps de réaction, le plongeon ainsi que la coulée durant laquelle le nageur est immergé, la phase nagée durant laquelle le nageur se déplace à la surface, la phase de virage et la phase d'arrivée [Arellano et al., 1994]. Bien que le découpage de ces phases ne soit pas standardisé, il est souvent établi à partir de distances repères [Gonjo & Olstad, 2020; Vantorre et al., 2014]. La contribution relative de ces phases au temps total de course varie selon la distance : les phases non nagées (départ, coulée et virages) occupent une proportion croissante à mesure que la distance diminue [Lyttle & Benjanuvatra, 2005]. La phase nagée représente néanmoins, pour toutes les distances de course en grand bassin, la phase la plus importante au regard du temps de course total. Les vitesses atteintes, aussi bien pendant la phase nagée que lors des autres phases, dépendent du niveau des nageurs [Gonjo & Olstad, 2023]. Ces études, principalement centrées sur des nageurs élites, soulignent l'importance de caractériser cette population en s'appuyant sur les normes de classification spécifiques qui lui sont attribuées.

1.2. Normes de classification nationales et internationales des nageurs élites

L'un des objectifs de la recherche en sciences du sport est d'optimiser les performances des sportifs à travers l'approfondissement des connaissances sur les nombreux facteurs susceptibles d'influencer la performance, notamment le développement et la récupération des ressources physiques et mentales du sportif [D. Bishop et al., 2006; Haff, 2010]. Les recommandations issues de ces travaux, nourries par les interactions entre le milieu scientifique et le terrain, peuvent s'adresser aux sportifs de tous niveaux [Stone et al., 2004]. Néanmoins, le contexte extrêmement concurrentiel de la natation de haut niveau, illustré par la densification croissante des résultats [Mallett et al., 2021], souligne l'importance particulière des approches dédiées à l'optimisation de la performance qui peuvent

favoriser des gains marginaux décisifs pour atteindre le haut niveau. Ce constat invite à s’interroger sur la caractérisation des populations de pratiquants au travers de leurs niveaux et les facteurs de performance associés.

La catégorie “Élite” de nageurs au niveau national en France correspond à un niveau de performance défini par la qualification aux Championnats de France N1. La qualification peut être obtenue soit par un classement, soit par la réalisation d’un temps de référence inscrit dans une grille de qualification spécifique [Fédération Française de Natation, 2024]. Cependant, l’ensemble des nageurs catégorisés « élite » en France présentent parfois des niveaux hétéroclites à l’ensemble des nageurs catégorisés comme tels auprès de nations différentes.

Au niveau international, l’instance réglementaire World Aquatics a ainsi mis en place un système de définition des performances au travers de points qui permet de comparer les performances de toutes les épreuves individuelles, indépendamment de la nage, de la distance ou du sexe du participant [Gomes & Henriques-Rodrigues, 2018]. Ce système de classification, actualisé chaque année, a pour référence les temps des records du monde (WR) pour chaque épreuve et le calcul des points (P) attribués à une performance chronométrique (T) est le suivant [World Aquatics, 2024b] :

$$P = 1000 \times \left(\frac{WR}{T} \right)^3 \quad (1)$$

Ce système, utile aux fédérations et aux nageurs pour la définition des performances de haut niveau a cependant une limite qui réside dans l’utilisation d’un unique point de référence représenté par le temps du record du monde. Cela peut engendrer des déséquilibres entre les différentes épreuves, ce qui peut être corrigé par un calcul de probabilité d’atteinte d’une performance seuil comme proposé par Gomes et Henriques-Rodrigues en 2018. Dans la littérature, les points attribués selon le système de World Aquatics sont utilisés dans certaines publications pour illustrer les niveaux nationaux et régionaux [Veiga et al., 2014]. Dans le but de standardiser la classification des nageurs entre les publications associées à la natation de compétition, certains auteurs [Ruiz-Navarro et al., 2023] ont proposé une nomenclature basée sur les points World Aquatics (Figure 1).

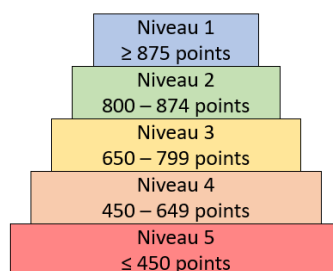


Figure 1 : Nomenclature proposée par Ruiz-Navarro et al. en 2023.

1.3. Les facteurs de la performance en natation sportive

Comme évoqué précédemment, la vitesse de déplacement lors des phases nagées et non nagées discrimine le niveau de pratique. La vitesse de déplacement produite par un nageur est essentiellement dépendante de facteurs biomécaniques et métaboliques impliquant notamment :

- la capacité à minimiser la dépense d'énergie métabolique et maximiser le travail mécanique au service d'un rendement global optimisé.
- la capacité à produire des forces de propulsion avec une efficacité élevée.
- la capacité à réduire les forces de traînées.

Ces différents facteurs, largement décrits dans la littérature [Barbosa et al., 2010; Toussaint & Beek, 1992], seront abordés dans les sections 1.3.1 à 1.3.3. À l'échelle de la progression du nageur, certains facteurs intrinsèques, liés à l'anthropométrie et à la composition corporelle, ou encore aux facteurs neuromusculaires ont aussi une importance déterminante et seront discutés en section 1.3.4. D'autres facteurs, tels que psychologiques, environnementaux ou même hormonaux, peuvent également intervenir, mais ne sont pas évoqués dans ce travail orienté vers la compréhension biomécanique de la performance en natation.

1.3.1. Facteurs métaboliques et contributions énergétiques à la performance en natation sportive

Parmi les facteurs métaboliques et bioénergétiques à l'origine de la performance en natation, le coût énergétique ainsi que la capacité à produire l'énergie métabolique occupent une place fondamentale [Toussaint & Hollander, 1994]. Le coût énergétique est défini comme la quantité d'énergie dépensée par unité de distance parcourue. En natation, ce coût énergétique est bien plus élevé que dans la plupart des activités terrestres, ce qui peut en partie être expliqué par la densité de l'eau qui est près de 800 fois supérieure à la densité de l'air. Ceci implique des forces de traînée largement supérieures et donc des vitesses maximales bien moindres dans l'eau comparé à un déplacement terrestre [Di Prampero, 1986]. Le coût énergétique dépend du style de nage. Les nages les plus économiques (c'est-à-dire les nages avec le coût énergétique le plus faible) sont le crawl, puis le dos. La brasse et le papillon sont les deux nages les moins économiques [Holmér, 1974; Rodríguez & Mader, 2011]. Le coût énergétique est donc le reflet global des demandes énergétiques de l'activité ce qui fait de la production d'énergie métabolique un facteur de performance important.

L'énergie métabolique est en effet produite grâce à différents substrats. Les provenances de cette énergie en fonction du substrat utilisé dépendent de mécanismes physiologiques différents et communément appelés les filières énergétiques. L'utilisation de ces différents substrats est dépendante de l'intensité et de la durée des efforts fournis [Di Prampero, 2003]. À intensité maximale, les différentes épreuves en natation sollicitent donc des filières énergétiques spécifiques [Capelli et al.,

1998]. C'est ainsi que les distances de courses peuvent être classées en trois catégories [Rodríguez & Mader, 2011]:

- Les distances de sprint (50 & 100 m) représentent un temps d'effort entre 21 et 65 secondes environ au meilleur niveau international, hommes, femmes et toutes nages confondues. Elles sollicitent majoritairement les filières anaérobies (Figure 2), c'est-à-dire les filières qui produisent de l'énergie rapidement en l'absence d'oxygène [Toussaint & Hollander, 1994]. En effet l'apport en oxygène est souvent assez faible voire nul puisque les nageurs respirent peu sur les courses de ces distances, particulièrement sur le 50 m. Les nageurs participants à des épreuves de ces distances utilisent l'adénosine triphosphate, la phosphocréatine et le glucose comme substrats énergétiques dominants.

- Les épreuves « mixtes » (200 & 400 m) représentent un temps d'effort compris entre 1 min 42 sec et 4 min environ au meilleur niveau international, hommes, femmes et toutes nages confondues. Elles sollicitent majoritairement la filière aérobie mais une puissance anaérobie importante est tout de même encore nécessaire pour performer.

- Les épreuves de demi-fond (800 & 1500 m) représentent un temps d'effort compris entre 7 min 40 et 15 min 47 au meilleur niveau international, hommes et femmes confondus. Elles sollicitent très majoritairement la filière aérobie (Figure 2) et les principaux substrats utilisés sont les glucides et les lipides. La contribution énergétique de cette filière aérobie peut être évaluée à partir de mesures de consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) [Gastin, 2001].

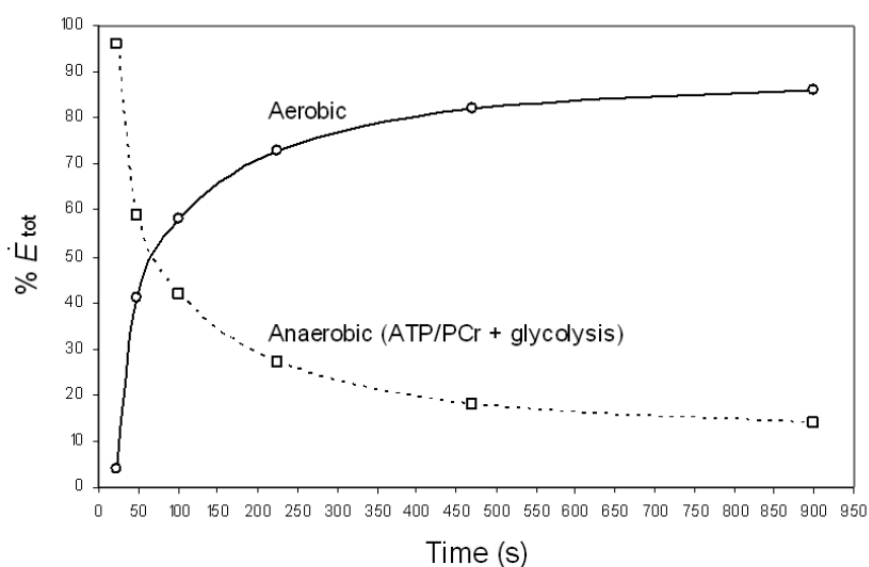


Figure 2 : Modélisation des contributions aérobie et anaérobie à la production énergétique totale en fonction de la distance de course. Les valeurs cibles représentées par des symboles correspondent aux épreuves de 50, 100, 200, 400, 800 et 1500 m nage libre homme respectivement [Rodríguez & Mader, 2011].

Sur les épreuves qui impliquent plus fortement les filières anaérobie (c'est-à-dire les épreuves de 50 et 100m), une amélioration de 10% de la puissance anaérobie conduirait donc à de meilleures performances qu'une amélioration de 10% de la puissance aérobie. Pour les épreuves au-delà c'est l'inverse [Toussaint & Hollander, 1994]. Cela montre que la production d'énergie métabolique est un facteur clé de la performance. En revanche, d'autres paramètres énergétiques sont à prendre en considération, notamment de par la nature fluide du milieu dans lequel se déplace le nageur.

1.3.2. Spécificité de la cascade énergétique en natation sportive : notions d'efficacité et d'efficacité propulsive.

La natation sportive se caractérise par la présence d'un milieu fluide induisant des déperditions énergétiques spécifiques. La spécificité de la cascade énergétique (partant de l'énergie métabolique à la production du travail mécanique) en milieu aquatique a fait l'objet de nombreux travaux, appliqués à la propulsion des poissons [Daniel, 1992] ou de l'humain [Zamparo et al., 2002, 2006]. Ainsi, en se basant sur le modèle de Daniel (1991), Zamparo et al. (2002; 2006) envisagent l'efficacité énergétique de la locomotion aquatique à partir de la notion de rendement global (η_M) (Figure 3). Celui-ci repose sur le rapport entre le travail mécanique total (W_{tot}) et la dépense énergétique (E ; mesurée à l'aide d'un système de mesure des échanges gazeux) :

$$\eta_M = \frac{W_{tot}}{E} \quad (2)$$

Dans cette équation, le travail total de la locomotion aquatique est la somme de deux termes : le travail nécessaire pour accélérer et décélérer les membres par rapport au centre de masse (travail interne, W_{int}) et le travail externe nécessaire pour vaincre les forces externes telles que les résistances hydrodynamiques (travail externe, W_{ext}) [Cavagna & Kaneko, 1977]. Une représentation schématique de la cascade énergétique appliquée à la locomotion aquatique humaine est présentée à la Figure 3 (adaptée de [Zamparo et al., 2011]).

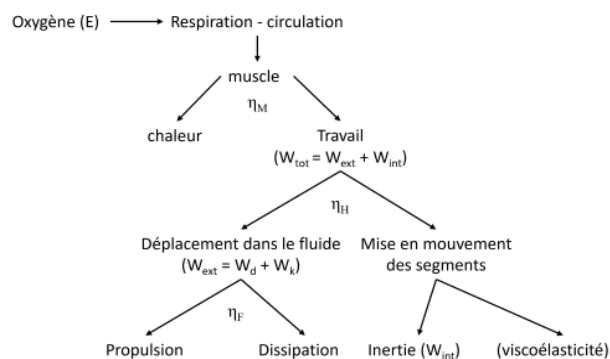


Figure 3 : Représentation schématique de la cascade énergétique appliquée à la locomotion aquatique humaine (adaptée de [Zamparo et al., 2011]).

Lors d'un déplacement en milieu aquatique, W_{ext} peut, lui-même, être subdivisé en deux termes : le travail nécessaire pour vaincre la traînée (W_d), celui-ci contribuant à la propulsion utile, et le travail associé à la mise en mouvement des particules d'eau lors des mouvements segmentaires, celui-ci ne contribuant pas à la propulsion utile (W_k) [Alexander, 1977; Daniel, 1992; Zamparo et al., 2002].

L'efficacité avec laquelle le travail mécanique global produit par le nageur est transformée en travail mécanique utile est appelée efficacité propulsive (η_P) et est défini mécaniquement par :

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

D'autres paramètres sont également décrits dans la cascade énergétique [Zamparo et al., 2011]. Ainsi, l'efficacité avec laquelle le travail mécanique global (W_{tot}) produit par le nageur est transformé en travail externe est appelé efficacité hydraulique (η_H) et est défini par :

$$\eta_H = \frac{W_{ext}}{W_{tot}} \quad (4)$$

Cette quantité est plus rarement évaluée car elle implique de quantifier le travail lié au déplacement des segments corporels, en se basant sur une analyse cinématique et un modèle mécanique dédié.

De même, l'efficacité avec laquelle le travail mécanique externe est transformé en travail mécanique utile est appelée efficacité de Froude (η_F) et est donnée par

$$\eta_F = \frac{W_d}{W_{ext}} \quad (5)$$

Il s'ensuit :

$$\eta_P = \frac{\eta_F}{\eta_H} \quad (6)$$

Par conséquent, si le travail interne est nul ou négligeable (et si l'efficacité hydraulique est proche de 1), alors

$$\eta_P = \eta_F \quad (7)$$

Ainsi, l'efficacité propulsive sera inférieure à l'efficacité de Froude si le travail interne est élevé et si l'efficacité hydraulique est faible [Alexander, 1977; Daniel, 1992; Zamparo et al., 2002]. Cette hypothèse est celle communément admise dans différents travaux, relatifs à la propulsion en crawl [Toussaint et al., 1988, 2000].

Les paramètres d'efficacité énergétique et d'efficacité propulsive sont les plus communément quantifiés pour caractériser le niveau d'expertise du nageur. L'efficacité énergétique ne semble néanmoins pas être un facteur prédominant de la vitesse de déplacement en natation. En effet, le Tableau

1 montre que pour une même quantité d'énergie métabolique produite et une différence de 23% de la vitesse de nage entre deux groupes, l'efficacité énergétique n'est pas significativement différente. En revanche, l'efficacité propulsive apparaît comme un facteur déterminant de la vitesse de nage et constitue donc un paramètre fondamental à quantifier chez les nageurs élités.

	Nageurs de compétition	Triathlètes	Niveau de significativité
Production énergétique (W)	1000	1000	-
Vitesse de nage ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1,17	0,95	0,004
Puissance mécanique produite (W)	81,3	80,4	Non significatif
Efficacité énergétique (%)	8,13	8,04	Non significatif
Puissance propulsive (W)	49,1	35,3	0,004
Efficacité propulsive (%)	60,8	43,6	0,00

Tableau 1 : Comparaison des différents paramètres énergétiques, dynamiques et spatio-temporels entre deux groupes. Les valeurs ont été normalisées pour que la production d'énergie métabolique soit équivalente (1000 W) entre les deux groupes (adapté à partir de [Toussaint, 1990]).

Ainsi, un point commun entre toutes les distances de course, décrite précédemment, réside dans le fait qu'une amélioration de 10% de l'efficacité propulsive pourrait aboutir à une amélioration encore plus importante de la performance comparée à des améliorations énergétiques, et ce peu importe la distance de course [Toussaint & Hollander, 1994]. Comme évoqué précédemment, l'efficacité propulsive est un aspect fondamental de la propulsion du nageur et est au cœur des préoccupations de l'entraîneur en natation. Etant conditionnée par les forces régissant le déplacement des nageurs, il est essentiel de fournir une description plus détaillée des contraintes biomécaniques auxquelles les nageurs sont confrontés.

1.3.3. Facteurs biomécaniques

1.3.3.1. Description des forces régissant le déplacement en natation

Lors du déplacement du nageur, certaines forces modulent significativement son avancement (forces de propulsion ou de trainée) tandis que d'autres ont un impact plus prononcé sur son équilibre (poussée d'Archimède et poids) (Figure 4). Enfin, la portance hydrodynamique, en tant que résultante des forces de pression sur la périphérie du nageur, intervient de par les mouvements du nageur et contribue également à la performance.

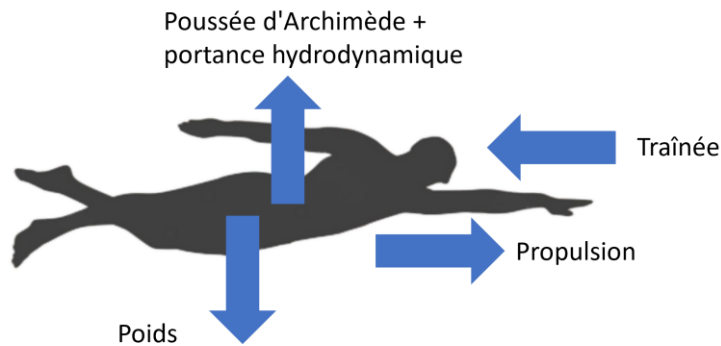


Figure 4 : Bilan des forces régissant la position et le déplacement du nageur.

Les forces de propulsion et de traînée appliquées au nageur dépendent de la vitesse de déplacement du nageur et donc de son expertise ainsi que de ses capacités physiques [Rouard et al., 1994; Toussaint, 2002]. Nous l'avons vu précédemment, la traînée est parfois décrite comme l'un des cinq facteurs les plus déterminants de la performance en natation [Toussaint & Beek, 1992]. Nous allons donc commencer par décrire les différentes formes de traînée qui s'opposent au déplacement du nageur avant d'évoquer les forces propulsives.

1.3.3.2. Traînée hydrodynamique et composantes

De manière générale, tout objet se déplaçant en milieu aquatique est soumis à une force de traînée (D) qui comporte trois composantes [Toussaint et al., 2000] :

$$D = D_f + D_p + D_v \quad (8)$$

Avec :

D_f : traînée de friction,

D_p : traînée de pression,

D_v : traînée de vague.

La première composante que subit le nageur est la traînée de friction. Cette forme de traînée est essentiellement attribuable à la viscosité de l'eau. Elle correspond à la difficulté avec laquelle les couches d'eau en mouvement glissent entre elles [Toussaint et al., 2000]. En effet, une première couche d'eau entourant directement le nageur reste en contact avec sa peau en raison des forces adhésives. Les autres couches qui s'empilent autour du nageur sont immobiles tant qu'il n'y a pas de mouvement. Lorsque le nageur se déplace, les couches d'eau stables à une certaine distance de son corps se mettent à glisser les unes par rapport aux autres pour se mettre en mouvement, créant ainsi des résistances de frictions. Lorsque les masses d'eau sont structurées comme ceci en couches, l'écoulement est dit « laminaire ». Au-delà d'une certaine vitesse, le déplacement des couches forme des turbulences qui

contrastent avec l'écoulement laminaire. Cette vitesse limite dépend de la forme et de la taille du nageur [Toussaint et al., 2000]. Ces forces de résistances peuvent par exemple être réduites grâce au rasage [Sharp & Costill, 1989]. Les combinaisons utilisées par les nageurs en compétitions, et particulièrement la génération de combinaison en polyuréthane, ont aussi pour rôle de diminuer ces résistances de friction [Chatard & Wilson, 2008].

La traînée de pression, aussi appelée traînée de forme, est le résultat d'une différence de pression, plus forte dans la zone située à l'avant du corps en mouvement que dans la zone située à l'arrière. Cette différence de pression est créée par la déstructuration des différentes couches qui se séparent de part et d'autre du corps créant ainsi des tourbillons, appelés vortex, derrière le corps. Ce type de résistance est essentiellement attribuable comme son nom l'indique à la forme du corps en mouvement, mais aussi à la surface frontale du corps et à la masse volumique de l'eau (ρ). La surface frontale (S) correspond à l'aire de la surface exposée aux résistances dans le plan frontal, c'est-à-dire vue de devant. La forme du corps est exprimée au travers du coefficient de forme (C_x). Cette traînée de pression (D_p) évolue au carré de la vitesse (v) du corps en mouvement, selon l'équation :

$$D_p = \frac{1}{2} \rho S C_x v^2 \quad (9)$$

Le troisième type de traînée est la traînée de vague. Elles se créent uniquement lorsque le nageur se déplace proche ou à la surface de l'eau. Le déplacement du nageur forme une accumulation de masses d'eau devant lui et un creux derrière, entraînant la formation d'un système de vagues. L'importance de la traînée de vagues dépend du nombre de Froude (Fr) qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces gravitationnelles dans un écoulement :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (10)$$

Avec v représentant la vitesse du système (ici le nageur), g l'accélération de la pesanteur soit $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, et L la longueur caractéristique du système (la taille du nageur en m dans notre cas).

La résistance de vagues est très dépendante de la vitesse d'avancement à la surface et de la typologie des vagues générées. De nombreuses études en hydrodynamique navale se sont intéressées à l'importance du nombre de Froude en lien avec la forme des vagues. Un exemple peut être donné pour un navire se déplaçant à la surface de l'eau [Van Manen & Van Oossanen, 1988]. À une certaine vitesse, appelée "vitesse critique" (autour de $Fr = 0.42$), la longueur d'onde des vagues (λ) égale la longueur de la ligne de flottaison du nageur (L) proportionnelle à sa taille (Figure 5.B.2.), rendant toute augmentation de vitesse extrêmement difficile en raison de l'effort nécessaire pour sortir du creux. En théorie, cette vitesse serait donc la vitesse maximale d'un nageur puisque les efforts supplémentaires fournis ne feraient qu'approfondir le creux dans lequel il se trouve [A. R. Vorontsov & Romyantsev, 2000]. D'un point de vue mécanique il existe une condition qui permet, au-delà de cette vitesse, une

augmentation moins rapide du nombre de Froude en lien avec la portance hydrodynamique [Vennell et al., 2006] qui amène le corps en déplacement à « planer » sur la vague (Figure 5.B.3.).

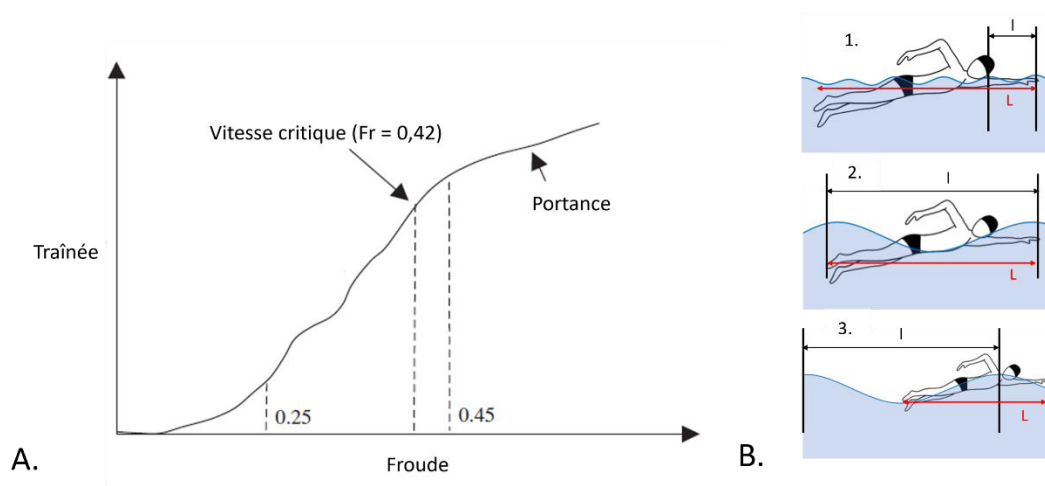


Figure 5 : Le nombre de Froude et le système de vague évoluant avec une vitesse de nage croissante. L : longueur caractéristique du système (ici le nageur); l : longueur de l'onde. A.[Vennell et al., 2006].

Ainsi, plus la vitesse du nageur augmente, plus la force de la traînée de vague occupe une part importante de la force de traînée totale. Un des moyens pour les nageurs de réduire cette forme de traînée est de garder le bras tendu devant eux sous la surface de l'eau (à l'image d'un bulbe), créant ainsi une vague supplémentaire qui vient interférer avec la vague d'étrave principale.

La traînée totale est donc une combinaison de ces trois formes de traînée. Elle peut être exprimée de manière globale selon cette équation [Toussaint et al., 2000] :

$$D = K \times v^2 \quad (11)$$

K étant un coefficient incluant ρ , S, et C_x . Nous pouvons remarquer dans cette équation que la force de traînée évolue au carré de la vitesse. Ce constat implique que la force nécessaire pour surmonter ces forces de traînée évolue de manière quadratique avec l'augmentation de la vitesse de nage ce qui souligne l'importance des qualités techniques du nageur ainsi que du développement des qualités de force à sec.

L'étude des résistances à l'avancement a constitué un pan important de la recherche en natation. Ces études ont notamment permis d'identifier la capacité à diminuer les forces de traînée comme un critère d'expertise du nageur [Kolmogorov et al., 1997]. Il a également été montré que les forces de traînées peuvent être impactées par l'entraînement en natation [Barbosa et al., 2015]. Dans le cadre de l'évaluation des nageurs, deux types de traînée différentes sont mesurées : la traînée passive et la traînée active. Chaque type de traînée est influencé par des facteurs distincts. La traînée passive est majoritairement influencée par la morphologie du nageur, sa position et son aptitude à la glisse [Cortesi

et al., 2020], tandis que la traînée passive représente majoritairement la capacité du nageur à adopter une technique lui permettant de limiter ces forces [Toussaint et al., 2000]. La traînée active semble donc la forme de traînée la plus cohérente à évaluer dans le but de mettre en lien les forces de traînée avec d'autres paramètres mesurés lors de la nage telles que la force ou l'efficacité propulsive.

L'estimation de la traînée dans toutes ses formes fait encore l'objet de nombreuses recherches du fait de la multiplicité des moyens utilisés dans cet objectif [Sacilotto et al., 2023]. Les particularités de l'activité natatoire (fluctuation de longueur caractéristique du système, prédominance des phénomènes instationnaires et écoulements turbulents, évolutions réglementaires, matérielles et des techniques de nages) ouvrent également beaucoup de questions de recherche à ce propos, ce qui fait de la traînée active un autre paramètre intéressant à investiguer.

1.3.3.3. Les forces propulsives

L'ajustement des forces propulsives est un enjeu capital dans une perspective de performance. En effet, les trajectoires tridimensionnelles des segments corporels (bras et jambes) induisent une résultante hydrodynamique (F_p ; force propulsive) comportant une composante en traînée (vecteur d) et en portance (vecteur l) (Figure 6).

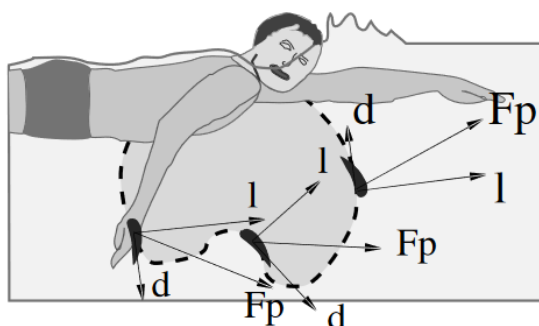


Figure 6 : Les différentes composantes de la force propulsive en natation (adaptée de [Toussaint et al., 2000]).

Aujourd'hui, un débat porte sur la place de la traînée et de la portance dans la propulsion [Sanders, 1998]. Ce débat est important car il traduit deux visions de la technique. Le trajet en "I", traduit une vision davantage "ramante" de la natation (théorie de "l'action-réaction" où la majorité de la propulsion est obtenue par un mouvement ramant d'avant en arrière, avec des angles d'attaque proches de 90°). Au contraire, le trajet en "S" correspond davantage à une vision basée sur la portance, les trajets de godille permettant de créer une composante de portance importante à des angles d'attaque peu élevés. Ce débat est notamment lié aux considérations méthodologiques adossées aux recherches sur la propulsion.

De manière générale, la composante en traînée peut être décrite comme une force de réaction de l'eau en réponse à la force appliquée par le nageur au fluide [A. R. Vorontsov & Romyantsev, 2000]. La composante en portance est causée par la forme incurvée de certaines surfaces du corps en déplacement, notamment la main. Cette forme engendre une pression moins importante sur la surface supérieure du corps comparée à la surface inférieure et produit une élévation hydrodynamique comme expliqué par le théorème de Bernoulli [Counsilman, 1970]. L'orientation et l'intensité des forces propulsives changent perpétuellement au cours d'un cycle de mouvements des bras. Ce constat explique que toute la force mécanique développée par le nageur ne soit pas entièrement effective à son déplacement [Schleihauf, 1979], comme présenté précédemment par l'efficacité propulsive. En effet l'orientation des segments propulsifs dévie de la direction de déplacement à certains moments de la phase propulsive comme illustré par exemple par les mouvements de balayage.

L'étude de la propulsion dans les différentes nages soulève la problématique de la contribution relative des membres inférieurs et supérieurs dans la propulsion totale. Cela a particulièrement été étudié en crawl, montrant une contribution des membres inférieurs à hauteur d'environ 30% de la force propulsive [Morouço et al., 2015], d'environ 10 % de la vitesse de nage [Deschodt et al., 1999] et de 11,7 % de la puissance propulsive [Hollander, 1988]. La contribution des membres inférieurs dans la propulsion en dos semble être similaire à celle du crawl, elle est en revanche plus importante en papillon (environ 20-25 %) et en brasse (environ 50 %) [A. R. Vorontsov & Romyantsev, 2000]. On remarque donc que, dans la plupart des nages, les membres inférieurs ont un rôle minime dans la propulsion malgré leurs surfaces propulsives plus importantes et des groupes musculaires pouvant produire des niveaux de force significativement plus importants que les groupes musculaires des membres supérieurs. Néanmoins, l'orientation des jambes et des pieds crée des forces de réaction majoritairement verticales, ce qui explique la faible contribution des membres inférieurs à la propulsion totale dans la plupart des nages. Le rôle des membres inférieurs lors de la nage ne doit cependant pas être minimisé. Les membres inférieurs ont en effet d'autres fonctions hydrodynamiques notamment une fonction d'équilibre pour limiter les rotations du corps ainsi qu'un rôle de soutien à la propulsion des membres supérieurs afin de limiter les variations de vitesse [Gourgoulis et al., 2013].

Ces rotations du corps et variations de vitesse sont causées par la propulsion cyclique des membres supérieurs, alternant phase de travail et phase de récupération [Barbosa et al., 2011]. Les membres supérieurs n'ont en effet aucune action propulsive sur la phase de retour aérien. Lorsque la main entre dans l'eau, la main et l'avant-bras sont les principales surfaces propulsives [Romyantsev, 1982]. Leur orientation est donc un des facteurs influençant la force propulsive générée [Berger et al., 1997]. Cette orientation des appuis est elle-même influencée par la flexion du coude (à son maximum à la moitié environ de la phase propulsive du bras) qui permet une propulsion optimisée comparé à une propulsion générée par des bras tendus notamment grâce à :

1. Une accélération des surfaces propulsives (mains et avant-bras) n'impliquant pas de segments corporels plus massifs tels que l'épaule ce qui permet de limiter le bras de levier et donc la force à développer pour un même couple.
2. Une augmentation de la surface propulsive utile au déplacement (orientée dans le sens inverse du déplacement).
3. Une augmentation progressive de la force propulsive jusqu'à la fin de la phase de travail du membre supérieur ce qui n'est pas le cas d'un pattern de propulsion sans flexion de coude.

Du fait de ces orientations variables des segments et des masses musculaires mobilisées différentes, le niveau des forces de pressions sur la main du nageur varie donc tout au long de la phase propulsive. On retrouve ainsi, en crawl [Koga et al., 2022] comme dans les autres nages [Bartolomeu et al., 2023; Schleihau, 1979], le pic de force à la fin de la phase propulsive.

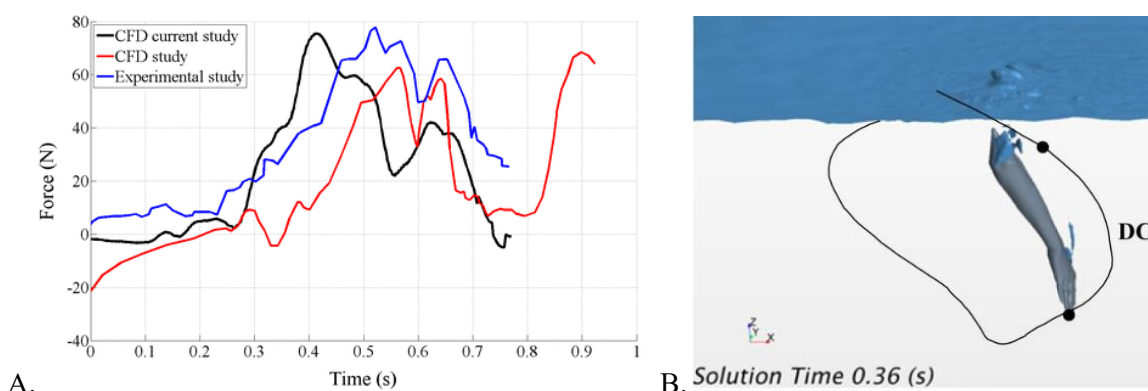


Figure 7 : A. Force propulsive au cours d'un cycle obtenue par Computational Fluid Dynamics en comparaison à une étude expérimentale. B. Trajectoire de la main associée [Samson et al., 2017].

Malgré les avancées réalisées dans les études sur la propulsion en natation, il demeure essentiel d'interpréter leurs résultats en tenant compte des méthodologies employées, car celles-ci présentent souvent des limites fondamentales qui peuvent influencer fortement la portée des conclusions obtenues. Dans ce contexte, Schleihau a utilisé le théorème de Bernoulli et la théorie de la portance associée pour justifier les trajectoires sinusoïdales, la main étant modélisée par une hélice créant des angles d'attaque capables de produire des forces de portance significatives. Cependant, la pertinence de cette modélisation a été remise en question par différents auteurs [Bixler & Riewald, 2002], arguant que l'hypothèse d'écoulements laminaires sur laquelle repose le théorème de Bernoulli n'est pas adaptée aux mouvements en natation. D'autres recherches [Berger, 1999; Schleihau, 1979], ont quantifié les coefficients de portance et de traînée de la main dans des conditions quasi-stationnaires (mesures effectuées pour des angles fixés de la main). Néanmoins, ces approches sous-estiment largement les forces réelles, car elles n'intègrent pas les phénomènes instationnaires, tels que l'accélération ou la

vorticité générée par le fluide. Un changement de paradigme s'est donc récemment imposé, passant de l'analyse quasi stationnaire à une compréhension plus globale des dynamiques instationnaires. Cette évolution, amorcée depuis une quarantaine d'années dans des disciplines connexes, telles que la biologie du vol des oiseaux et des insectes, commence à influencer la recherche en natation depuis une vingtaine d'années. Ainsi, des études récentes utilisant des modèles physiques (bras robotiques) reproduisant la cinématique des nageurs [Guignabel et al., 2023; Lauder & Dabnichki, 2005] ont montré que les forces hydrodynamiques mesurées directement peuvent diverger de presque 50 % par rapport aux estimations issues des analyses quasi-stationnaires. En parallèle, des simulations numériques (approche CFD, Computational Fluid Dynamics) ont révélé que la force de traînée et les forces propulsives pouvaient augmenter de manière significative en écoulement accéléré par rapport aux conditions quasi-stationnaires [Rouboa et al., 2006; Samson et al., 2017]. Ces résultats mettent en évidence l'importance cruciale d'étudier directement les écoulements pour comprendre les mécanismes dynamiques en jeu. Des outils avancés, comme la PIV (Particle Image Velocimetry), ont été appliqués avec succès à l'étude des écoulements en natation [Matsuuchi et al., 2009; Takagi et al., 2014], permettant de visualiser et de mesurer les écoulements complexes. Toutefois, mesurer in situ et de manière intra-cyclique les forces propulsives reste un défi. À ce titre, des méthodes expérimentales alternatives, comme la nage attachée ou semi-attachée, offrent des indicateurs certes plus globaux (e.g., valeurs moyennées) mais qui permettent de contourner certaines des limites évoquées ici et semblent adaptées à la problématique de cette thèse. Ces approches seront abordées en détail à la section 4.

1.3.4. Facteurs neuro-musculaires

Une autre problématique soulevée par l'étude des forces propulsives en natation est celle qui concerne les implications neuromusculaires de ces efforts. Pour approfondir la compréhension des efforts fournis en natation, il est en effet nécessaire de connaître l'implication de chaque groupe musculaire dans la propulsion des différentes nages. Cette compréhension a tout d'abord débuté par une évaluation qualitative des groupes musculaires sollicités dans la nage grâce à l'utilisation d'électromyographie (EMG) de surface [Ikai et al., 1964]. Cette première étude a notamment montré une activation du Grand dorsal, du Grand rond, du Triceps brachial et du Grand pectoral lors de la nage en crawl chez un nageur de haut niveau. L'amplitude du signal issu de l'EMG augmente avec la force exercée par le muscle étudié, dont l'intensité de contraction peut donc facilement être étudiée. En revanche l'EMG n'est pas une mesure de la force directement produite par le muscle [Bailly et al., 2021]. Le signal est ainsi utilisé dans certaines études comme un moyen de comparer l'intensité de contraction de différents groupes musculaires en fonction des nages opérées ou de la vitesse de nage [Lewillie, 1973]. La plus grande sollicitation neuromusculaire a été trouvée sur le papillon à allure rapide. D'autres études se sont concentrées sur l'étude des activations musculaires au cours des différentes phases du cycle de mouvement des bras [Lauer et al., 2013; Nuber et al., 1986; Pink et al., 1991; Rouard & Clarys, 1995]. Il a ainsi été montré que dans la plupart des nages, le grand dorsal et le

grand pectoral étaient les deux muscles les plus impliqués lors des phases propulsives des quatre nages compétitives [Nuber et al., 1986; Pink et al., 1991]. Leur activation est néanmoins temporellement différente, notamment en crawl comme le montre la Figure 8. Le grand pectoral serait en effet principalement impliqué lors du début de la phase propulsive alors que le grand dorsal serait majoritairement impliqué sur la fin de la phase propulsive [Pink et al., 1991].

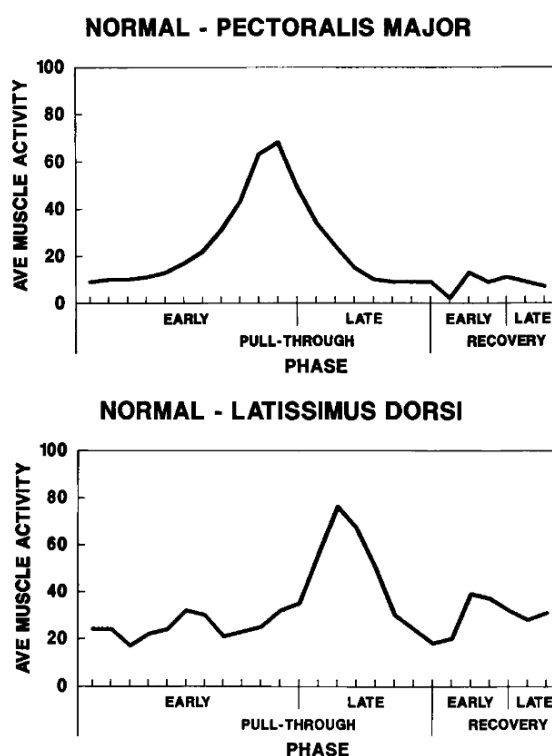


Figure 8 : Signal d'activation musculaire issu de mesures EMG représenté au cours des différentes phases du cycle de mouvement de bras en crawl : la phase propulsive (« pull-through ») et la phase aérienne (« recovery ») [Pink et al., 1991].

Il a également été remarqué que, lors de la phase aérienne du crawl, du dos et du pap, les chefs musculaires les plus sollicités étaient le Trapèze supérieur, le Rhomboïde, le Supra-épineux, et les Deltoïdes moyen et antérieur [Pink et al., 1991, 1992, 1993].

Certains auteurs ont aussi remarqué des différences d'activation musculaire en fonction du niveau des nageurs [Clarys, 1988; Rouard & Billat, 1990]. Cette dernière étude a notamment montré un niveau d'activation musculaire moins important chez les meilleurs nageurs par rapport aux moins bons mais aussi un recrutement plus sélectif, impliquant seulement les groupes musculaires les plus importants pour la propulsion et dans un meilleur timing. Il est en revanche important de noter que le manque de standardisation de la manière de définir les phases et de normalisation des données rend complexe la comparaison des résultats entre les différentes études impliquant des mesures EMG en natation [Martens et al., 2015].

Au-delà de son aptitude à développer des qualités énergétiques et biomécaniques largement étudiées dans la littérature [Barbosa et al., 2013], le nageur élite présente également des caractéristiques intrinsèques particulières.

1.3.5. Facteurs intrinsèques : anthropométrie et composition corporelle

L'anthropométrie, intégrée dans certains modèles holistiques de la performance en natation [Barbosa et al., 2013], fait partie de ce qui peut caractériser les nageurs des différentes épreuves. Certains auteurs ont en effet remarqué des différences significatives de taille et de masse corporelle entre les nageurs et nageuses de distances et de nages de spécialité différentes. Ainsi, les nageurs de courtes distances ont tendance à être plus grands (ce qui réduit le nombre de Froude et donc la résistance de vagues) et plus lourds que leurs pairs spécialistes des épreuves de plus longues distances. De même, chez les hommes comme chez les femmes, les nageurs de crawl et de dos ont tendance à être plus grands et plus lourds que les nageurs de papillon et de brasse [Bulgakova & Vorontsov, 1978; Mallett et al., 2021].

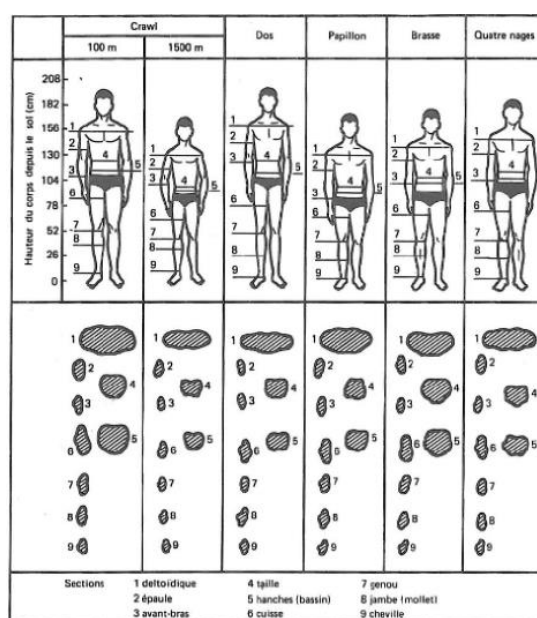


Figure 9 : Morphotype et surface des coupes frontales des nageurs de haut-niveau d'après l'étude précurseur de Bulgakova & Vorontsov (1978) [Cazorla, 1994].

L'origine de ces différences de taille et de poids peut se questionner. Il est possible que ces caractéristiques aient en partie permis aux nageurs d'atteindre le haut-niveau [Rejman et al., 2018] comme en atteste le lien entre certains caractères anthropométriques et la performance [Lima-Borges et al., 2022] ainsi que les différences anthropométriques entre les meilleurs nageurs internationaux et le reste de la population élite [Mallett et al., 2021]. Néanmoins, il est aussi probable que la pratique intensive et extensive des nageurs de haut niveau ait influencé le développement morphologique des nageurs [Dopsaj et al., 2020; A. R. Vorontsov, 2002]. La longueur des membres supérieurs, la taille et

le poids des nageurs sont les variables anthropométriques les plus fortement associées à la performance. Ces paramètres ont été définis par certains auteurs comme des prédicteurs de performances dans des styles de nages différents [Lima-Borges et al., 2022]. En revanche, peu d'études ont analysé les relations entre les facteurs anthropométriques et la performance en fonction de la distance de course. Des auteurs ont néanmoins investigué la relation entre les facteurs anthropométriques et les paramètres de nage sur différentes distances rapportant une corrélation forte entre la longueur des membres supérieurs et l'indice de nage ($r^2 = 0,79$; $0,76$; $0,76$ pour les distances de 100 m, 200 m et 400 m nage libre respectivement) [Mezzaroba & Machado, 2014]. Ce résultat met en avant l'influence de la longueur des membres supérieurs sur la technique et l'économie de nage, ce qui pourrait aboutir à un lien indirect avec la performance [Lima-Borges et al., 2022; Peterson Silveira et al., 2019].

D'autres auteurs ont analysé la composition corporelle de nageurs internationaux en sprint, reportant des différences entre les hommes et les femmes, notamment concernant le pourcentage de masse grasse moyen (hommes : 9,82 % ; femmes : 15,79 %) et le pourcentage de masse maigre moyen (hommes : 90,18 % ; femmes : 84,27 %) [Dopsaj et al., 2020]. Ces mêmes auteurs ont également montré des différences de relation entre la composition corporelle et la performance entre hommes et femmes. En effet, les variables représentant le potentiel contractile du nageur (masse musculaire et taux de masse musculaire) étaient les plus positivement corrélées à la performance chez les hommes. Concernant les femmes, les variables de masse grasse absolue et relative étaient aussi fortement et négativement corrélées à la performance que les variables représentant le potentiel contractile de la nageuse. Ces résultats sont appuyés par d'autres études sur le sujet [M. A. M. Dos Santos et al., 2021; Siders et al., 1993]

Au-delà du lien entre ces variables et la performance aquatique, plusieurs auteurs ont aussi montré un lien entre la composition corporelle et des paramètres hydrodynamiques tels que le couple de redressement [Zamparo et al., 1996] ou la force propulsive [Strzała et al., 2020]. La masse maigre semble présenter un lien également étroit avec les capacités aérobie des nageurs, et particulièrement avec les variables représentant la capacité de performance à haute intensité aérobie (VO_2 max) [Espada et al., 2023]. Ces paramètres anthropométriques et de composition corporelle sont également liés à la préparation physique des sportifs. En effet, les qualités exprimées en préparation physique peuvent être influencées par les paramètres anthropométriques des nageurs [Nefesoğlu & Bas, 2021]. De même, bien que cela n'ait pas été montré spécifiquement chez des nageurs, l'entraînement en préparation physique peut avoir une influence sur la composition corporelle des sportifs [Zouita et al., 2023].

2. La préparation physique au coeur de la performance en natation

La préparation physique est définie comme « l'ensemble organisé et hiérarchisé des procédures d'entraînement qui visent au développement et à l'utilisation des qualités physiques du sportif » [Pradet & Hubiche, 1996]. Un complément de cette définition ressort des récentes études précisant que cette pratique a également pour but de réduire les risques de blessures [Weldon et al., 2022]. Le terme anglophone désignant ces pratiques, « Strength & Conditioning », permet d'illustrer les différentes méthodes d'entraînement en préparation physique, essentiellement composées de l'entraînement en résistance et du conditionnement métabolique. Les différentes disciplines sportives sont en effet souvent segmentées et représentées par la prédominance d'efforts aérobie ou d'efforts de puissance et de force bien que la plupart des disciplines sportives incorporent ces deux types d'efforts [Hughes et al., 2018; Knuttgen, 2007]. L'entraînement en résistance est une des méthodes de préparation physique les plus utilisées [Crowley et al., 2017] afin de préparer l'athlète à ces efforts nécessitant de hauts niveaux de puissance et de force. C'est pourquoi nous allons nous attacher à détailler les habiletés physiques visées par ce type d'entraînement et leur méthode de développement.

2.1. Bases fondamentales de la préparation physique

Tout sportif en interaction avec son environnement répond aux lois de la mécanique (Lois de Newton) [Siff, 2000]. Ainsi, ces lois s'illustrent dans tous les gestes sportifs, mettant en lumière la relation entre force, mouvement et réaction. La force peut être définie comme la capacité d'un muscle ou d'un groupe musculaire à produire une tension qui, par le biais de contractions musculaires, génère ou résiste à un mouvement. Cette production de force via l'activation musculaire possède des attributs comme une intensité, un taux de développement et une direction [Stone et al., 2002]. Le taux de développement de la force (RFD), exprimé en $N \cdot s^{-1}$, correspond à la capacité pour un muscle à produire une activation musculaire maximale dans la phase précoce de la contraction explosive à partir d'un niveau bas de contraction ou de repos [Maffiuletti et al., 2016]. Il est considéré comme un facteur de performance crucial dans les disciplines impliquant des sauts, des changements de direction ou des sprints [Haff & Nimphius, 2012] étant donné que ces actions requièrent des temps courts d'application de la force (< 300 ms) [Suchomel et al., 2018]. Cette qualité est souvent associée à la force « explosive » [Stone et al., 2002].

Les qualités de force sont influencées à la fois par des facteurs structuraux et neuromusculaires. En effet, les principaux déterminants de la force sont les suivants [Fitts et al., 1991; Siff, 2000] :

- La surface transversale du muscle (CSA) influencée par la taille et le nombre de myofibrilles
- La densité de fibres musculaires par unité de CSA
- La typologie des fibres musculaires
- L'angle de pennation des fibres musculaires

- La longueur du muscle au repos
- Le nombre et la fréquence de recrutement des unités motrices
- Le degré d'inhibition des muscles agonistes et de co-activation des muscles antagonistes
- Le seuil d'excitabilité des fibres musculaires

Ces qualités de force peuvent s'exprimer dans les différents modes de contractions : concentrique, excentrique et isométrique. Dans le mouvement sportif, les différents modes de contraction sont interconnectés. Les qualités de force ne s'expriment donc pas de manière exclusive dans un mode de contraction spécifique. Une autre qualité de force est d'ailleurs la force réactive ("reactive strength") qui est définie comme la capacité d'un individu à passer d'une contraction excentrique à une contraction concentrique [Suchomel et al., 2016]. Il s'agit d'une capacité particulièrement importante lors des phases de virages en natation par exemple [Hermosilla et al., 2021]. Ce changement rapide de mode de contraction implique non seulement une production de force significative, mais aussi une influence déterminante du facteur temps, puisque la vitesse à laquelle le muscle modifie son état joue un rôle clé dans l'expression de la force réactive, tout comme dans celle de la force explosive. Les propriétés viscoélastiques du muscle expliquent en partie cette capacité de changement d'état du muscle, illustrée par sa vitesse de raccourcissement [Gasser & Hill, 1924]. La vitesse de contraction d'un muscle semble aussi fortement influencée par l'activité enzymatique de la myosine, une des composantes de la fibre musculaire [Bárány, 1967]. La puissance musculaire, considérée comme un facteur déterminant dans la performance sportive dans de nombreuses disciplines [Haff & Nimphius, 2012], résulte de la combinaison entre la force produite par le muscle et la vitesse de sa contraction. Elle peut être définie comme la quantité de travail (W) effectuée par unité de temps (t) [Knudson, 2009], mettant en lumière l'importance de l'interaction entre les paramètres de force et de vitesse dans l'optimisation des performances athlétiques. Lors d'un effort réalisé en translation, le travail (W) effectué par le sportif s'exprime en effet comme le produit du déplacement linéaire du point d'application de la force (d) et de la force (F). De même la vitesse du déplacement (v) correspond à la distance linéaire parcourue par unité de temps (t). La puissance développée par le sportif s'écrit alors :

$$Puissance = \frac{W}{t} = F \cdot \frac{d}{t} = F \cdot v \quad (12)$$

L'expression de la puissance dans les disciplines sportives qui imposent la répétition d'actions amène à considérer la capacité à maintenir ces efforts lors d'une série de répétitions jusqu'à ce que la tâche soit accomplie (une distance de course parcourue par exemple) [Rivière et al., 2020]. Cette capacité est souvent définie comme l'endurance de puissance et intègre la notion de fatigue qui peut être illustrée par la diminution de la puissance qui intervient dès les premières répétitions d'un effort maximal [Bar-Or, 1987]. Cette capacité à maintenir une puissance, tout comme la capacité à maintenir une force (endurance de force), diffère en fonction du niveau de puissance, de force ou de vitesse imposée [Beelen & Sargeant, 1991; Burnley & Jones, 2018; Shimano et al., 2006]. En natation, cette

capacité représente ainsi un facteur de plus en plus important au fur et à mesure que la distance des courses augmente [Pessôa Filho et al., 2014]. Les paramètres à l'origine de cette fatigue semblent également différer en fonction des niveaux de puissance, un niveau de puissance élevé induisant une fatigue essentiellement périphérique qui est causée par l'altération de l'homéostasie métabolique [Burnley & Jones, 2018].

Nous pouvons donc constater que les qualités de force, de vitesse et de puissance sont liées les unes aux autres et semblent impactées par leur expression dans la durée. Au vu de leur relation particulièrement forte avec certains aspects de la performance, notamment en sprint, leur développement grâce à l'entraînement en résistance convient d'être décrit.

2.2. Adaptations à l'entraînement et méthodes de développement

2.2.1. Adaptations à l'entraînement

Certains de ces paramètres peuvent être influencés par l'entraînement en résistance. L'entraînement en force induit en effet des adaptations fonctionnelles, liées à la commande neuromusculaire, et structurelles [Hughes et al., 2018]. Les adaptations neuromusculaires sont difficiles à identifier puisqu'elles sont influencées par des contributions afférentes et efférentes. Néanmoins certains auteurs suggèrent que ces adaptations incluent l'acquisition de schéma moteur via le système nerveux, une augmentation de l'activation musculaire grâce à une meilleure synchronisation et une augmentation de la fréquence de recrutement des unités motrices, ainsi qu'une diminution de l'inhibition et de la coactivation des muscles antagonistes [Sale, 1988; Škarabot et al., 2021]. Les adaptations structurelles incluent le phénomène d'hypertrophie qui est lié à l'augmentation de la taille et du nombre des myofibrilles [Cureton et al., 1988]. La modification de la raideur des tissus conjonctifs est aussi une conséquence structurelle de l'entraînement en force qui va de pair avec l'hypertrophie [Hughes et al., 2018]. Ces deux types d'adaptations (fonctionnelles et structurelles) interviennent cependant dans des temporalités différentes (Figure 10). Les premières adaptations à l'entraînement en force s'observent en effet au niveau neuromusculaire avec l'apprentissage du mouvement et l'amélioration de la coordination [Häkkinen & Komi, 1983; Rutherford & Jones, 1986]. L'hypertrophie s'observe ensuite lorsque l'entraînement s'inscrit dans une temporalité plus longue. Il arrive néanmoins qu'un phénomène d'hypertrophie s'observe dans un délai plus court auquel cas cela serait dû à l'œdème musculaire causé par les dommages de l'entraînement en résistance [Damas et al., 2016].

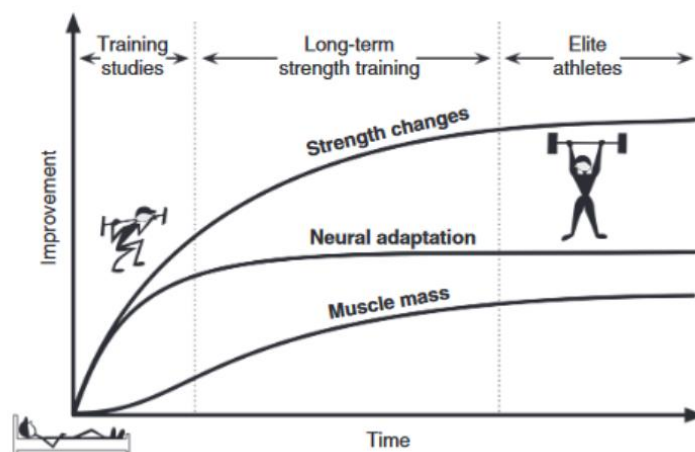


Figure 10 : Chronologie des adaptations survenant avec l'entraînement en force [Hughes et al., 2018].

2.2.2. Les méthodes de développement

Les méthodes et les paramètres modulables pour le développement de la force sont variés et permettent d'adapter les entraînements en fonction des objectifs spécifiques. Parmi ces paramètres, le mode de contraction musculaire choisi joue un rôle déterminant dans les adaptations obtenues. L'entraînement traditionnel se caractérise par l'alternance de phases excentriques et concentriques [Suchomel et al., 2018]. La phase excentrique correspond au ralentissement d'une charge lors d'une contraction avec allongement du muscle (on parle d'un travail négatif) et la phase concentrique résultant du déplacement de cette charge lors d'une contraction avec raccourcissement du muscle (on parle de travail positif) sur le mouvement exécuté [Knuttgen & Kraemer, 1987]. Ces deux phases sont fondamentales pour le développement de la force fonctionnelle et de la coordination musculaire. Dans la condition statique, le mode isométrique consiste à réaliser une contraction musculaire sans modification de la longueur du muscle. L'entraînement pliométrique est une autre méthode intégrant à la fois le mode excentrique et concentrique. Dans ce contexte, l'accent est mis sur la rapidité avec laquelle le muscle passe de la phase excentrique à la phase concentrique, un phénomène connu sous le nom de cycle étirement-raccourcissement (CER) [Cormie et al., 2011].

Les mouvements réalisés lors d'entraînements traditionnels amènent à une production supérieure de force et de puissance en comparaison du mode concentrique seul. Cette différence est expliquée par les capacités élastiques des structures musculo-tendineuses qui permettent d'emmagasiner de l'énergie potentielle lors de l'étirement du muscle (phase excentrique) pour la restituer lors de la phase concentrique [Cormie et al., 2011]. L'entraînement pliométrique, basé sur un enchaînement similaire de phases est souvent décrit comme permettant le transfert des qualités de force maximale vers le développement de la puissance maximale du RFD de manière à optimiser les composantes de la performance sportive [Suchomel et al., 2018]. D'autre part, l'entraînement

excentrique seul semble plus efficace que l'entraînement traditionnel, concentrique ou isométrique pour améliorer les paramètres musculaires mécaniques (force, puissance, RFD), structuraux (hypertrophie) et nerveux ainsi que les paramètres de performance (sauts, vitesse de sprint, changements de direction) [Douglas et al., 2017]. Par ailleurs, il a été montré que l'entraînement en isométrie permettait d'induire une fatigue moins importante et des niveaux de force spécifiques aux angles travaillés supérieurs comparé à un entraînement dynamique [Lum & Barbosa, 2019].

En plus des modes de contractions choisis, les adaptations induites par l'entraînement vont également dépendre d'autres variables manipulées telles que le nombre de séries, le nombre de répétitions par série, le temps de récupération entre les séries et de la charge imposée. Par exemple, il semblerait que pour induire une amélioration de la force maximale, les charges imposées devraient être supérieures à 80% de la 1RM qui correspond à la charge que l'individu est en capacité de déplacer entièrement une seule fois [Coburn & Malek, 2012; Lacio et al., 2021; Schoenfeld et al., 2017]. Ces charges relatives peuvent également être supérieures à 100% de la 1RM dans le cas d'un entraînement excentrique lors duquel le sportif a pour seul objectif de freiner le mouvement imposé par la charge lourde [Mike et al., 2015]. Concernant l'amélioration de la puissance, elle serait optimale lors de l'utilisation de charges intermédiaires (entre 30 et 70% de la 1RM) sur les mouvements traditionnels, ou légères (entre 0 et 30% de la 1RM) sur les mouvements balistiques (qui consistent à accélérer la charge sur l'entièreté de la phase concentrique [Suchomel et al., 2018]) [Coburn & Malek, 2012; Cormie et al., 2010]. Lorsque le principal objectif de l'entraînement est l'hypertrophie, une importance particulière est accordée à la proximité à l'échec de l'effort musculaire, ce qui offre une plus grande flexibilité dans le choix de la charge à utiliser [Lacio et al., 2021].

Le nombre de séries et de répétitions prescrit doit également varier en fonction des adaptations visées par l'entraînement. Dans le but de développer la force maximale ou la puissance maximale, le nombre de séries devrait être supérieur à 3 et le nombre de répétitions par série inférieur à 6. Dans le but de développer l'hypertrophie, le nombre de répétitions par série devrait être compris entre 6 et 12 [Coburn & Malek, 2012]. Enfin, le temps de récupération entre les séries doit également être pris en compte et adapté en fonction de l'adaptation visée. Ainsi, dans le but de développer la force maximale ou la puissance maximale, un temps de récupération de 3 à 5 min serait optimal tandis que dans le but de développer l'hypertrophie, des temps de récupération plus courts (entre 30 et 60 s) semblent plus adaptés [De Salles et al., 2009].

Outre la manipulation de ces variables, l'entraînement peut également être modulé par de nombreux autres paramètres, notamment l'utilisation de matériel ainsi que la symétrie des segments impliqués dans le mouvement (unilatéral / bilatéral). Le Tableau 2 ci-dessous permet de résumer les adaptations les plus communément observées lors d'utilisation des différentes méthodes présentées précédemment [Suchomel et al., 2018].

Méthode d'entraînement en résistance	Hypertrophie	Force	Puissance
Exercice au poids de corps	+	+	++
Exercice sur machine	++	++	++
Haltérophilie et ses dérivés	+++	+++	+++++
Pliométrie	+	++	++++
Entraînement excentrique	+++++	+++++	++++
Potentialisation Post-activation	na	+++	+++++
Exercice unilatéral	+++	++	+++
Exercice bilatéral	++++	++++	+++
Résistance variable (chaînes, élastiques...)	+++++	++++	++++
Entraînement avec Kettlebell	++	++	+++
Entraînement balistique	++	+++	+++++

Tableau 2 : Effets des différentes méthodes d'entraînement en résistance sur les adaptations en hypertrophie, en force et en puissance (na : conclusions limitées) [Suchomel et al., 2018].

2.3. Corrélations entre les qualités physiques et la performance en natation sprint

Comme décrit précédemment, les études établissant une corrélation entre le RFD ainsi que la production maximale de puissance avec les facteurs de performance dans différentes disciplines démontrent l'importance de ces qualités [Mcbride et al., 1999; Pleša et al., 2022; Stone et al., 2002]. Des liens similaires ont été évalués en natation, particulièrement sur les nageurs de sprint ou de distances mixtes.

Ainsi, certaines études ont montré un lien fort entre la force évaluée via une estimation de la 1RM sur des mouvements traditionnels d'entraînement contre résistance (pompes, développé couché, tirage vertical, squat, soulevé de terre) et la performance en sprint (sur 25-, 50-, ou 100 m) [Amara, Chortane, et al., 2021; Crowe et al., 1999; Garrido, Marinho, Barbosa, et al., 2010; Keiner et al., 2015; Morouço, Neiva, et al., 2011]. Il ressort de ces études une forte corrélation ($r > 0,5$) entre la force produite sur le mouvement de tirage vertical et la performance. D'autres études ont mesuré la force produite sur des actions isométriques [Gola et al., 2014] ou isocinétiques [Carvalho et al., 2023] et ont également rapporté de fortes corrélations entre la force à sec et la performance dans les quatre nages. La puissance produite hors de l'eau par les membres inférieurs comme par les membres supérieurs et évaluée indirectement au travers de différents mouvements (hauteur de saut, distance parcourue par une balle lancée) a été montrée dans certaines études comme étant fortement liée à la performance en natation également [Crowe et al., 1999; Espada et al., 2016; Garrido, Marinho, Barbosa, et al., 2010; Keiner et al., 2015; Loturco et al., 2015]. D'autres protocoles, avec des résultats tout autant significatifs, ont proposé des mesures différentes de puissance à sec, tentant de reproduire au plus proche la cinématique de la nage via des ergomètres spécifiques [Johnson et al., 1993; Sharp et al., 1982]. Les

études qui ont investigué à la fois la relation de la force et de la puissance avec la performance ont, de manière générale, montré que la puissance à sec était plus fortement corrélée à la performance que la force à sec [Chalkiadakis et al., 2023; Garrido, Marinho, Barbosa, et al., 2010; Keiner et al., 2015; Miras-Moreno et al., 2024].

Par ailleurs, d'autres travaux se sont attachés à étudier le lien entre les capacités de production de force et de puissance maximales et la performance sur des courses de distances intermédiaires (200 & 400m) [Chalkiadakis et al., 2023; Platzner et al., 2009]. Ceux-ci ont également montré un lien fort mais plus modéré qu'avec la performance sur des distances de sprint. La durée de course faisant également intervenir la notion d'endurance de force ou de puissance, la différence de relation entre les qualités neuromusculaires maximales et leurs capacités de maintien avec la performance a été analysée [Miras-Moreno et al., 2024; Pérez-Olea et al., 2018]. Les résultats ont montré que les capacités neuromusculaires maximales à sec (force / puissance) étaient plus fortement reliées à la performance que leurs capacités de maintien à un niveau sous-maximal dans le temps.

Néanmoins, une limite fréquente dans la plupart des protocoles réside dans l'utilisation de la mesure chronométrée des distances de nage. Bien que cette approche permette d'évaluer la performance globale, elle ne fournit que peu d'informations sur les paramètres intrinsèques de la performance, tels que les aspects cinématiques ou dynamiques. Pour pallier cette limite, plusieurs travaux ont cherché à établir des liens entre les mesures de force et de puissance à sec avec les paramètres cinématiques ou dynamiques de la nage à intensité maximale. Il a notamment été montré que, comme avec la performance globale, les paramètres mesurés à sec présentaient de fortes corrélations avec les paramètres dynamiques de la nage mesurés lors de la nage attachée [Crowe et al., 1999; Loturco et al., 2015; Morouço, Neiva, et al., 2011; Ruiz-Navarro et al., 2022; Strzała et al., 2021], ou de la nage semi-attachée [Cuenca-Fernández, Gay A., et al., 2020; Dominguez-Castells, 2013]. Le départ et les virages sont aussi partie intégrante des facteurs de performance, et plus particulièrement lors des courses de sprint [Lyttle & Benjanuvatra, 2005]. Certains auteurs ont alors mis en lien les qualités de force, de vitesse et de puissance des membres inférieurs mesurés à sec avec les performances de départs et des virages ainsi qu'avec les forces produites durant ces phases [Thng et al., 2019]. Les résultats montrent parfois une relation plus forte entre la force maximale mesurée à sec, comparée à la puissance maximale à sec, et la performance sur ces phases [C. C. Santos et al., 2022; West et al., 2011]. Parfois, ces études montrent un lien plus étroit entre la vitesse maximale de la barre sur des sauts, comparée à la puissance maximale, avec la performance sur ces phases [García-Ramos, Tomazin, et al., 2016].

Il semble cependant utile de remarquer que, malgré un consensus assez important autour de la relation forte entre les qualités neuromusculaires mesurées à sec avec la performance mesurée lors des phases nagées et non nagées ainsi qu'à leurs forces associées, d'autres auteurs montrent des résultats plus contrastés. En effet, il a été montré que les résultats de tests de force à sec constituaient de mauvais

paramètres de prédiction de la performance en natation [Selvamoorthy et al., 2024]. De même, certaines corrélations nulles ont été trouvées entre la puissance des membres inférieurs et la performance globale en sprint [Pérez-Olea et al., 2018].

Il apparaît donc de manière générale que les qualités physiques évaluées hors de l'eau soient fortement corrélées à la performance en natation et à certains facteurs biomécaniques associés. Ces relations semblent surtout se vérifier sur la performance en sprint. Les pratiques de terrains se sont notamment appuyées sur ce lien pour intégrer des contenus d'entraînement en préparation physique ex situ. Robert Kiphuth, entraîneur de l'équipe de nageurs de l'université de Yale, a été un des premiers entraîneurs à intégrer ce type d'entraînement dans les années 1920 - 1930 [Cureton, 1975]. Depuis, cette pratique s'est démocratisée, devenant incontournable dans la pratique de haut niveau où son utilisation s'est intensifiée au fil des décennies [Wirth et al., 2022]. Cependant, les contenus et les objectifs de l'implémentation de ce type de travail ont considérablement évolué depuis ces premières tentatives en préparation physique, reflétant les avancées scientifiques et les besoins spécifiques des athlètes modernes.

2.4. Pratiques d'entraînement en préparation physique chez les nageurs de haut niveau

Du point de vue des entraîneurs et préparateurs physiques, les raisons de l'intégration d'entraînement en préparation physique en natation ne dérogent pas à la définition générale du terme puisque les pratiques sont orientées vers l'optimisation des performances via [Crowley et al., 2018] :

- La réduction du risque de blessure
- L'amélioration des qualités physiques du nageur
- L'amélioration de l'efficacité du geste

La réduction du risque de blessure occupe en effet une place importante dans l'optimisation de la performance sportive en protégeant l'intégrité physique du sportif et en lui permettant de suivre l'intégralité du programme d'entraînement [Crowley et al., 2018]. La natation est un sport cyclique et répétitif qui impose des contraintes physiologiques et biomécaniques spécifiques, notamment imputables à la diversité des distances et des nages réalisées en compétition [Nugent et al., 2017], ce qui peut conduire à des blessures caractéristiques de l'activité [Barry et al., 2022a]. Les zones corporelles les plus souvent touchées sont les épaules, les genoux et le bas du dos [Wanivenhaus et al., 2012]. Certaines de ces zones sont particulièrement affectées par certains styles de nage comme les genoux pour les nageurs de brasse [Rovere & Nichols, 1985]. Dès lors, il semble important de devoir adapter les contenus d'entraînement en préparation physique à la spécialité du nageur [C. Bishop et al., 2013; Newton et al., 2002]. D'autres zones comme les épaules sont affectées par la pratique extensive de tous les types de nages. Les exercices de prévention des blessures à l'épaule devraient alors être focalisés sur un développement de la force des muscles stabilisateurs de la scapula et des rotateurs

externes de l'épaule [Manske et al., 2015; Newton et al., 2002]. De manière plus générale, les exercices visant l'amélioration de la posture, de la force et de la mobilité peuvent aider à stabiliser les structures articulaires et à compenser les déficits entre certaines paires de muscles agonistes – antagonistes [Tovin, 2006].

L'amélioration des qualités physiques du nageur, comme précisé dans la définition générale de la préparation physique, passe par différentes méthodes réalisées hors de l'eau dont l'entraînement en résistance et le « conditionnement aérobie » notamment représenté par l'intégration de circuits ayant pour but d'améliorer les capacités aérobie et anaérobie des nageurs [Liu & Wang, 2023; Pollock et al., 2019]. Parmi les principales formes d'intégration de la préparation physique en natation, nous retrouvons aussi son utilisation lors des échauffements à sec réalisés avant les séances d'entraînement dans l'eau [Crowley et al., 2018]. Les effets de cette pratique sur la performance ont été investigués par différents auteurs et les résultats positifs semblent limités [Neiva et al., 2014]. L'entraînement en résistance est une des formes de la préparation physique la plus communément prescrite en natation, utilisée en général par plus de 85% des préparateurs physiques [Crowley et al., 2018]. Celle-ci inclut notamment un travail de la force maximale suivant les recommandations scientifiques (charge > 80% de la 1RM, nombre de répétitions par série < 6, récupération entre les séries entre 3 et 5 min). Les exercices prescrits dans le cadre de ce développement sont variés mais les mouvements de tirage vertical (traction ou lat pulldown), de développé couché et de squat sont parmi les plus souvent cités. Un travail de la puissance maximale « traditionnel » suivant ces mêmes recommandations (charge entre 30 et 70 % de la 1RM), balistique ou pliométrique est également prescrit. Un des exercices balistiques utilisé est notamment le jeté de « medicine ball ». La pliométrie est essentiellement prescrite sur les membres inférieurs et est utilisée comme un moyen d'améliorer la performance des départs et des virages [D. C. Bishop et al., 2009; Crowley et al., 2018; Newton et al., 2002; Uebel, 1987]. Les contenus de ces séances d'entraînement en résistance diffèrent dans certains cas en fonction de la distance de spécialité des nageurs. Les nageurs de sprint ont ainsi plus de séances basées sur le développement de la puissance tandis que le contenu des séances des nageurs de longue distance est principalement axé autour du conditionnement métabolique [Pollock et al., 2019].

L'amélioration de l'efficacité propulsive du geste, pouvant être traduit par une amélioration de l'économie de nage, peut être vue comme une conséquence de l'amélioration des qualités physiques. En effet, dans un cadre plus large, plusieurs auteurs ont montré que le développement de la force maximale améliore l'économie de course et le travail mécanique lors d'épreuves d'endurance [Balsalobre-Fernández et al., 2016; Hoff et al., 2002]. Différents mécanismes nerveux sont responsables de cette amélioration de force, notamment la baisse de la co-activation des antagonistes, l'optimisation de la coordination des muscles agonistes et l'augmentation de l'activation neuro-musculaire. Ces résultats n'ont néanmoins pas été démontrés en natation [Aspenes et al., 2009]. Certains entraîneurs ne partagent pas entièrement cette vision de l'entraînement contre résistance et restent réticents à l'intégrer

dans les pratiques d'entraînement, affirmant que cette méthode pourrait au contraire dégrader l'efficacité du geste et modifier la forme hydrodynamique du corps, amplifiant ainsi les résistances à l'avancement [Newton et al., 2002]. Cependant, bien qu'il ait été démontré qu'une amélioration de la force maximale pourrait, dans certains cas, entraîner une détérioration du contrôle moteur sur une tâche impliquant les groupes musculaires ciblés par le développement de la force [Bobbert & Van Soest, 1994], aucune étude à notre connaissance n'a confirmé cette hypothèse en natation. Au contraire, certains auteurs ont rapporté une amélioration des paramètres techniques (comme l'indice de nage) en papillon après un entraînement combinant un travail de force à sec et de hautes intensités dans l'eau [Amara et al., 2023]. De plus, d'un point de vue aigu, il a été montré qu'une séance d'entraînement en résistance à sec n'avait pas d'impact sur l'efficacité propulsive des membres supérieurs lors de la séance de natation suivante [Arsoniadis et al., 2020].

3. Le transfert de la préparation physique vers la nage

Les qualités physiques, telles qu'exprimées à sec, sur des mouvements de préparation physique ou des actions impliquant plus spécifiquement certaines masses musculaires, montrent des liens statistiques forts avec la nage en sprint. Ces relations justifient en partie les pratiques de terrain qui utilisent la préparation physique et le travail hors de l'eau de manière générale en vue de l'optimisation de la performance, principalement sur les nageurs de sprint. Au-delà de ces relations descriptives, il paraît donc pertinent de s'intéresser aux effets du développement de ces qualités physiques dans différentes conditions (dans l'eau ou en dehors) sur la nage et les paramètres associés afin de pouvoir corroborer les pratiques de terrain ou les orienter sur des contenus plus adaptés. Un tel processus de préparation physique soulève la problématique de son transfert entre le milieu terrestre et le milieu aquatique. À titre d'exemple, il a été rapporté qu'une amélioration de 20 à 40 % de la force après un programme d'entraînement entraîne une amélioration de 4,4 à 2,1 % des temps de nage [Strass, 1988]. Les facteurs influençant cette différence des évolutions observées à sec et dans l'eau seront donc discutés également.

3.1. Effets du travail non spécifique à sec sur la performance et les facteurs associés

Le développement des qualités de force et des autres qualités associées en natation est souvent réalisé à partir des entraînements en résistance à sec comme décrit précédemment. Néanmoins, ces entraînements ne viennent pas remplacer l'entraînement dans l'eau. On parle donc d'entraînement mixte ("concurrent training") pour désigner une méthode d'entraînement basée à la fois sur l'entraînement en résistance à sec et sur l'entraînement en natation [Amara et al., 2022; Aspenes et al., 2009]. La définition stricte de l'entraînement combiné ne précise pas la temporalité dans laquelle les séances à sec et dans l'eau s'enchaînent mais en pratique, il arrive souvent que ces séances soient temporellement rapprochées (le même jour voir la même demi-journée) [Pollock et al., 2019]. Il a été montré que, d'un point de vue aigu, les séances d'entraînement à sec ou en natation pourraient avoir un impact négatif sur la séance suivante [Arsoniadis et al., 2022]. Cet impact négatif semblait d'autant plus important lorsque le travail en résistance à sec comprenait des séries de répétitions à des charges lourdes (> 80%), des séries de travail de l'endurance de force (> 15 répétitions) ou lorsque le travail dans l'eau comprenait des phases nagées à haute intensité [Arsoniadis et al., 2020, 2022, 2024]. Néanmoins cet impact négatif semble pouvoir être limité par l'intégration d'une période de récupération passive entre les entraînements d'au moins 20 minutes [Arsoniadis et al., 2022].

D'un point de vue chronique, cette méthode a démontré de larges effets positifs, tant sur la performance que sur des facteurs associés tels que les paramètres cinématiques (fréquence de nage, distance par cycle) ou dynamiques de la nage (force, puissance). Tout d'abord, plusieurs études explorant ce domaine ont remarqué l'efficacité du travail combiné pour l'amélioration de la

performance lors des phases non-nagées. Par exemple, Thng et al. (2019) ont rapporté des résultats probants issus d'études ayant utilisé le travail de pliométrie en vue de l'amélioration des performances du départ. Ces effets positifs se sont manifestés notamment sur des variables clés telles que le temps à 5 m, la vitesse d'envol ainsi que sur la force horizontale appliquée sur le plot de départ. D'autres auteurs [Hermosilla et al., 2021] ont également montré des résultats positifs d'études ayant utilisé des entraînements balistiques, pliométriques ou de la force maximale en vue de l'amélioration des performances des virages. Ces méthodes d'entraînement semblent en effet avoir un impact sur la force et la puissance mesurées au mur, la vitesse maximale de la coulée après le virage et le temps à 5 m du mur.

De manière plus générale, de nombreuses études se sont intéressées à l'efficacité d'un l'entraînement combiné en vue de l'amélioration de la performance globale, en se concentrant principalement sur son effet sur des distances de sprint, bien que certaines études aient étudié également son impact sur des distances mixtes. Le travail à sec mis en place dans ces études était principalement composé de travail de la force maximale, d'hypertrophie, de pliométrie, de gainage ou de combinaison de travail de la force et de l'endurance [Fone & van den Tillaar, 2022; Kwok et al., 2021]. Une synthèse des résultats de plusieurs études a permis de comparer l'impact de ces différents types de travail à sec sur la performance en natation évaluée sur des distances allant de 50 à 200 m (Tableau 3).

Méthodes de travail à sec	Moyenne $\pm$ SD des améliorations de la performance (en %)
Gainage	1,9 $\pm$ 0,8
Hypertrophie	2,6 $\pm$ 1,9
Force maximale	2,7 $\pm$ 0,8
Pliométrie	3,6 $\pm$ 0,8
Combinaison de force et d'endurance	1,3 $\pm$ 0,2

Tableau 3 : Impact des différentes méthodes d'entraînement non-spécifiques à sec sur la performance en natation [Fone & van den Tillaar, 2022].

L'entraînement en force maximale et l'entraînement en pliométrie sont, selon plusieurs revues systématiques [Amaro et al., 2018; Fone & van den Tillaar, 2022; Kwok et al., 2021], les deux méthodes d'entraînement à sec produisant les améliorations de la performance les plus importantes. Il semble en revanche important de souligner que ces résultats représentent des moyennes d'améliorations évaluées parfois sur des distances différentes. Cette observation est à prendre en compte dans l'interprétation des résultats car certaines études ont montré que les bénéfices de ces entraînements peuvent varier en fonction des distances étudiées. Une étude a par exemple mis en évidence des différences dans l'impact

du travail en pliométrie sur les performances mesurées lors d'un 400 m et d'un 50 m crawl [Potdevin et al., 2011]. Une autre limite pouvant intervenir lors de l'interprétation de ces résultats concerne la différence d'âge entre les populations incluses et analysées [Rodríguez González et al., 2022]. En effet, l'état de maturité physique, en partie lié à l'âge chronologique, semble jouer un rôle important dans le développement des compétences motrices [Drenowatz & Greier, 2019] et a donc un impact sur la relation longitudinale entre la force à sec et la performance en natation [Abbott et al., 2022].

À l'instar de l'étude des relations entre les qualités physiques à sec et la nage, l'étude des effets du travail à sec sur la nage ne permet qu'un apport limité d'informations aux pratiques de terrain lorsque seule la performance chronométrique est utilisée comme variable dépendante. Des données biomécaniques comme l'analyse du mouvement via les paramètres cinématiques de la nage (fréquence de nage, distance par cycle) ou comme les paramètres dynamiques (force, puissance) sont alors essentielles pour mieux comprendre comment s'effectue le transfert des qualités physiques de la condition « à sec » vers la condition de nage. Les auteurs d'une synthèse portant sur les effets de l'entraînement contre résistance sur la nage ont ainsi observé un effet majoritairement positif de l'entraînement en force à sec sur la distance par cycle et la fréquence de nage. Ces effets, pris dans leur globalité, se sont néanmoins trouvés non-significatifs probablement en raison de l'hétérogénéité des études (dont certaines montrent des effets significativement positifs) [Kwok et al., 2021]. De même, une étude a permis de montrer qu'avant d'observer un effet sur la performance, l'entraînement en force des jeunes nageurs possédait un effet direct et un rôle important sur les évolutions des paramètres cinématiques de la nage, et particulièrement sur l'augmentation de la fréquence de nage [Morais et al., 2018]. Certains auteurs ont également montré que l'entraînement de la force et de la puissance à sec avait un impact positif sur la force de nage mesurée sur un protocole de nage attachée, sans nécessairement observer d'effets positifs direct sur la performance [Norberto et al., 2023] ce qui pourrait suggérer le fait que les conditions d'une évaluation en nage attachée ne sont pas satisfaisantes au regard de l'activité réelle de nage. D'autres auteurs n'ont pas observé d'effets significatifs des mêmes méthodes d'entraînement sur la force de nage [Amaro et al., 2017]. Ces deux études ont néanmoins conclu que, comparé à l'entraînement de la force à sec, l'entraînement de la puissance et de l'explosivité amenait à de meilleurs résultats sur la force de nage ou sur la performance. Une autre étude a investigué les effets de l'entraînement combiné de la force à sec avec des entraînements à haute intensité dans l'eau en montrant des effets positifs de cette méthode sur la force de nage et la performance sur 400 m [Aspenes et al., 2009].

Comme décrit précédemment, la modification des paramètres propulsifs peut avoir des conséquences sur les paramètres hydrodynamiques [Gatta et al., 2018; Toussaint et al., 2000]. L'investigation des paramètres de résistance active a donc pour intérêt de mettre en perspective des adaptations qui pourraient circonscrire les évolutions de performance grâce au travail de la force à sec. Néanmoins la seule étude à notre connaissance portant sur ce sujet n'a pas remarqué d'évolutions

significatives de ces paramètres hydrodynamiques au cours d'une période combinant des entraînements de la force à sec et des entraînements en natation [Garrido, Marinho, Reis, et al., 2010].

Lorsque la notion de transfert entre la préparation physique à sec et la nage est abordée, il est souvent question de la spécificité de l'entraînement dans l'environnement qui n'est pas celui de la performance in-situ [Crowley et al., 2017]. La préparation physique à sec en natation est essentiellement constituée d'un entraînement traditionnel de la force qui n'est pas spécifique à l'activité mais qui permet d'imposer des contraintes plus fortes que l'entraînement dans l'eau [Wirth et al., 2022]. Tanaka et al. [Tanaka et al., 1993] ont ainsi expliqué certains résultats peu probants de l'entraînement de la force à sec sur la force propulsive par le surcroît de spécificité de l'entraînement à sec. En revanche d'autres méthodes d'entraînement en résistance plus spécifiques existent et sont utilisées aussi bien sur le terrain que dans la littérature scientifique [Aspenes & Karlsen, 2012; Tate et al., 2015]. En résumé, bien que nombre d'auteurs aient montré l'efficacité d'un programme d'entraînement en force ou en puissance à sec sur la performance aquatique et certains facteurs de cette performance, peu d'études ont porté sur le sujet du transfert entre les deux conditions. Ainsi, la littérature manque de recommandations concrètes sur ce phénomène qui représente pourtant un enjeu majeur dans l'optimisation des processus d'entraînement.

3.2. Approches spécifiques de l'entraînement en résistance et leurs effets sur la performance

Dans une optique d'amélioration du transfert, une autre approche consiste à considérer que les mouvements travaillés à sec doivent se rapprocher le plus possible de la nage, ce qui a été étayé par certaines études [Sadowski et al., 2020]. Ainsi, des ergomètres spécifiques permettant de reproduire le mouvement de nage, aussi appelés « swim bench », sont utilisés afin d'imposer une contrainte plus élevée que la résistance de l'eau lors de la nage, tout en imitant le mouvement (Figure 11).



Figure 11 : « swim bench » utilisé lors de l'entraînement à sec afin d'imposer une résistance tout en imitant le mouvement de nage [Lutula, 2019].

Il a été rapporté que ce type d'entraînement permet de mieux transférer les gains de force à sec et dans l'eau vers la vitesse de nage comparé à un entraînement traditionnel à sec de type « circuit training » [Sadowski et al., 2020]. Ce transfert était évalué à partir d'un coefficient calculé à partir des évolutions (Δ) des différents paramètres mesurés à sec et dans l'eau :

$$\text{Coefficient de transfert} = \frac{\Delta (\text{en \%}) \text{ du paramètre mesuré dans l'eau}}{\Delta (\text{en \%}) \text{ du paramètre mesuré à sec}} \quad (13)$$

En revanche, d'autres résultats n'ont pas montré d'effets significativement différents sur la performance en sprint entre un entraînement combiné natation / « swim bench » et un entraînement en natation seul [Roberts et al., 1991]. Bien que la plupart des études investiguant le lien entre la puissance mesurée sur le « swim bench » et la performance en sprint aient montré des résultats positifs, il ne semble pas y avoir de consensus autour de l'effet d'un entraînement à sec grâce à cet outil sur la performance [Muniz-Pardos et al., 2019].

Le travail en résistance peut se retrouver dans des méthodes plus spécifiques encore. En effet, l'ajout de résistance par différents moyens directement dans l'eau lors de la nage est une approche d'entraînement contre résistance souvent décrite comme un moyen de favoriser le transfert de force entre les qualités développées à sec et la nage [Toussaint & Vervoorn, 1990]. Les moyens utilisés dans cet objectif sont nombreux, on recense par exemple l'utilisation de résistances externes comme :

- Des « power racks » qui consistent à attacher le nageur à des poulies aux bords du bassin lui permettant de soulever des poids ou des seaux remplis d'eau (Figure 12.A. & B.) [Kojima et al., 2018]
- Des élastiques qui consistent à appliquer une résistance croissante au nageur au fur et à mesure de son déplacement (Figure 12.C.) [Girolid et al., 2007].

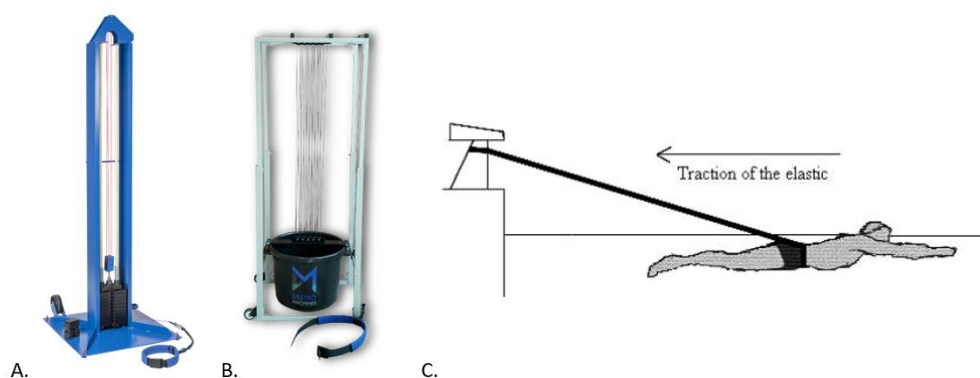


Figure 12 : Équipements permettant l'application de résistances externes à l'avancement du nageur (A. : poids en fonte ; B. : seau d'eau ; C. : élastique [Girolid et al., 2007]).

Le travail en résistance dans l'eau peut également inclure l'utilisation d'équipements ayant pour objectif d'augmenter la masse d'eau à déplacer par le nageur, comme des plaquettes (Figure 13.A.)

[Konstantaki et al., 2008], des parachutes (Figure 13.B.) [Tate et al., 2015], ou des « drag suits » qui sont des maillots de bain évasés pouvant se gorger d'eau (Figure 13.C.) [Dragunas et al., 2012]



Figure 13 : Équipements permettant l'augmentation des masses d'eau à déplacer par le nageur pour se propulser (A. : plaquettes ; B. : parachute ; C. « drag suit »).

Les méthodes d'entraînement en résistance dans l'eau utilisant ces équipements (résistances externes ou résistances actives) semblent avoir des effets limités sur la performance [Fone & van den Tillaar, 2022; Haycraft & Robertson, 2015; Jin et al., 2024]. Ce manque de résultats pourrait s'expliquer par le fait que la plupart des études sur le sujet comparent l'entraînement en résistance dans l'eau à l'entraînement en force à sec, sans évaluer l'effet combiné des deux par rapport à l'entraînement en force à sec seul. Une autre méthode, dérivée de l'utilisation d'un système de mesure de la force propulsive (le MAD-System, cf. section 4 du cadre théorique), permettant au nageur de prendre appui sur des surfaces fixes caractérisées par des appuis solides pour se propulser, a montré des effets plus significatifs sur la force et la puissance propulsive et la performance sur 50, 100 et 200 m [Toussaint & Vervoorn, 1990]. Pour résumer, le Tableau 4 compare les effets des différentes méthodes spécifiques d'entraînement en résistance combinées à un entraînement traditionnel en natation.

Méthodes de travail	Moyenne $\pm$ SD des améliorations de la performance (en %)
Travail de la force des membres supérieurs dans l'eau	1,7 $\pm$ 1,2
Travail de la force des membres inférieurs dans l'eau	0,65
Travail en résistance dans l'eau	2,5 $\pm$ 1,9
Travail de résistance à sec imitant la nage	2,6 $\pm$ 1,9

Tableau 4 : Impact des différentes méthodes d'entraînement spécifiques à sec et dans l'eau sur la performance en natation [Fone & van den Tillar, 2022].

Enfin, d'autres approches consistent à enchaîner dans un laps de temps restreint un effort à sec et un effort dans l'eau. La potentialisation post-activation (PAP) est une de ces approches qui semble posséder une influence positive sur la performance en sprint d'un point de vue aigüe [Cuenca-

Fernández, Ruiz-Teba, et al., 2020; Sarramian et al., 2015] et particulièrement sur la phase de départ [Cuenca-Fernández et al., 2015; Kilduff et al., 2011]. Elle consiste à réaliser un effort nécessitant une contraction musculaire proche de sa valeur maximale à sec (par exemple 3 tractions à 85% de la 1RM) ou dans l'eau (par exemple 4 sprints de 10 m avec une résistance imposée par un power rack) puis une courte période de repos ($\approx$ 8 minutes) avant de réaliser une performance en sprint. D'un point de vue chronique, une approche d'entraînement similaire consistant à enchaîner un travail en résistance à sec et des efforts maximaux courts dans l'eau a également montré des effets positifs sur le développement de la puissance dans l'eau sans que cela n'aboutisse à une amélioration de la performance [Gatta et al., 2014]. Cette méthode reste en revanche très peu étudiée malgré son utilisation sur le terrain [Cometti, 1989].

La combinaison de différentes formes d'entraînement telle qu'on la retrouve lors de l'entraînement concomitant en préparation physique à sec et en natation soulève certains problèmes qu'il semble nécessaire de prendre en compte pour l'optimisation du processus de transfert. L'interférence entre le développement des qualités à sec et dans l'eau et le délai d'expression des qualités travaillées à sec dans l'environnement aquatique sont ainsi des phénomènes qui peuvent impacter le transfert entre les deux environnements.

3.3. Considérations en vue de l'optimisation du processus de transfert

L'interférence entre l'entraînement de la force en préparation physique et l'entraînement aérobie a été étudiée dans différents sports et est un sujet récurrent de la préparation physique pour la plupart des disciplines à dominante aérobie telles que la course à pied, le ski de fond ou le cyclisme. Il a été montré, pour ces disciplines à dominante aérobie, que l'entraînement de la force maximale couplé à un entraînement en endurance permettait d'améliorer l'économie de déplacement, la vitesse maximale, ainsi que la vitesse maximale aérobie et donc la performance [Beattie et al., 2014]. Au-delà de ces effets positifs et considérant la nature opposée de ces deux types d'entraînement induisant des adaptations éloignées [Holloszy & Coyle, 1984; MacDougall et al., 1980], des interférences négatives peuvent ainsi être relevées [Fyfe et al., 2014]. Les améliorations des capacités maximales de force et de puissance seraient ainsi plus importantes si l'entraînement en force n'était pas combiné à un entraînement en endurance (Figure 14) [Wilson et al., 2012]. Cela pourrait notamment s'expliquer par les stimuli cataboliques de l'entraînement en endurance et des réponses hormonales qui en découlent [Haycraft & Robertson, 2015; W. J. Kraemer et al., 1995].

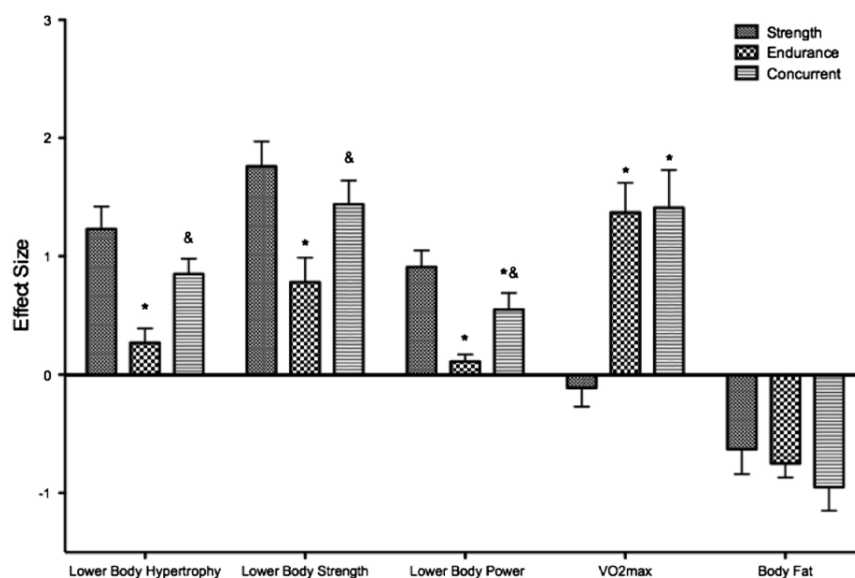


Figure 14 : Tailles d'effets des différents types d'entraînement (force, endurance, combinaison des deux) sur les paramètres associés à la force (hypertrophie, force, puissance des membres inférieurs) et à l'endurance (consommation maximale d'oxygène, taux de masse grasse) [Wilson et al., 2012].

Ces résultats proviennent majoritairement d'études ayant investigué des disciplines de demi-fond malgré l'intérêt plus marqué de cette thèse pour les disciplines de sprint. Néanmoins, une particularité de la natation réside dans le fait que les nageurs de sprint, bien que leur temps d'effort en course soit relativement faible, se voient souvent imposés de hauts volumes d'entraînement dans l'eau [Wirth et al., 2022] représentant fréquemment plus de 45 km par semaine [Pollock et al., 2019]. Or, il a été montré que le volume, la fréquence et les modalités d'entraînement en endurance sont des facteurs possédant une influence sur les interférences entre les deux types d'entraînement [Wilson et al., 2012]. Par exemple, certains auteurs préconisent un volume inférieur à 5000 m par jour pour optimiser l'assimilation du travail de la force maximale à sec [Haycraft & Robertson, 2015]. Cette considération a notamment fait émerger des pratiques d'entraînement basées sur un faible volume d'entraînement dans l'eau réalisé à des intensités plus spécifiques aux allures de course pour certains nageurs de sprint [Berg, 2018]. De même, la périodisation des entraînements dans les deux environnements semble favoriser le transfert de la préparation physique vers la nage [Wirth et al., 2022] même si des travaux sur ce sujet n'ont pas montré d'effets positifs sur la performance en natation [Schumann et al., 2020]. Concernant le temps de récupération entre les séances, il semble que d'un point de vue chronique, un temps de récupération inférieur à 24 heures entre une séance d'entraînement de la force et une séance à dominante aérobie ne soit pas avantageux dans le but de maximiser les adaptations neuromusculaires et aérobie [Robineau et al., 2016]. Néanmoins, si les contraintes imposent l'entraînement des deux conditions dans la même journée, alors un temps de récupération d'au moins 4 à 8 heures devrait être observé [Panissa et al., 2022]. D'autres auteurs ont également investigué l'effet de l'ordre entre les séances d'entraînement à sec et dans l'eau ainsi que l'effet du temps de récupération entre les deux entraînements

sur la performance d'un point de vue aigüe [Arsoniadis et al., 2022]. Les résultats ont montré qu'un temps de récupération d'environ 30 à 40 minutes minimum semblait nécessaire pour limiter les effets négatifs d'un entraînement sur l'autre. De plus, malgré l'absence d'influence de l'ordre entre les séances sur la performance, les auteurs de l'étude citée précédemment ont recommandé le placement de la séance dans l'environnement qui était principalement visé par l'objectif de la journée en premier lieu. Concernant l'intensité de l'entraînement dans l'eau, l'intégration de répétitions de sprints ou de sprints contre résistance semble limiter l'interférence entre l'entraînement en force et le travail en endurance dans l'eau [Vechin et al., 2021]. De même, l'entraînement à haute intensité (HIIT) ne semble pas impacter significativement les capacités de force maximale de l'athlète d'un point de vue aigüe [Panissa et al., 2022], et semble conduire, lorsqu'il est associé à un entraînement de la force à sec de manière chronique, à une amélioration des performances en sprint [Amara et al., 2023].

L'ensemble de ces paramètres peuvent donc avoir un impact négatif sur le développement des qualités de force en préparation physique à sec. Il est en revanche important de garder à l'esprit l'objectif premier de ce travail combiné qui est l'optimisation de la performance en sprint. Bien que les adaptations en force ou en endurance ne soient effectivement pas maximisées par l'entraînement combiné comparé à l'entraînement en force ou en endurance seul, cette forme combinée d'entraînement a en effet montré de multiples effets positifs sur la performance en sprint.

Un autre aspect fondamental de l'élaboration des entraînements à sec et dans l'eau ainsi que de leur périodisation consiste à considérer qu'il existe un délai entre l'amélioration de la force à sec et l'amélioration de la performance aquatique. Aucune étude à notre connaissance n'a eu pour but d'étudier la durée de cette latence. En revanche, certains auteurs ont constaté que les effets positifs d'un travail de la force maximale et de l'explosivité à sec sur la performance n'interviennent qu'après une période de quatre semaines sans entraînements à sec [Amaro et al., 2017]. De plus, il semble que l'évolution des paramètres spatio-temporels de la nage, et plus spécifiquement l'amélioration de la fréquence, était quasi immédiate après un travail en force à sec et préliminaire à l'amélioration de la vitesse et donc de la performance en natation [Amara, Barbosa, et al., 2021; Morais et al., 2018].

4. Profilage force-vitesse au service de la préparation physique et de l'évaluation en natation

Les améliorations en préparation physique à sec et la qualité de leur transfert vers le milieu aquatique pourraient être objectivées par différentes méthodes. Le profilage force-vitesse (F-V) est une de ces méthodes et est particulièrement pertinente au regard des contraintes imposées par les exercices en préparation physique à sec et par le déplacement en natation.

De manière générale, la performance sportive repose dans de nombreux sports sur les capacités d'application d'une force sur une durée plus ou moins courte et sur des mouvements répétés un certain nombre de fois. Ainsi, plus l'action imposée est courte (sauts, changements de direction, sprint), plus la nécessité de produire une puissance maximale est importante [Haff & Nimphius, 2012]. Les capacités maximales de force et de vitesse, sous-jacentes à la production de puissance, sont donc des paramètres fondamentaux de la performance [Morin & Samozino, 2016]. Cependant, les niveaux de résistance ou de vitesse imposés par les conditions dans laquelle est réalisée la performance, conditionnant respectivement la vitesse du mouvement ou la force appliquée, varient entre les disciplines sportives et même au cours des événements d'une même discipline. Par exemple, les capacités de sprint d'un athlète en condition terrestre nécessitent l'application de forces à des vitesses de plus en plus élevées au cours du sprint [Samozino et al., 2016]. De même, l'implication relative de la force ou de la vitesse telle que mesurée sur un saut dépend de l'angle de la poussée au sol [Samozino et al., 2012].

Chaque action réalisée avec une intention d'effort maximal se situe donc sur un continuum entre la force maximale et la vitesse maximale. Ce continuum, appelé relation force-vitesse se base sur les mécanismes fondamentaux de la contraction musculaire et sur l'analyse du système polysegmentaire en interaction. Nous nous proposons dans la section suivante de retracer la genèse de cette relation force - vitesse avant d'explorer les applications pratiques au champ des sciences du sport.

4.1. Evaluation de la relation force-vitesse : de la fibre musculaire isolée au mouvement poly-articulaire

Les études s'intéressant à la relation entre les qualités de force et de vitesse ont montré une relation négative entre ces deux paramètres, la force produite par le muscle diminuant au fur et à mesure que la vitesse de contraction augmente [Hill, 1922]. Cette relation peut s'expliquer par les caractéristiques des ponts d'actine-myosine, structures responsables de la contraction musculaire. En effet, puisqu'un temps minimal est nécessaire pour que les têtes de myosine s'attachent et se détachent des filaments d'actine, le nombre total de ponts d'actine-myosine créés durant la contraction diminue lorsque la vitesse de contraction augmente. Etant donné que la force produite est proportionnelle au nombre de ponts d'actine-myosine créés, la force diminue donc également au fur et à mesure que la vitesse de contraction augmente [Cormie et al., 2011].

L'exploration de cette relation F-V débute par les travaux de Archibald Vivian Hill qui s'intéresse aux mécanismes de la contraction musculaire. Ses travaux sur la production de chaleur dans le muscle seront notamment récompensés par le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1922. Cette même année, une de ses études menée sur un mouvement mono articulaire de flexion de coude permet de mettre en lumière une relation linéaire entre la force et la vitesse de contraction in vivo (Figure 15.a.) [Hill, 1922], relation confirmée ultérieurement par d'autres auteurs [Hansen & Lindhard, 1923; Lupton, 1922]. Hill justifie plus tard cette relation linéaire par les propriétés visqueuses des éléments contractiles du muscle qui induiraient une résistance supplémentaire à la résistance externe lors des vitesses de raccourcissement plus élevées [Hill, 1950]. Cependant, dès 1922, Hill émet l'hypothèse que la linéarité de la relation pourrait être due à des mécanismes neuronaux et continue donc les recherches sur le sujet. Il explore la relation F-V in-vitro à l'échelle d'un muscle isolé de grenouille, stimulé électriquement afin d'éliminer l'influence potentielle du système nerveux central [Hill, 1938]. Dans cette étude, une relation hyperbolique entre la force et la vitesse est exprimée (Figure 15.b.). Cela amène l'auteur à considérer les propriétés contractiles du muscle non plus comme visqueuses mais comme viscoélastiques [Hill, 1950]. D'autres mesures in-vitro ont exploré cette relation à l'échelle d'une seule fibre musculaire humaine, stimulant sa contraction maximale grâce à une solution à base de Ca^{2+} , trouvant également une relation hyperbolique [Widrick et al., 1996]. De même, plusieurs autres auteurs ont confirmé la relation hyperbolique à l'échelle du muscle [Thorstensson et al., 1976; Wilkie, 1949]. Toutefois, cette relation hyperbolique ne se retrouve in vivo que dans certaines conditions [Wilkie, 1949], notamment concernant le mouvement évalué qui doit :

- Impliquer une articulation géométriquement simple
- Impliquer peu de muscles
- Ne pas entraîner la déformation / le mouvement d'autres parties du corps

Ces différentes recherches ont également montré que la courbure de la relation hyperbolique dépendait de la force isométrique du muscle et donc de beaucoup d'autres facteurs comme la fatigue [Dern et al., 1947], la longueur du muscle, la température, et les individus testés [Alcazar et al., 2019].

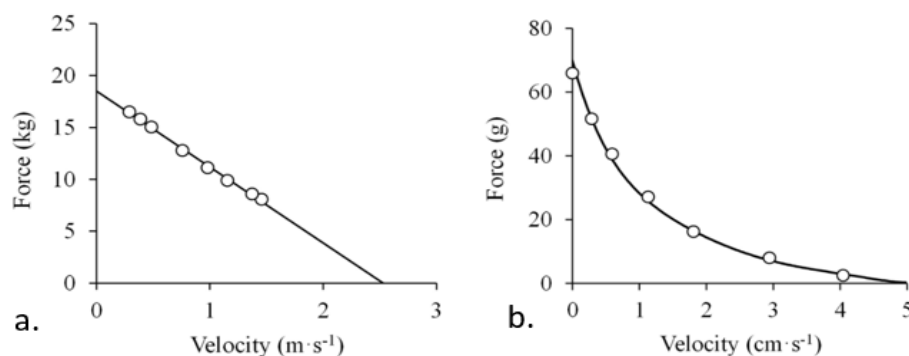


Figure 15 : Relations force-vitesse linéaire et hyperbolique issues des travaux de Hill en 1922 (a.) et 1938 (b.) [Alcazar et al., 2019].

Dans la suite de ces travaux, certains auteurs ont montré qu'il était possible de représenter la relation F-V in vivo par une fonction linéaire à des forces supérieures à 40 % de F₀ tandis qu'elles suivent une fonction curvilinéaire en dessous de ce niveau de force [Ralston et al., 1949]. Ce type de relation pourrait s'expliquer par les variations de la force maximale isométrique, qui influence la courbure de la relation, avec l'apparition de la fatigue au cours du protocole de mesure contre des charges croissantes [Ritchie, 1954]. Un modèle affiné est introduit par Edman qui étudie la relation F-V à l'échelle de la fibre musculaire in-vitro et montre une relation en double hyperbole (Figure 16.b.) [Edman, 1988; Edman et al., 1976]. Cette correction dans la zone de force élevée / vitesse basse serait vraisemblablement due à des cinétiques des ponts actine-myosine spécifiques à la vitesse [Piazzesi et al., 2007], plutôt qu'à un mécanisme inhibiteur central altérant la fonction concentrique du muscle, comme cela avait été proposé précédemment dans la littérature [Alcazar et al., 2019].

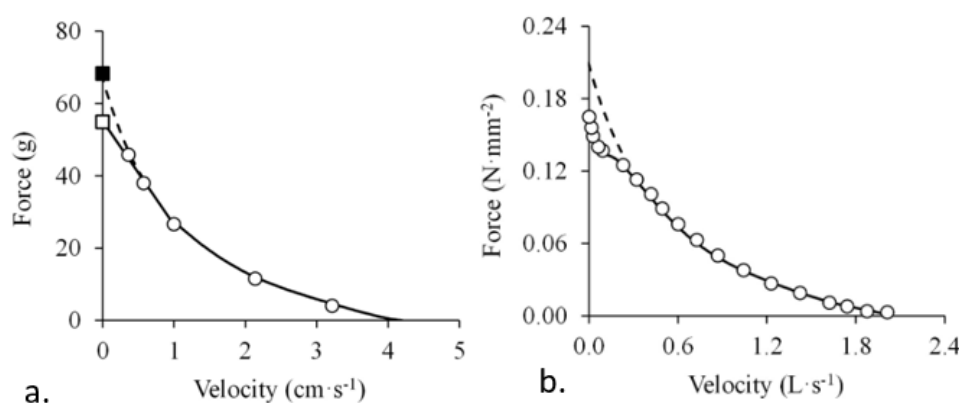


Figure 16 : Modèle hyperbolique avec correction linéaire présenté dans les résultats de Abbott & Wilkie en 1953 (a.) et modèle en double hyperbole présenté dans les résultats de Edman en 1988 (b.) [Alcazar et al., 2019].

L'ensemble des études citées précédemment ont permis d'apporter une base de connaissances expérimentales importante sur la relation entre la force et la vitesse de contraction du muscle tout en apportant des informations clés sur l'interprétation des composantes physiologiques et mécaniques du muscle comme sa viscoélasticité. Néanmoins, les conditions d'évaluations in-vitro ou in-vivo à l'échelle d'un mouvement mono-articulaire diffèrent de la condition de réalisation de la plupart des mouvements sportifs. Ces mouvements complexes intègrent en effet plusieurs articulations et / ou plusieurs groupes musculaires ce qui sous-entend l'implication de facteurs autres que la seule sollicitation des propriétés contractiles du muscle. La dissociation segmentaire [Bobbert, 2012] et plus particulièrement l'implication de mécanismes nerveux [Yamauchi et al., 2007], de différents bras de leviers, de la composante élastique série, des coordinations des muscles agonistes et antagonistes sont des facteurs parmi d'autres [Alcazar et al., 2019] qui peuvent expliquer l'observation d'une relation F-V linéaire sur des mouvements poly-articulaires. Ces relations linéaires ont été remarquées sur nombre de

mouvements sportifs comme des squats [Rahmani et al., 2001], des sauts verticaux [Cuk et al., 2014; Samozino et al., 2008], du leg press [Macaluso & De Vito, 2003], du développé couché [Rahmani et al., 2018], du pédalage en sprint en cyclisme [Vandewalle et al., 1987] ou encore en fauteuil roulant [Hintzy et al., 2003].

De l'ensemble des études précédentes, il ressort que le type de relation concernant la courbe force-vitesse (hyperbolique, quasi-hyperbolique, quasi-linéaire ou linéaire) dépend de la tâche et du contexte auxquels on se réfère, ce qui entraîne l'implication de différents mécanismes biomécaniques ou neurophysiologiques dans la production de force [Bobbert, 2012]. Au-delà des tentatives d'explications des différences entre relation linéaire et hyperbolique, il a été montré par la suite que la relation linéaire entre la force et la vitesse sur des mouvements poly-articulaires constituait un outil fiable et reproductible afin d'estimer les capacités maximales d'un individu [Jaric, 2015; Morin & Samozino, 2016]. En effet, les extrémités de cette relation linéaire représentent les capacités maximales théoriques de vitesse maximale à force nulle ($V_{\max}$) et de force maximale à vitesse nulle ($F_{\max}$). La puissance pour chaque point de la droite F-V peut être calculée en multipliant la force par la vitesse. Ainsi à chaque profil F-V peut être associé un profil puissance-vitesse. De même, les valeurs de force (F_{opt}) et de vitesse (V_{opt}) produisant la puissance maximale d'un individu sur un mouvement donné peuvent être déduites de cette relation puissance-vitesse. Ces valeurs se situent légèrement en dessous de 50% des capacités maximales de l'individu sur les mouvements présentant une relation F-V non linéaire [Jaric, 2015]. Concernant la relation linéaire, les valeurs de force et de vitesse produisant un niveau de puissance maximale ($P_{\max}$) se situe à 50% des capacités maximales de l'individu (Figure 17) donnant ainsi :

$$P_{\max} = \frac{F_{\max} \cdot V_{\max}}{4} \quad (14)$$

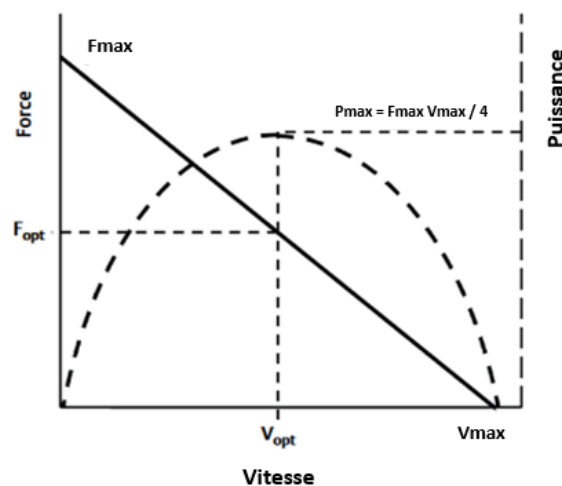


Figure 17 : Profils force-vitesse et puissance-vitesse tels que évalués sur un mouvement poly-articulaire [Jaric, 2015].

4.2. Méthodologies d'évaluation de la force et de la vitesse en préparation physique : outils et aspects métrologiques

La connaissance du chargement mécanique des structures articulaires ou du sportif à l'échelle globale (en interaction avec son environnement) est essentielle en sciences du sport.

Concernant les forces musculaires, celles-ci ne peuvent pas être directement mesurées in-vivo sans faire appel à des techniques invasives inappropriées au contexte sportif. Dans le cas d'une contraction isométrique, une estimation peut être formulée par la mesure du signal électrique distribué par le système nerveux aux commandes périphériques (c'est-à-dire le muscle) comme source d'information permettant une estimation de la force [Kuthe et al., 2018]. Cette mesure peut être réalisée par électromyographie (EMG) de surface, moins invasive que l'électromyographie intra-musculaire. Les données « d'entrée » d'activation neuro-musculaire sont ainsi associées aux données de sortie qui représentent une deuxième source d'information de la force musculaire [Crago, 1992]. Ce type de données est la résultante de la force produite par plusieurs chefs musculaires pour une action donnée [McMahon, 2020] ce qui implique le principe de coordination musculaire nécessaire à la réalisation de cette tâche motrice. Toutefois, ces approches sont proposées dans le cadre de contractions isométriques, excluant leur application à la compréhension d'un mouvement. En effet, le lien entre l'activation (obtenue par EMG) et la force produite n'est pas trivial [Hug et al., 2015] en particulier pour des tâches très dynamiques (pédalage, course, natation notamment). Pour pallier cette limite, les modèles musculosquelettiques constituent une avancée notable dans le champ de la biomécanique et permettent d'estimer les efforts musculaires à partir de la connaissance de la cinématique et des efforts externes mesurés au cours d'un mouvement sportif [Pouliquen, 2017].

Dans le contexte du sportif en interaction avec son environnement, les méthodes permettant l'estimation de production de force, de vitesse et de puissance dépendent du contexte dans lequel elles sont utilisées. Dans le contexte de la recherche scientifique, l'utilisation de méthodes invasives et de matériel coûteux est plus courante que dans le contexte clinique pour la recherche médicale [Drey et al., 2021] ou sur le terrain pour la recherche en sciences du sport [Asimakidis et al., 2024]. Ces méthodes diffèrent également en fonction du mouvement évalué et du mode de contraction musculaire. On distingue ainsi les mesures de force isométriques (sans déplacement des segments corporels), isocinétiques (imposant une vitesse constante grâce à une charge variable), ou iso-inertielles (imposant une charge constante). Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients. Les mesures isométriques et isocinétiques semblent ainsi montrer une validité interne faible (fidélité des mesures, liée par exemple à la calibration du système, précision d'une vitesse constante ou d'une amplitude, absence d'interférences mécaniques) mais une validité externe élevée (applicabilité à une situation réelle, dans des environnements extérieurs au laboratoire ou au cadre contrôlé du test) alors qu'il en est

l'inverse des mesures iso-inertielles [Abernethy et al., 1995]. De plus, les mesures isométriques ne permettant pas la mesure de vitesse ou de puissance et les mesures isocinétiques nécessitant souvent du matériel spécifique, encombrant et coûteux [Asimakidis et al., 2024], l'utilisation des mesures à charge constante semble donc être privilégiée sur le terrain.

Parmi les outils de mesure utilisés dans cette dernière condition, certains sont onéreux, difficilement transportables ou ne répondent pas toujours aux exigences du terrain tandis que d'autres sont plus adaptés à une utilisation intuitive pour les acteurs de terrain (entraîneurs, préparateurs physique, accompagnateurs scientifiques à la performance). Certains auteurs ont notamment montré que les encodeurs linéaires tels que le Gymaware (Kinematic Performance Technology, Canberra, Australia ; Figure 18) [Orange et al., 2020] et les applications mobiles qui utilisent la caméra du smartphone comme moyen de mesure étaient des outils précis pour mesurer des vitesses sur des mouvements linéaire à amplitude restreinte comme le développé couché tandis que les centrales inertielles fournissaient des données moins fiables [Pérez-Castilla et al., 2019]. De même, la précision du Gymaware a été vérifiée par de nombreuses études concluant à un appareil fiable afin de mesurer les vitesses lors de différents mouvements [Jovanovic & Jukic, 2020; Orange et al., 2020]



Figure 18 : Placement d'un encodeur linéaire (Gymaware) destiné à mesurer la vitesse de la barre sur différents mouvements.

Les forces (F) et puissances (P) produites sur ces mouvements sont ensuite estimées à partir de la relation entre l'accélération (a), l'accélération de la pesanteur ($g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$) et la masse déplacée (m) avec :

$$F = m \times (g + a) \quad (15)$$

Et

$$P = F \times V \quad (16)$$

D'autres travaux ont néanmoins montré que l'estimation de force et de puissance sur des sauts à partir de l'utilisation du Gymaware présentait des limites liées à des erreurs systématiques et aléatoires

importantes [Crewther et al., 2011], tandis que l'utilisation d'une application smartphone couplée à la caméra haute fréquence d'échantillonnage d'un iPhone constituait une méthode précise et fiable afin de mesurer les paramètres de performance de sauts verticaux [Balsalobre-Fernández et al., 2015; Giroux et al., 2014]. Ces méthodes et outils permettent d'estimer les forces développées pour accélérer la charge et les vitesses de déplacement de la charge dans différentes conditions à des niveaux de contraintes différents. Elles sont comparables pour un même individu et entre individus seulement si les conditions et les niveaux de contraintes sont standardisés [Abernethy et al., 1995]. Elles peuvent permettre de mesurer les capacités de force, de vitesse et de puissance sur des niveaux sous-maximaux de résistance. En revanche, ces méthodes ne permettent pas, à partir d'une seule mesure, d'estimer les capacités maximales de force ($F_{\max}$), de vitesse ($V_{\max}$) et de puissance ($P_{\max}$) d'un individu.

Le profilage F-V est un outil, comme précédemment expliqué, qui permet de remplir cette fonction à la fois en sprint, sur des mouvements traditionnels de préparation physique, ainsi que sur des mouvements balistiques [Alonso-Aubin et al., 2021; García-Ramos, Jaric, et al., 2016; Morin & Samozino, 2016]. Sur les mouvements poly-articulaires, cette méthode consiste à mesurer la vitesse et la force de plusieurs points situés sur le continuum F-V. À partir de ces mesures et de la relation linéaire entre la force et la vitesse décrite précédemment, les points correspondants aux extrémités représentent les capacités maximales de vitesse et de force de l'athlète peuvent être mesurés et la puissance maximale estimée (équation 14).

Concrètement le profilage F-V consiste donc pour l'athlète testé à répéter un mouvement standardisé contre des charges différentes. Des mesures réalisées sur différentes charges judicieusement choisies sont nécessaires pour obtenir la régression linéaire F-V [Jaric, 2016]. Le choix du nombre de points peut être vu comme un compromis entre la confiance accordée au protocole de mesure et la fatigue imposée à l'athlète testé. Ainsi, bien qu'il ait été montré que deux charges étaient suffisantes afin de déterminer des valeurs justes et précises des paramètres issus du profilage F-V ($F_{\max}$, $V_{\max}$, $P_{\max}$) [García-Ramos, 2023; Janicijevic et al., 2020], cette méthode ne laisse aucune marge d'erreur lors de la réalisation des mesures. De même, le choix des charges doit tenir compte de la fiabilité de chaque point de mesure, les mesures des hautes vitesses présentant souvent une précision moins élevée que les basses vitesses [Askow et al., 2018; Orange et al., 2020]. De même, plus ces charges représentent des niveaux de résistance éloignés (se situant aux extrémités de la régression F-V), plus les paramètres issus du profilage F-V peuvent être estimés de manière juste et précise [García Ramos et al., 2018; Lindberg et al., 2021].

Des critères de réalisation pour assurer la justesse et la fidélité des mesures sont également à respecter. Concernant les sauts, il est essentiel que l'atterrissage se fasse pointes de pied tendues afin de s'assurer que la position du sujet soit la même lors de la phase de décollage que lors de la phase d'atterrissage permettant ainsi de mesurer un temps de vol fiable [Balsalobre-Fernández et al., 2015],

pour une application rigoureuse des lois de la cinématique dans un champ gravitationnel uniforme. De plus, concernant aussi bien les mouvements impliquant les membres inférieurs que les mouvements impliquant les membres supérieurs, lorsque ces méthodes ont pour but d'évaluer uniquement la phase concentrique de ces mouvements, il est nécessaire de s'assurer que la phase excentrique n'ait pas d'influence sur la phase concentrique mesurée [McMaster et al., 2014]. Pour cela, l'imposition d'un court temps de pause entre la phase excentrique et concentrique permet de contrer cet effet et ainsi augmenter la fiabilité de la mesure [Pallarés et al., 2014]. Il est également nécessaire que l'intention de vitesse soit maximale tout au long de la phase concentrique du mouvement.

4.3. De l'importance des concepts de profils force-vitesse et charge-vitesse en natation : outils et aspects métrologiques

La réalisation d'un profil F-V en natation implique nécessairement des mesures couplées de force et de vitesse. Alors que les mesures de vitesse peuvent se réaliser à partir d'un simple chronomètre puisque les distances sont délimitées par la longueur du bassin, les mesures de force sont plus délicates au vu du milieu fluide dans lequel le nageur évolue. Un des premiers dispositifs utilisé afin de mesurer la force exercée par le nageur est la nage attachée [Karpovich, 1933; Keskinen et al., 1989; Magel, 1970]. Ce protocole de mesure consiste à attacher le nageur par la taille à une jauge de déformation fixée au bord du bassin (Figure 19) [Morouço et al., 2014]. Le nageur fournit donc un effort de nage statique, sans déplacement absolu du corps dans l'environnement aquatique.

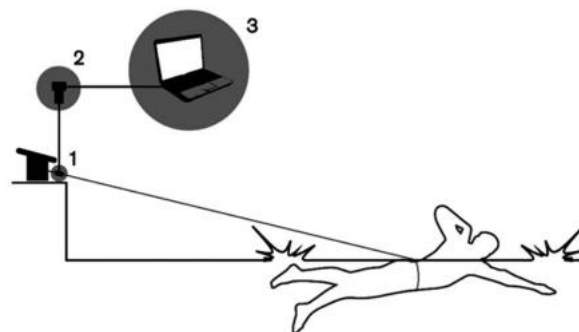


Figure 19 : Système d'évaluation de la force propulsive grâce au protocole de nage attachée (1 : Jauge de déformation, 2 : appareil d'acquisition des données, 3 : ordinateur) [Morouço et al., 2014].

Cette méthode a notamment permis :

- La mesure des forces propulsives des trains séparés (membres inférieurs / membres supérieurs) permettant ainsi d'estimer la contribution des battements de jambes et des bras à la propulsion

totale [Morouço et al., 2015; Yeater et al., 1981], ce qui n'était pas possible avec le MAD-System ne permettant l'évaluation de la force exercée par le nageur qu'à partir des membres supérieurs

- De comparer les valeurs et les patterns d'application de force produite dans plusieurs nages [Morouço, Keskinen, et al., 2011; Yeater et al., 1981], ce qui n'était pas réalisable avec le MAD-System non plus, celui-ci ne permettant l'évaluation de la force propulsive qu'en crawl.

Il a aussi été mis en évidence que la force telle que mesurée sur un protocole de nage attachée était en lien avec les performances en demi-fond (500 yards) [Yeater et al., 1981], sur distance mixte (200 m) [K. B. Santos et al., 2016] et sur les distances de sprint (50, 100 m) [Morouço et al., 2014; Morouço, Keskinen, et al., 2011].

Néanmoins, les protocoles de mesure via la nage attachée présentent certaines limites qui peuvent être compensées par d'autres méthodes. Malgré l'absence d'influence de la nage attachée sur la fréquence de nage [Morouço et al., 2014], la nage attachée semble avoir une influence sur les paramètres cinématiques de la nage. Certains auteurs ont en effet montré qu'en comparaison de la nage libre (sans attache), la nage attachée avait pour conséquence [Maglischo et al., 1984; Samson et al., 2018] :

- Une modification des durées de phases, en particulier une phase propulsive plus longue
- Un plus petit arc de cercle formé par la main lors de la phase propulsive
- Des vitesses de la main différentes
- Une inclinaison du corps plus marquée, avec des battements de jambes plus profonds
- Des mouvements latéraux des hanches et des jambes plus importants

Les paramètres dynamiques de la propulsion sont également fondamentalement différents entre la nage attachée et la nage libre étant donné que le nageur participant à ce type d'évaluation est en surplace et ne rencontre donc pas de force de traînée [K. Dos Santos et al., 2013], cette situation de nage induisant des modifications d'écoulements stationnaires autour du nageur [Cortesi et al., 2024; Takagi et al., 2023]. La contrainte de la nage attachée, sans déplacement, rend donc impossible tout profilage F-V.

Ces limites amènent donc à considérer des approches de mesure de la force de nage avec déplacement basées sur l'estimation des forces à chaque appui. En effet, le « Measurement of Active Drag System » (MAD-System) consiste pour le nageur à se propulser uniquement avec les membres supérieurs grâce à des pads fixés au fond de l'eau et reliés à des encodeurs permettant de mesurer la force propulsive (Figure 20) [Hollander et al., 1986].

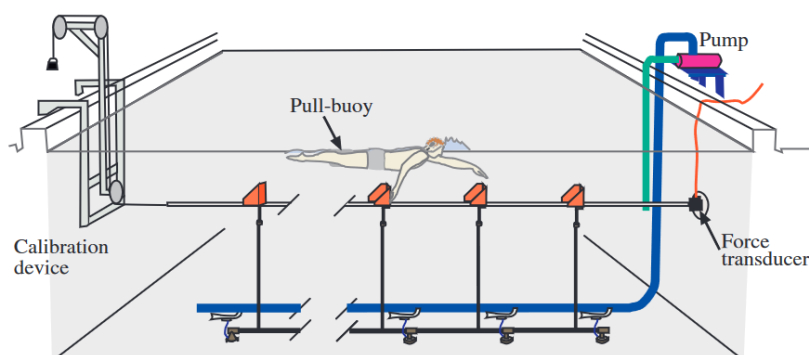


Figure 20 : Illustration schématique du MAD-System [Toussaint et al., 2000].

Cette méthode présente également des limites puisqu'elle est applicable uniquement au crawl et que la propulsion à l'aide des pads représente des appuis fixes, ce qui ne correspond pas à la propulsion habituelle de la nage. De même, afin de réaliser un profil F-V grâce à cet outil, l'ajout d'une résistance constante serait nécessaire et néanmoins difficile à contrôler.

La nage semi-attachée permet d'outrepasser certaines de ces limites. En effet, cette méthode autorise le nageur à se déplacer en étant relié au bord du bassin par un câble. Le nageur se retrouve donc dans une situation plus proche mécaniquement des conditions qu'il connaît, c'est à dire que la force qu'il produit lui sert à vaincre les forces de traînée. Toutefois, le nageur doit également vaincre dans cette situation de nage semi attachée la force (charge) externe lui étant appliquée (Figure 21) [Cortesi et al., 2024; Wei et al., 2022]. Il a ainsi été montré que la nage semi-attachée, lorsque la charge appliquée contre le nageur est limitée (inférieure à environ 5 kg), ne détériore pas les paramètres de coordination de manière significative [Dominguez-Castells & Arellano, 2012].

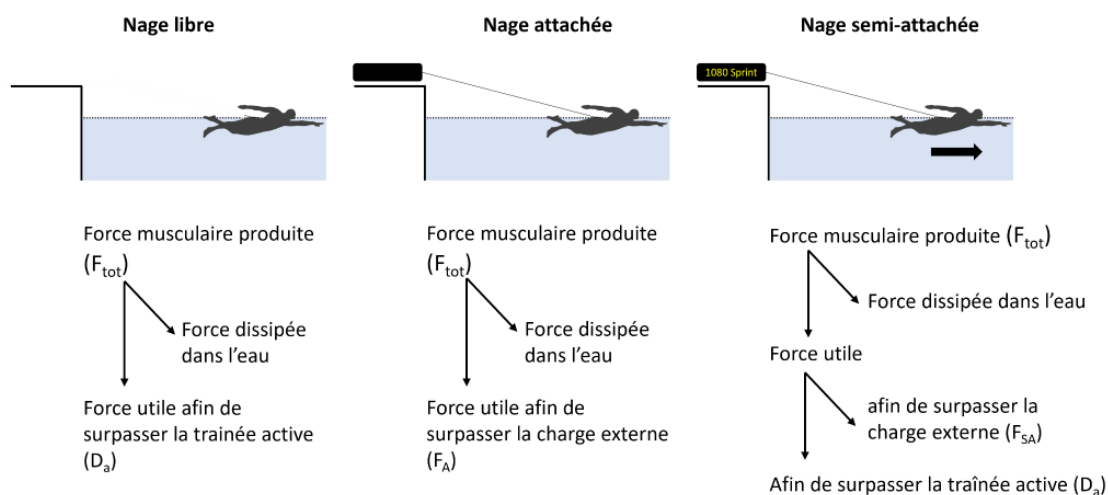


Figure 21 : Production de force dans les différentes conditions de nage (libre, attachée, semi-attachée). Adaptée de [Cortesi et al., 2024].

La méthode des petites perturbations de vitesse (“Small Perturbation Method” - SPM -, parfois appelée également « Velocity Perturbation Method » - VPM), élaborée par Kolmogorov et Duplishcheva (1992), est une de ces méthodes de nage semi-attachée répandue et utilisée par de nombreux auteurs. Elle consiste à utiliser un corps hydrodynamique derrière le nageur (Figure 22), celui-ci créant une résistance additionnelle connue (F_{add}). La comparaison des vitesses maximales avec (V_2) et sans (V_1) frein additionnel permet alors d’estimer les paramètres hydrodynamiques de la nage, en respectant certaines hypothèses. Ainsi, la méthode SPM repose sur l’hypothèse que le nageur est capable de délivrer une puissance mécanique maximale et identique lors des deux passages. Alors, la puissance P_1 délivrée en nageant sans le corps hydrodynamique est égale à la puissance P_2 délivrée avec le corps :

$$P_1 = D_{a,1} \cdot V_1 \quad \text{sans le corps hydrodynamique} \quad (17)$$

$$P_2 = D_{a,2} \cdot V_2 \quad \text{avec la résistance ajoutée (corps hydrodynamique)} \quad (18)$$

$$\text{Où : } D_{a,1} = 1/2 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^2 \text{ est la résistance active sans le corps hydrodynamique} \quad (19)$$

$$D_{a,2} = 1/2 \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot V_2^2 + F_{add} \text{ est la résistance active avec la résistance ajoutée (} F_{add} \text{)} \quad (20)$$

ρ est la masse volumique de l’eau (1000 kg.m^{-3}), S est la surface caractéristique du nageur, et F_{add} est la résistance ajoutée due au corps hydrodynamique, V_1 est la vitesse maximale en condition de nage libre sans frein, V_2 est la vitesse maximale lors du passage avec frein additionnel.

L’hypothèse de puissance délivrée conservée entre les deux passages s’écrit alors :

$$\frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot S \cdot V_2^3 + F_{add} \cdot V_2 \quad (21)$$

Ceci permet alors de déduire la résistance active du nageur (correspondant à la mesure lors du premier passage) :

$$D_{a,1} = \frac{F_{add} \cdot v_2 \cdot v_1^2}{v_1^3 - v_2^3} \quad (22)$$

Cette méthode pose toutefois la question de l’ajustement de la charge ajoutée. Une charge provoquant une petite perturbation de vitesse est recommandée de manière à préserver un pattern de nage similaire : inférieure à 10 % comparé à la vitesse maximale sans charge [Kolmogorov & Duplishcheva, 1992], voire dans une gamme encore plus restreinte (4-6%) (Kolmogorov, 2008; Kolmogorov et al., 2021). La méthode ATM (Assisted Towing Method) reprend un formalisme proche de la méthode SPM mais adapté à une nage tractée par l’ajout d’une force externe [Formosa et al., 2012].

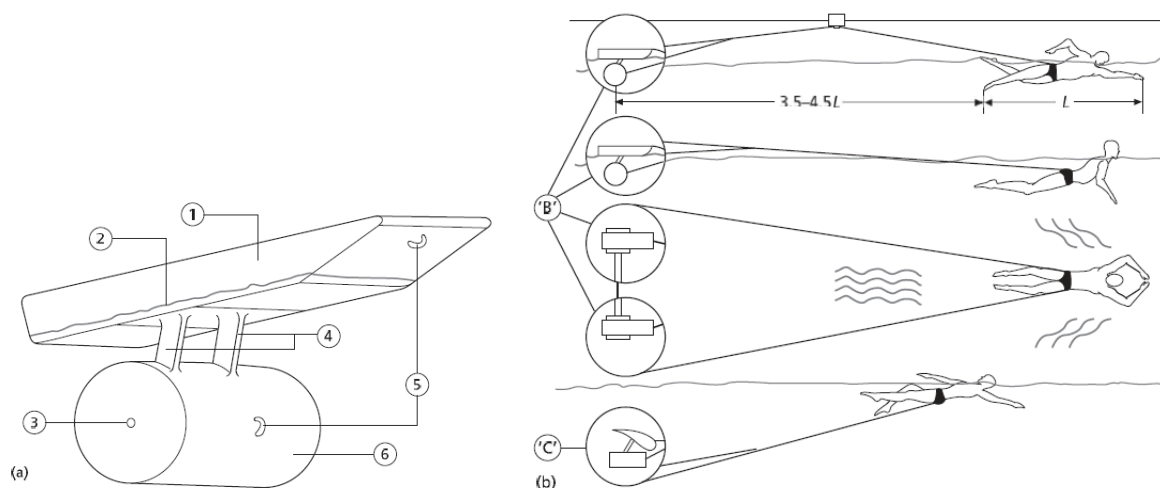


Figure 22 : Méthode SPM des petites perturbations de vitesse : a) corps hydrodynamique engendrant une traînée additionnelle pour le nageur ; b) positionnement du corps hydrodynamique par rapport au nageur [Kolmogorov & Duplishcheva 1992].

Bien que les bases théoriques du modèle SPM présentent un intérêt indéniable dans la perspective d'évaluation des qualités hydrodynamiques des nageurs, sa mise en œuvre basée sur l'utilisation d'un corps hydrodynamique offrant une résistance ajoutée pose le problème du contrôle de la charge qui est essentielle pour établir un profil F-V. En effet :

- La traînée additionnelle associée au corps hydrodynamique est issue d'un abaque, ce qui implique une incertitude sur son estimation.
- Bien qu'une distance optimale soit choisie entre le nageur et le corps hydrodynamique (3,5 à 4,5 fois la longueur du corps nageur), des phénomènes turbulents peuvent toutefois subsister et induire une valeur non constante de la résistance ajoutée. Ceci peut être accentué par l'existence d'oscillations verticales du corps hydrodynamique.
- Les variations intra-cycles de vitesse en lien avec le style de nage peuvent entraîner des saccades dans le câble qui relie le nageur au corps hydrodynamique, induisant une diminution de tension sur ce dernier.

Par conséquent, dans la mise en œuvre originelle de la méthode SPM, la charge appliquée au nageur peut être considérée comme variable dans un cycle de nage, notamment en brasse où les fluctuations de vitesses sont importantes. Enfin, il n'est pas possible d'accéder aux fluctuations de vitesses lors du déplacement, avec un tel système. Pour s'affranchir de ces limites, des systèmes de plus en plus sophistiqués ont été mis en place. Ainsi, le système ADES (Active Drag Evaluation System) développé au sein du laboratoire M2S, permet un meilleur contrôle de la charge (utilisant un limiteur de couple, une bobine d'enroulement ordonnée du câble, et un ressort de rappel pour limiter les

fluctuations de vitesse) associée à la mesure de la vitesse instantanée (basée sur un codeur incrémental) (Bideau et al., 2003; Nicolas et al., 2007).

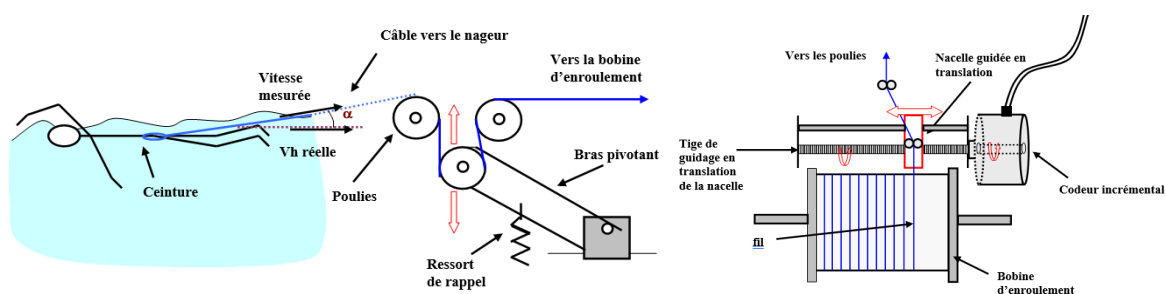


Figure 23 : Descriptif de fonctionnement du système ADES [Bideau et al., 2003; Nicolas et al., 2007].

Plus récemment, de nouveaux systèmes électromécaniques comportant un encodeur linéaire et un servomoteur ont fait leur apparition. Ces systèmes permettent un contrôle de la charge plus précis et sont également transportables pour un usage largement facilité sur le terrain. Ainsi, le 1080 sprint (1080 motion AB, Lidingö, Sweden ; Figure 24) [Rakovic et al., 2020] a permis de mesurer de manière fiable des paramètres constitutifs de la performance en natation sprint tels que le temps mis par le nageur pour couvrir une certaine distance ou encore sa vitesse maximale et sa vitesse pic [Szczepan et al., 2023].



Figure 24 : Le 1080 Sprint, encodeur linéaire incluant également une résistance motorisée.

Néanmoins, bien que fournissant des informations précieuses à l'analyse des facteurs de performance, la nage semi-attachée présente elle aussi certaines limites. En effet, de manière similaire à la nage attachée, lorsque les charges imposées aux nageurs sur les protocoles de nage semi-attachée sont trop importantes (supérieures à environ 7 kg), la cinématique de la nage a tendance à être modifiée au point d'affecter les paramètres de coordination [Cuenca-Fernández, Gay A., et al., 2020; Dominguez-Castells & Arellano, 2012]. De plus, la nage semi-attachée permet certes d'évaluer une puissance via la force appliquée contre une certaine charge d'une part et la vitesse du nageur d'autre part, mais le protocole seul ne donne pas d'indication sur la force et la puissance propulsive générée par le nageur (c'est à dire la force produite afin de surpasser les forces de traînée) [Cortesi et al., 2024].

Afin d'accéder à ces informations sur la force et la puissance propulsive, certains auteurs ont mis en place des profilages charge-vitesse (L-V) dont le principe consiste à mesurer la vitesse et la force sur plusieurs sprints qui sont effectués contre des charges additionnelles croissantes [Olstad et al., 2020]. Le nombre de sprints réalisés par les nageurs pour compléter ces mesures dépendent du compromis entre la fiabilité du protocole et la fatigue infligée aux nageurs [Gonjo et al., 2020]. Ainsi, trois sprints contre des charges fixes (afin de faciliter le passage de plusieurs nageurs) sont recommandés afin de garantir la justesse et la précision des profils. Les charges initialement choisies par ces auteurs étaient 1 kg, 3 kg et 5 kg pour les femmes et 1 kg, 5 kg et 9 kg pour les hommes. La charge maximale choisie doit, selon les études citées précédemment, induire une décélération d'environ 50% de la vitesse maximale, puisque ce principe est proposé par d'autres auteurs concernant des mesures en sprint contre des charges externes [Cross, Samozino, et al., 2018]. À partir de la relation L-V supposée linéaire, les paramètres représentant les points extrêmes de la régression linéaire L-V sont estimés. Ainsi, la charge maximale théorique (L_0) et la vitesse maximale théorique (V_0) sont associées aux capacités aquatiques d'application de la force et de vitesse maximale respectivement [Gonjo et al., 2020; Sengoku et al., 2024]. La pente de la régression peut alors être exprimée ainsi :

$$Pente\ L - V = -\frac{V_0}{L_0} \quad (23)$$

De surcroît, le profilage L-V et sa relation linéaire associée offrent l'opportunité d'estimer D_a et les forces propulsives associées (F_{prop}) sur la base du cadre théorique de la SPM mais dont la mise en œuvre est ici adaptée [Kolmogorov, 2023]. La mise en œuvre de la SPM est en effet adaptée dans le sens où le corps hydrodynamique flottant utilisé dans la publication originale [Kolmogorov & Duplishcheva, 1992] ne permet pas d'établir de profil L-V puisque seuls deux points de mesure sont obtenus (vitesse avec et sans charge), ces derniers pouvant être soumis à des imprécisions évoquées précédemment. Les charges variables et contrôlables par l'intermédiaire des systèmes à résistance motorisés tels que le 1080 Sprint permettent non seulement un établissement du profilage L-V de manière précise mais aussi d'adapter plus facilement la force ajoutée au nageur (F_{add}) afin d'engendrer une diminution de vitesse adaptée à la fiabilité et à la reproductibilité des valeurs de D_a via la SPM [Gonjo & Olstad, 2022]. Plus précisément, il a été montré que, pour améliorer la reproductibilité de ces paramètres, la force externe (F_{add}) appliquée au nageur et utilisée lors de la SPM devrait être comprise entre 37 et 60 N pour les hommes et entre 37 et 47 N pour les femmes [Gonjo & Olstad, 2022] représentant une diminution de la vitesse de 15 % par rapport à la vitesse maximale du nageur en nage libre. La relation entre la force appliquée par le système à résistance motorisé et la vitesse du nageur est donc utilisée pour déterminer la force correspondant à une diminution de la vitesse de 15 % [Keller et al., 2024]. Il est ainsi possible d'adapter l'équation 22 pour estimer la trainée active moyenne supposée égale à la force propulsive moyenne :

$$F_{prop} = D_a = \frac{F_{add} \cdot (0,85 \cdot V_0) \cdot V_0^2}{V_0^3 - (0,85 \cdot V_0)^3} \quad (24)$$

D'autres auteurs se sont intéressés à l'estimation de la traînée active par d'autres méthodes. Ainsi, Cortesi et al. (2024) ont exploré la possibilité d'estimer la traînée active sur la base de tests en nage attachée et semi attachée, et en s'appuyant sur une version simplifiée de la méthode de « propulsion résiduelle » (« residual thrust ») [Narita et al., 2017; Takagi et al., 1999]. Cette approche est basée sur l'hypothèse qu'un nageur peut fournir une force de propulsion égale pendant une nage attachée, une nage libre ou une nage semi attachée contre une charge externe (Figure 21). Pendant la nage attachée, aucune résistance hydrodynamique n'est générée ($D_a = 0$ puisque $V = 0$) et toute la force propulsive du nageur correspond à la tension du câble ($F_{prop} = F_A$). Concernant la nage semi-attachée (à droite sur la Figure 21), la force propulsive peut être utilisée pour exercer une force sur le câble (F_{SA}) ou pour (activement) vaincre la traînée hydrodynamique ($-D_a$), donc :

$$F_{prop} = F_{SA} + (-D_a) \quad \text{en condition de nage semi attachée, d'où, puisque } F_{prop} = F_A : \quad (25)$$

$$F_A = F_{SA} + (-D_a) \quad \text{en condition de nage attachée. Ainsi :} \quad (26)$$

$$(F_A - F_{SA}) = -D_a \quad (27)$$

Par conséquent, la différence entre la force développée lors de mesure de nage attachée et la force obtenue en condition de nage semi-attachée (dite « propulsion résiduelle ») correspond à la traînée active. L'avantage de cette méthode est que la traînée active peut ainsi être estimée à différentes vitesses, telle que reportée sur la Figure 25.

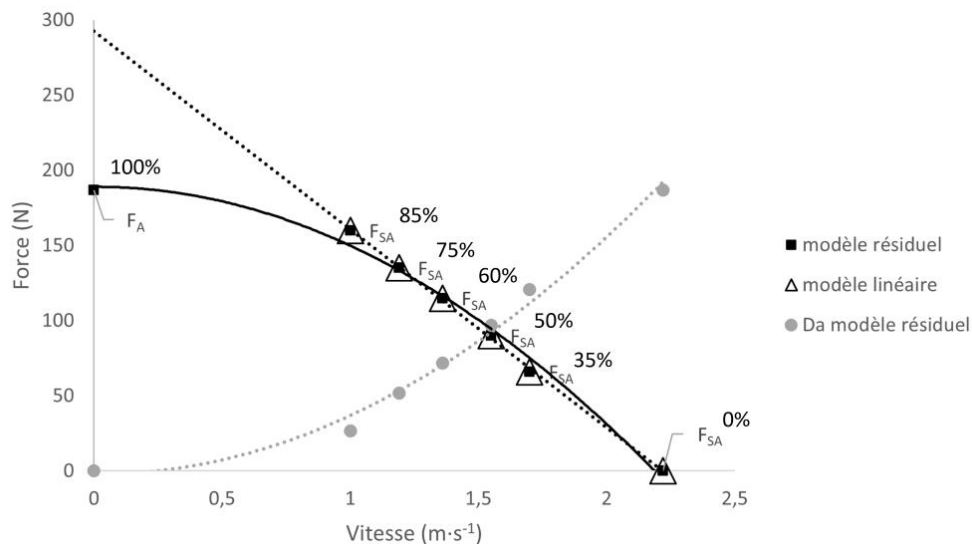


Figure 25 : Comparaison des modèles linéaire et "résiduel" utilisés pour l'estimation de D_a et F_{prop} .

F_A : mesure réalisée en nage entièrement attachée, F_{SA} : mesures réalisées en nage semi-attachée

(adapté de Cortesi et al., 2024).

Cette approche intéressante illustre le fait qu'un modèle linéaire adopté à l'égard de la relation L-V en natation pourrait surestimer la force maximale théorique (cf. Figure 25). En effet, le modèle de représentation de la relation F-V associée au modèle résiduel semble davantage quadratique.

Cette méthode peut cependant présenter les mêmes limites que décrites précédemment lors de la présentation de la nage attachée puisqu'elle intègre cette méthode dans le modèle de propulsion résiduelle. La différence entre la force maximale mesurée grâce à la nage attachée et la force maximale estimée à partir de la relation linéaire en nage semi-attachée pourrait donc en partie être liée aux différences cinématiques qui existent entre les deux conditions et à des conditions d'écoulement différentes. Ces considérations illustrent la spécificité et la complexité des adaptations liées au milieu aquatique, ces dernières pouvant agir sur la relation F-V.

4.4. Applications pratiques du profilage force-vitesse en tant qu'outil d'évaluation et d'entraînement

Dans un processus d'optimisation de la performance, l'évaluation des sportifs permet notamment (1) l'identification des facteurs clés de la performance, (2) la détermination des déficits ou des qualités du sportif afin d'orienter l'entraînement de façon adéquate, (3) le jugement de l'efficacité d'un programme d'entraînement [Abernethy et al., 1995]. Les profilages F-V et L-V sont des méthodes d'évaluation qui permettent de remplir ces objectifs et ce, pour des disciplines différentes, notamment en natation.

En effet, concernant le premier objectif, les paramètres issus des profilages F-V réalisés sur des sauts verticaux ou sur des courses en sprint ont été montrés comme étant des paramètres discriminants du niveau de sportif dans différentes disciplines comme le football ou le rugby [Baena-Raya et al., 2021]. Les profilages F-V en sprint ont également permis d'identifier des qualités différentes entre des joueurs de rugby à XV et des joueurs de rugby à XIII, ces derniers présentant des niveaux de force maximale horizontale supérieurs aux joueurs de rugby à XV, pouvant être le reflet de facteurs de performance distincts entre les deux disciplines [Cross et al., 2015]. Il a également été rapporté que les athlètes de différentes disciplines présentaient un équilibre distinct entre la force maximale et la vitesse maximale [Giroux et al., 2016]. De plus, certains auteurs ont montré qu'un déséquilibre dans la relation F-V pouvait avoir un impact négatif sur la performance en sprint [Junge et al., 2020; Samozino et al., 2022]. En natation, il a été montré que les profils F-V réalisés sur deux types de sauts verticaux (squat jump et countermovement jump), et plus particulièrement la vitesse maximale de ces sauts, étaient associés à la performance du départ plongé [García-Ramos, Tomazin, et al., 2016]. D'autres auteurs [Chalkiadakis et al., 2023] ont également montré un lien entre les paramètres de force maximale et de vitesse maximale issus des profilages F-V réalisés sur les membres supérieurs avec la performance en sprint dans l'eau. Le profilage L-V en natation a permis d'identifier les paramètres de V_0 et L_0 comme

étant en lien avec la performance en sprint [Gonjo et al., 2020, 2021; Olstad et al., 2024] ainsi que la pente du profil comme étant un indicateur des forces de traînées actives du nageur [Gonjo et al., 2024]. Néanmoins ces travaux exploratoires n'ont à ce jour pas permis d'identifier des liens plus précis avec les facteurs clés de la performance en natation sprint.

Le profilage F-V confère la capacité à identifier des déficits de force ou de vitesse. Une illustration peut en être faite de manière significative au travers des évaluations lors des sauts verticaux. Il existe en effet pour ce mouvement et pour chaque individu un profil optimal. Ainsi, au-delà de l'implication de la puissance maximale des membres inférieurs, l'équilibre entre les qualités de force et de vitesse d'un athlète serait un facteur important concernant la hauteur de saut [Samozino et al., 2013]. Ce profil optimal dépend des caractéristiques individuelles du sportif et du mouvement spécifique pratiqué par cet individu [Samozino et al., 2012]. Par exemple, le profil optimal d'un joueur de basketball, qui réalise principalement des sauts verticaux, diffère de celui d'un nageur, dont les membres inférieurs contribuent principalement lors du départ plongé, avec un angle de poussée distinct de celui d'un saut vertical. L'absence de profils optimaux sur d'autres tâches motrices qui peuvent être évaluées par cette méthode ne déprécie pas pour autant l'intérêt du profilage F-V. En effet, l'objectif de cette évaluation est souvent de fournir des recommandations et des orientations de travail adaptées aux besoins spécifiques de l'athlète ou de son entraîneur [D. Bishop et al., 2006]. La comparaison des valeurs obtenues avec des valeurs de références ou des valeurs antérieures de l'athlète permettrait alors de définir des objectifs précis d'entraînement [McGuigan et al., 2013]. A cet égard, l'utilisation du profilage F-V comme méthode permettant l'adaptation d'un programme d'entraînement s'inscrit dans le développement du "velocity based training" (VBT). En effet, le profil permet, à partir des capacités chiffrées de l'athlète en termes de vitesse, de cibler précisément les zones de vitesse à l'entraînement (Figure 26)

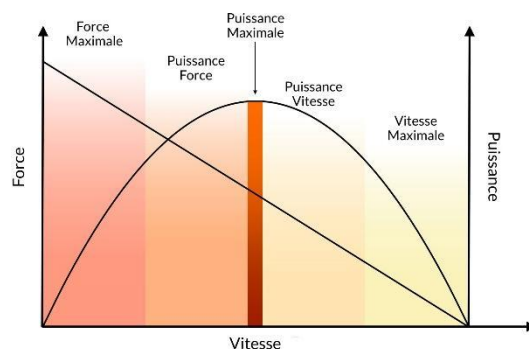


Figure 26 : Relations force-vitesse et puissance-vitesse ainsi que les zones associées aux différentes qualités mesurées [Hanon, 2019].

Ainsi le feedback chiffré de la vitesse à l'entraînement a pour objectif l'adaptation des charges pour l'entraînement contre résistance en préparation physique par exemple. Le VBT permettrait

d'obtenir des gains en préparation physique et des gains de performance spécifiques plus importants que la méthode de prescription de charge en pourcentage d'une charge maximale [Włodarczyk et al., 2021]. Ce principe peut également être appliqué à la nage contre résistance, entraînement communément prescrit en natation comme décrit précédemment. En effet, le choix des charges lors de leur application au nageur peut avoir un impact important sur la technique de nage et dès lors sur les adaptations biomécaniques induites par cet entraînement [Dominguez-Castells & Arellano, 2012].

Enfin, le profilage F-V répond également au troisième objectif de l'évaluation des sportifs cité précédemment qui concerne l'objectivation de l'efficacité des méthodes d'entraînement. En effet, le profil F-V peut être modifié après un programme d'entraînement de sprint contre résistance basé sur les zones de vitesse [Cahill et al., 2019; Lahti et al., 2020]. De même l'entraînement en force d'un groupe présentant un déficit de force, et l'entraînement de la vitesse d'un groupe présentant un déficit de vitesse a montré des effets bénéfiques sur les extrémités du profil F-V ciblées (c-à-d F_0 et V_0 respectivement) par l'entraînement des sauts verticaux [Jiménez-Reyes et al., 2017]. Ces résultats sont cohérents avec les résultats d'autres études qui ont montré que les gains de puissance et de force étaient spécifiques aux zones de vitesses entraînées [Behm & Sale, 1993]. En natation, le profilage L-V n'a, à notre connaissance, pas encore été utilisé dans cet objectif d'évaluer l'efficacité d'un programme d'entraînement à sec ou dans l'eau.

PROBLÉMATIQUES ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

La revue de littérature a permis de mettre en perspective certaines connaissances à la genèse de ce travail de thèse. En effet, il a été montré que la puissance mécanique, conditionnée par les qualités de force et de vitesse sous-jacentes, est une qualité primordiale dans la performance en sprint, y compris en natation. Par ailleurs, il a été établi que le développement de ces qualités requiert des contraintes spécifiques, souvent difficiles à reproduire dans un environnement aquatique. Dès lors, l'intégration d'un entraînement à sec s'impose comme un outil incontournable pour favoriser le développement de ces compétences. En outre, l'importance capitale de l'évaluation des différents déterminants de la performance, qu'ils soient mesurés à sec ou dans l'eau, a également été mise en évidence. Une telle évaluation peut être réalisée de manière simple et fiable grâce à la méthodologie du profilage Force-Vitesse (F-V) à sec et Charge-Vitesse (L-V) dans l'eau. Néanmoins, l'analyse approfondie de la littérature dans le cadre théorique de ce manuscrit fait émerger plusieurs problématiques, notamment :

- Un manque de recommandations concrètes sur les modalités de travail à sec à implémenter ainsi que sur les modalités de transfert à explorer entre la condition ex situ et la nage, malgré un nombre d'études conséquent concernant l'effet du travail en préparation physique à sec sur la performance et les paramètres de nage.
- L'écueil de l'interprétation des données issues de ces profils mis en lumière par l'émergence récente de l'utilisation du profilage L-V en natation. Les problématiques suivantes restent par exemple inexplorées : (1) Le lien entre les profils L-V avec la performance et les paramètres de nage, plus particulièrement sur des distances supérieures à 50 m. (2) Le lien entre les profils L-V avec les qualités de force, de vitesse et de puissance à sec. (3) l'impact d'un travail contre résistance à sec ou dans l'eau sur les paramètres issus du profilage L-V in situ.
- Un manque de connaissances concernant l'impact de l'entraînement à sec sur les paramètres hydrodynamiques, et notamment la trainée active. En effet, la littérature a montré les possibilités de modifications anthropométriques suite à un travail de renforcement musculaire à sec, pouvant impacter les paramètres hydrodynamiques du nageur.

Ce travail de thèse se propose de répondre à ces problématiques notamment à travers l'exploration des données issues des profils F-V à sec et L-V en natation chez des nageurs de haut niveau. Plusieurs contributions, principalement expérimentales, ont été apportées au cours de ce travail sous la forme de cinq études originales :

La première étude a consisté à recueillir les pratiques des préparateurs physiques et entraîneurs des nageurs de haut niveau français concernant le travail en matière de préparation physique et de transfert vers la nage. Ces pratiques ont ensuite été confrontées aux recommandations scientifiques actuelles, ce qui a permis d'orienter les protocoles des recherches expérimentales suivantes. La seconde étude a investigué les liens entre les paramètres issus d'une session d'évaluation en natation et la performance en compétition chez des nageurs de haut niveau spécialistes des distances de sprint. La

troisième étude s'est attachée à établir des liens entre les paramètres mesurés lors d'une session d'évaluation en préparation physique à sec et ceux relevés lors d'une autre session d'évaluation en natation, chez des nageurs de haut niveau également. La quatrième étude a exploré les effets d'un programme axé sur le développement de la force maximale à sec sur les paramètres F-V à sec ainsi que sur les paramètres L-V et hydrodynamiques in situ. Enfin, la cinquième et dernière étude consistait à restituer les connaissances acquises sur les différents paramètres mesurés précédemment en vue de leur suivi tout au long d'une saison. Cette démarche avait pour objectif de fournir aux entraîneurs un outil supplémentaire d'aide à la décision. Cette étude a été menée auprès d'un groupe de nageurs dont certains ambitionnaient de participer aux Jeux Olympiques de Paris 2024.

Comme évoqué dans l'introduction générale, ces études sont placées sur un continuum entre la science et le terrain, ces deux domaines se nourrissant réciproquement au travers des conclusions de chacune des études. La Figure 27 illustre cette démarche et la construction macroscopique de cette thèse. Une particularité notable de ce travail de thèse réside dans l'application pratique des méthodes grâce à la collaboration étroite avec la FFN et la participation du laboratoire M2S au projet Neptune (« Natation Et Paranatation, Tous Unis pour Nos Élites »), en vue de la préparation aux Jeux Olympiques et Paralympiques (JOP) 2024.

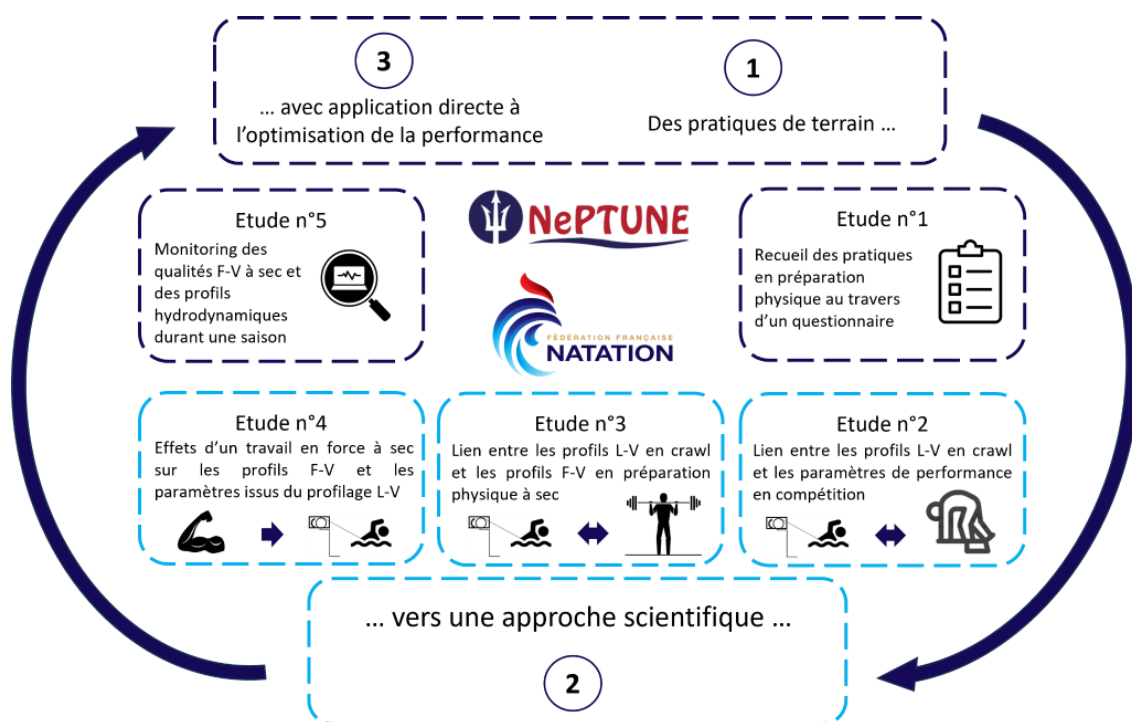


Figure 27 : Vue d'ensemble de l'organisation des études réalisées dans le cadre de cette thèse

TRAVAUX DE RECHERCHE

Etude n°1

De l'entraînement en préparation physique à la performance en natation : Pratiques d'entraînement et d'évaluation des nageurs de haut niveau en France

Cette étude publiée fait référence à l'article suivant :

Raineteau, Y., Pla, R., Bideau, B., Bideau, N., & Nicolas, G. (2024). From dry-land to the water: Training and testing practices of strength and conditioning coaches in high level French sprint swimmers. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1338856.

Résumé

Objectifs : Le but de cette étude était d'explorer les pratiques d'entraînement et d'évaluation mises en place par les préparateurs physiques en natation. Le transfert des qualités développées en préparation physique vers la nage a également été investigué.

Méthodes : 24 préparateurs physiques intervenant auprès de différents groupes d'entraînement en France composés essentiellement de nageurs de haut niveau ont répondu à un questionnaire via une plateforme en ligne. Des analyses de fréquence ont été effectuées pour les réponses quantitatives et qualitatives.

Résultats : Le gainage, la force et la puissance étaient les trois qualités physiques les plus ciblées par les préparateurs physiques. Le renforcement du tronc sous toutes ses formes, le développé couché et le squat étaient les trois exercices les plus prescrits. 79% des préparateurs physiques ont déclaré avoir adapté les exercices en fonction de différents paramètres. La plupart des préparateurs physiques ont indiqué que les séances de préparation physique à sec étaient placées de préférence avant les séances dans l'eau. Des exercices variés ont été utilisés dans l'eau pour rendre le transfert plus efficace. La charge d'entraînement était contrôlée par 87% des participants et les paramètres de force et de vitesse sur certains exercices de préparation physique étaient évalués par 38% des participants au questionnaire.

Conclusion : Les pratiques d'entraînement à sec des préparateurs physiques étaient pour la plupart conformes aux recommandations scientifiques. Au vu des résultats du questionnaire, il semblerait que les protocoles d'évaluation et le suivi des indicateurs de performance soient un élément clé du transfert des qualités acquises en préparation physique vers la nage.

Introduction

La littérature exposée dans le cadre théorique a permis de mettre en lumière l'intérêt de la préparation physique à sec au regard de l'amélioration des performances en natation, essentiellement sur les distances de sprint. Certaines études sur le sujet suggèrent également un manque de recommandations claires pour l'optimisation de l'entraînement à sec dans l'objectif d'améliorer les performances [Fone & van den Tillaar, 2022]. Dès lors, il apparaît primordial que la science se nourrisse du terrain afin de confronter les pratiques avec les recommandations fournies, ainsi que pour envisager d'adapter les protocoles de mesures aux contraintes du terrain. Plusieurs études ont rapporté des modalités de pratique en préparation physique dans le cas de sports différents de la natation tels que le soccer [Weldon et al., 2021], le football américain [Ebben & Blackard, 2001] ou le basket-ball [Simenz et al., 2005] afin de remplir cet objectif. Ces études étaient généralement réalisées au travers d'enquêtes, utilisant des questionnaires comme outils de recherche. Ces derniers constituent en effet un moyen efficace de recueillir des informations sur les pratiques réelles observées sur le terrain. Dans ces disciplines, des questionnaires génériques ont été employés, ces sports partageant des exigences physiques similaires.

En revanche, l'utilisation d'un questionnaire générique pour la natation n'est pas envisageable en raison des spécificités propres à l'environnement aquatique évoquées précédemment (cf. section 1 du cadre théorique). En effet, des questionnaires spécifiques ont déjà été utilisés en natation pour identifier les pratiques de terrain concernant divers sujets tels que les échauffements [McGowan et al., 2014], le suivi de la charge d'entraînement [Barry et al., 2022b], la surveillance des blessures [Barry et al., 2022a], l'analyse de la performance [Mooney et al., 2016] ou encore des aspects techniques tels que le travail des phases sous-marines [Margaret Thompson et al., 2022]. En ce qui concerne la préparation physique, certaines études se sont intéressées aux pratiques adoptées par les nageurs de compétition [Crowley et al., 2018; Krabak et al., 2013; Pollock et al., 2019; Tate et al., 2015]. Plus précisément, certaines études [Pollock et al., 2019; Tate et al., 2015] ont évalué de manière concomitante les pratiques en préparation physique et en natation, mais sans établir de lien entre les deux conditions d'entraînement. Plus récemment, certains auteurs [Crowley et al., 2018] ont également étudié les pratiques de préparation physique chez des nageurs de différents niveaux (du niveau régional au niveau élite) et de différents pays. Cette étude a ainsi mis en évidence des points clés parmi les pratiques d'entraînement tels que l'utilisation prédominante de l'entraînement de la force et les différentes modalités d'entraînement en résistance (échauffement, circuits, entraînement traditionnel, pliométrie). Ces auteurs ont également identifié les exercices de préparation physique à sec les plus répandus (i.e., tractions et squats). Cependant, comme le soulignent les auteurs, les pratiques des préparateurs physiques qui visent à optimiser la spécificité et le transfert des exercices de résistance hors de l'eau vers la performance en natation restent encore insuffisamment explorées et mériteraient d'être davantage étudiées.

L'évaluation du transfert de la préparation physique vers l'environnement aquatique pourrait donc être améliorée en identifiant d'autres indicateurs objectifs via l'investigation des pratiques d'entraînement et des protocoles de mesure mis en place dans les deux environnements. La présente étude repose sur la création d'un questionnaire spécifique qui permet d'aborder ces questions incluant : 1. Les pratiques des préparateurs physiques qui lient l'entraînement à sec à l'entraînement en natation, 2. Les pratiques d'évaluation et de suivi permettant de quantifier l'évolution des nageurs dans les deux conditions (i.e., à sec et dans l'eau). Plus spécifiquement, des sujets tels que la spécificité des mouvements, les modalités d'entraînement de la force et la dissociation segmentaire pouvant chacun affecter le transfert de la préparation physique vers la nage [Strzała et al., 2019] ont été investigués. Ce type d'approche offre non seulement l'opportunité de confronter les pratiques de terrain aux recommandations scientifiques mais se révèle également utile pour ajuster et adapter les protocoles de recherche scientifique. Elle permet ainsi de tenir compte des contraintes spécifiques du terrain, qu'elles soient liées au public ciblé ou à l'environnement étudié, telles qu'elles émergent des résultats du questionnaire.

Méthodes

Protocole expérimental

La conception de ce questionnaire se base sur certaines études mentionnées ci-dessus [Barry et al., 2022a, 2022a; Crowley et al., 2018; Margaret Thompson et al., 2022]. Le questionnaire comprend des questions spécifiques consacrées à l'entraînement à sec mais aussi à l'entraînement dans l'eau, ainsi que des items consacrés aux outils et méthodologies utilisés pour évaluer le transfert des qualités développées à sec vers la nage. Le questionnaire a été édité sur LimeSurvey, un logiciel libre d'enquête et système de gestion de contenu web respectant les normes de confidentialité du Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD). Le questionnaire est composé de 54 questions, divisées en cinq catégories associées à la fois aux protocoles de tests et à l'entraînement. Ces cinq catégories étaient les suivantes : 1. Informations personnelles concernant les préparateurs physiques, y compris leur parcours professionnel et leurs formations académiques ; 2. Description des pratiques d'entraînements à sec ; 3. Réflexion et auto-analyse autour de l'élaboration de l'entraînement ; 4. Construction du processus de transfert entre la préparation physique et la nage ; 5. Protocoles d'évaluation dans les deux environnements, à sec et dans l'eau. Cette étude est conforme à la Checklist for Reporting of Internet Surveys (CHERRIES) [Eysenbach, 2004] reportant les conduites éthiques à tenir lors de l'élaboration d'un questionnaire et de l'étude associée. L'étude a été approuvée par le comité d'éthique de l'Université Rennes 2 (code d'approbation : 2023-004). Une copie du questionnaire (Annexe B) est jointe en annexe.

Participants

Les critères d'inclusion étaient les suivants : les préparateurs physiques devaient entraîner dans des centres d'entraînement certifiés par la Fédération Française de Natation tels que les Centres Nationaux d'Entraînement, les Clubs d'Excellence ou les Centres d'Accession et de Formation, tandis qu'au moins un des nageurs supervisés par le préparateur physique devait avoir un niveau de performance nationale au minimum. Sur les trente-trois préparateurs physiques répondant aux critères d'inclusion et qui ont donc été contactés, vingt-sept (81,8 %, n= 24 hommes, n= 3 femmes) ont répondu au questionnaire. Trois des vingt-sept participants n'ont pas répondu à l'ensemble des questions et ont donc été exclus de la présente analyse. Neuf d'entre eux étaient responsables à la fois de l'entraînement dans l'eau et à sec. L'expérience moyenne dans le métier de préparateur physique était de $7,1 \pm 5,5$ ans. Chaque participant a dû compléter un formulaire de consentement en ligne pour participer à la recherche.

Protocole expérimental

Le questionnaire a été transmis via une liste de diffusion privée. Les adresses électroniques ont été collectées par la Fédération Française de Natation. Dans le premier courriel de transmission, l'objectif et les intérêts de la recherche ont été présentés. Certaines informations démographiques ont été demandées, telles que le nom et le prénom du répondant ainsi que le nom du club dans lequel il exerçait. Les données collectées ont ensuite été pseudonymisées et stockées dans un espace numérique protégé. L'adresse IP a été utilisée pour éviter la duplication des réponses.

Analyses statistiques

Une première analyse a été réalisée à partir des réponses aux questions quantitatives, puis une analyse complémentaire a été réalisée à partir des questions qualitatives ouvertes et fermées. Tous les traitements ont été effectués à l'aide de Microsoft Excel (Microsoft Corporation, Redmond, USA). Une analyse de fréquence, étudiant la répartition des occurrences, a été effectuée sur 26 questions quantitatives et qualitatives. En ce qui concerne la partie consacrée à l'auto-analyse de leur intervention en préparation physique, les entraîneurs ont été invités à attribuer des notes de 1 à 4 aux arguments qu'ils estimaient correspondre le mieux à leur point de vue [Barry et al., 2022b]. Des chiffres ont été associés à l'ordre (1 pour le plus proche et 4 pour le plus éloigné de leur point de vue) et la valeur moyenne de chaque argument a été calculée, ce qui a permis de mettre en évidence certains arguments.

Résultats

Informations personnelles concernant les préparateurs physiques ayant répondu au questionnaire

88% des participants étaient issus d'une formation universitaire (diplôme universitaire en préparation physique ou en sciences du sport). 43% d'entre eux avaient également un diplôme professionnel ou un diplôme d'État en entraînement sportif. 46% (n=11) d'entre eux avaient un diplôme spécifique en préparation physique tandis que d'autres étaient issus de l'entraînement en natation. La plupart des préparateurs physiques (88%, n=21) entraînaient des groupes comprenant des sprinteurs. Parmi les 15 participants dont la seule fonction était celle de préparateur physique, 93% (n=14) exerçaient également dans d'autres activités que la natation. Cette proportion était beaucoup plus faible pour les 9 participants qui étaient également responsables de l'entraînement dans l'eau (33%, n=3). Les autres activités dans lesquelles les participants exerçaient le plus étaient : le handball (n=5), le tennis (n=4), le rugby (n=4) et le football (n=3).

Pratiques d'entraînement en préparation physique

83% des entraîneurs incluaient trois séances ou plus de préparation physique par semaine dans la préparation des nageurs. Les séances de préparation physique représentaient au moins trois heures d'entraînement pour 92% des répondants au questionnaire.

La Figure 28 montre que le gainage, la force et la puissance sont les qualités physiques les plus ciblées par les préparateurs physiques. Néanmoins, tous ont précisé que toutes les qualités physiques étaient développées au cours des différentes périodes d'entraînement de la saison.

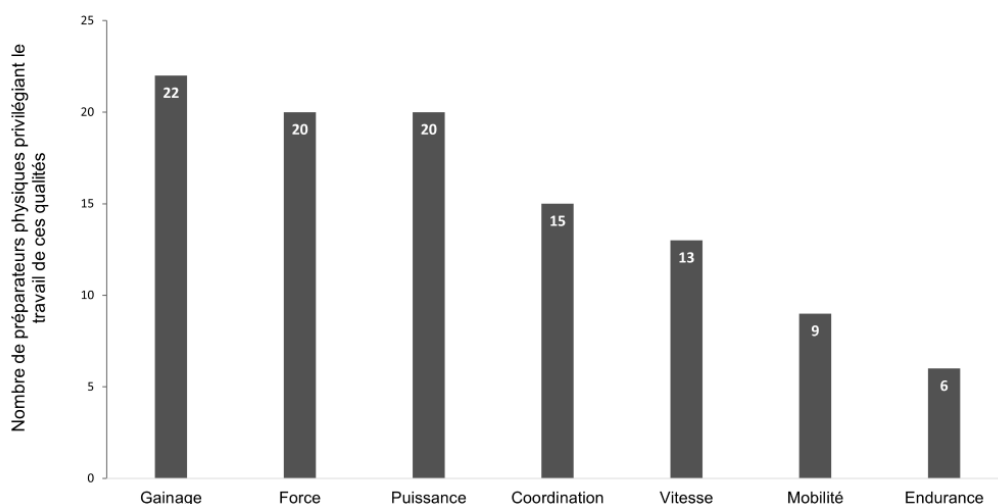


Figure 28 : Principales qualités physiques les plus ciblées par les préparateurs physiques interrogés.

D'autres résultats ont montré qu'autant de préparateurs physiques différenciaient (n=12) ou ne différenciaient pas (n=12) les qualités physiques entre le travail des membres inférieurs et le travail des membres supérieurs. Pour les préparateurs physiques qui ont différencié ces qualités, le travail de force et d'explosivité était privilégié sur les membres inférieurs alors que le travail en endurance de force et en hypertrophie était évité car selon les répondants, "l'endurance de force et l'hypertrophie ne sont pas nécessaires pour les membres inférieurs puisque leur utilisation en natation est principalement associée aux phases de départ et de virages, phases qui nécessitent plutôt des qualités pliométriques" et "les membres inférieurs peuvent supporter des charges beaucoup plus lourdes que les membres supérieurs sans risque de blessure". 58% des préparateurs physiques ont déclaré que leur travail était davantage axé sur les membres supérieurs que sur les membres inférieurs, tandis qu'un seul préparateur physique travaillait principalement sur les membres inférieurs. Les autres participants au questionnaire ont indiqué travailler autant les membres supérieurs que les membres inférieurs.

Les différentes qualités physiques étaient périodisées différemment en fonction des personnes interrogées, soit à l'échelle de la saison entière soit à l'échelle d'un macrocycle. A l'échelle de la saison, l'hypertrophie (n=10) et l'endurance de force (n=7) semblent être les deux modalités d'entraînement les plus développées en début de saison. Les qualités de force maximale (n=4), de puissance maximale (n=4) et de vitesse maximale (n=4) étaient développées de façon continue au cours de la saison. A l'échelle d'un macrocycle, la planification du développement des différentes qualités physiques semblait partir de la force maximale pour évoluer vers la vitesse maximale à l'approche de la compétition cible. En effet, 11 entraîneurs en préparation physique ont indiqué que les séances d'entraînement en force maximale se trouvaient principalement pendant les phases de développement. Il était également indiqué que le travail de la puissance maximale intervenait après celui de la force maximale (n=9) ou juste avant la compétition cible (n=6), et enfin que les séances d'entraînement de vitesse maximale étaient situées juste avant la compétition cible (n=12). Il est en revanche important de noter que pour les nageurs de demi-fond, les préparateurs physiques concernés ont indiqué que c'était le développement de l'endurance de force qui primait à l'approche de la compétition cible.

En ce qui concerne la méthodologie appliquée au développement de la force maximale, les principaux modes de contraction utilisés étaient le mode concentrique (n=22 ; 92%), puis le mode excentrique (n=16 ; 67%), le mode stato-dynamique (n=16 ; 67%) et enfin le mode isométrique (n=11 ; 46%). Le nombre moyen de séries par exercice était compris entre 3 et 4 (min : 1 ; max : 6), le nombre moyen de répétitions par série entre 3 et 4 (min : 1 ; max : 6), la charge moyenne représentait 88,8% de 1RM (min : 80% ; max : 110%) ou RPE 7 et le temps moyen de récupération entre les séries était 3 minutes 06 secondes (min : 45 secondes ; max : cinq minutes).

En ce qui concerne la méthodologie appliquée au développement de la puissance maximale, les principaux modes de contraction utilisés étaient le mode concentrique (n=22 ; 92%), puis le mode

excentrique (n=17 ; 71%). Le nombre moyen de séries par exercice se situait entre 3 et 4 (min : 3 ; max : 8), le nombre moyen de répétitions par série entre 6 et 7 (min : 2 ; max : 15), la charge moyenne représentait 58.8% de 1RM (min : 30% ; max : 85%) et le temps moyen de récupération entre les séries était de 2 minutes et 42 secondes (min : 30 secondes ; max : 5 minutes).

La Figure 29 illustre les exercices de force les plus utilisés par les préparateurs physiques sur les nageurs au cours de la saison. Cependant, les réponses représentées sur la Figure 29 étaient parfois contrebalancées par le fait que pour 79% des préparateurs physiques ayant répondu au questionnaire, un exercice de musculation donné (gainage, développé couché, etc.) pouvait subir des adaptations potentielles en fonction de différents paramètres tels que :

- La masse musculaire impliquée lors des différentes nages (n=9). Par exemple, certains préparateurs physiques utilisaient le soulevé de terre sumo ou le squat profond pour les nageurs de brasse (n=5), le tirage vertical debout pour les nageurs de papillon (n=1), ou encore le travail dissocié (ex. développé épaule alterné aux haltères) pour les nageurs spécialistes des nages alternées comme le crawl ou le dos (n=1),
- La période de la saison (n=2),
- L'historique de blessures (réathlétisation et prévention, n=1),
- Les déficits, qu'ils soient d'ordre physiologique ou biomécanique, susceptibles d'être observés dans la nage (n=1).

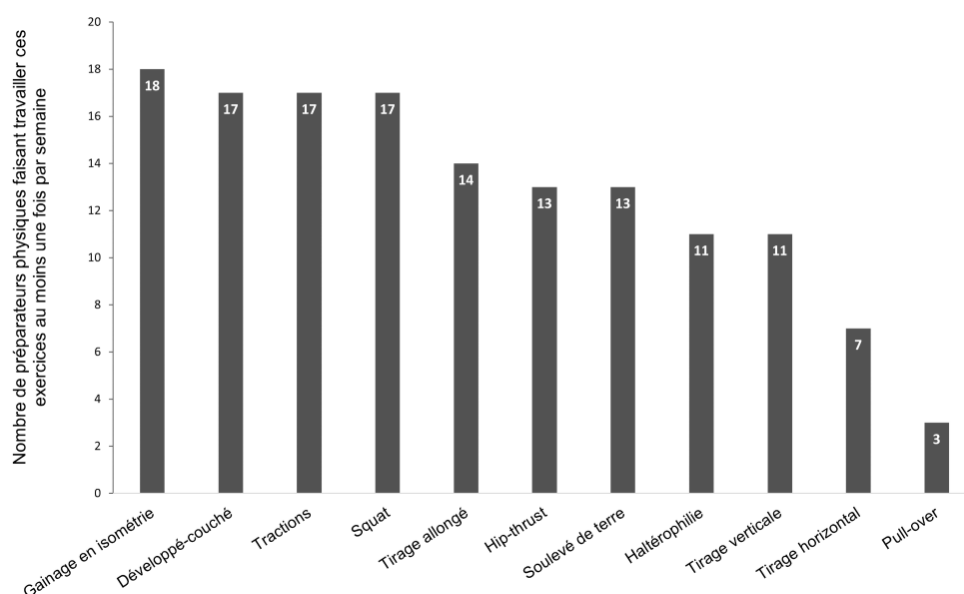


Figure 29 : Principaux exercices prescrits par les préparateurs physiques interrogés.

En plus des exercices de force, des entraînements qui visaient des adaptations cardio-vasculaires et le développement de la mobilité (c'est-à-dire l'augmentation des amplitudes articulaires) ont été introduits (Figures 30 et 31). L'entraînement « cardiovasculaire » complémentaire a été réalisé principalement sous la forme de circuit training afin de diversifier les activités en début ou en cours de saison (n=5), dans le but « d'améliorer les capacités de récupération » (n=4) ou « d'améliorer la coordination » (n=3).

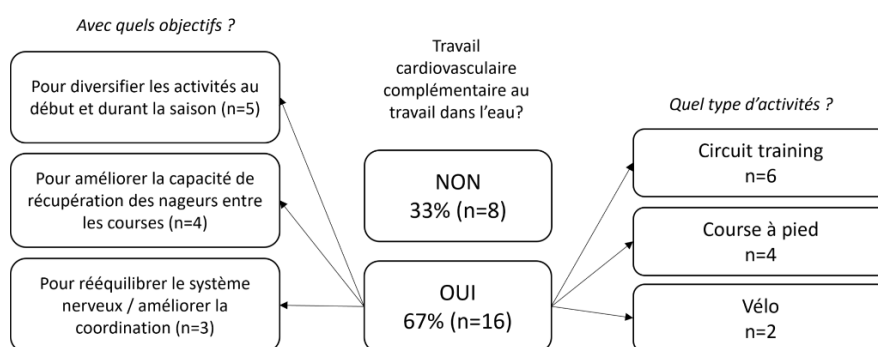


Figure 30 : Utilisation, pratiques et justifications de l'entraînement cardiovasculaire complémentaire telles que reportées par les préparateurs physiques.

La Figure 31 illustre les pratiques et les justifications de l'entraînement complémentaire de la mobilité telles que rapportées par 92% des préparateurs physiques.

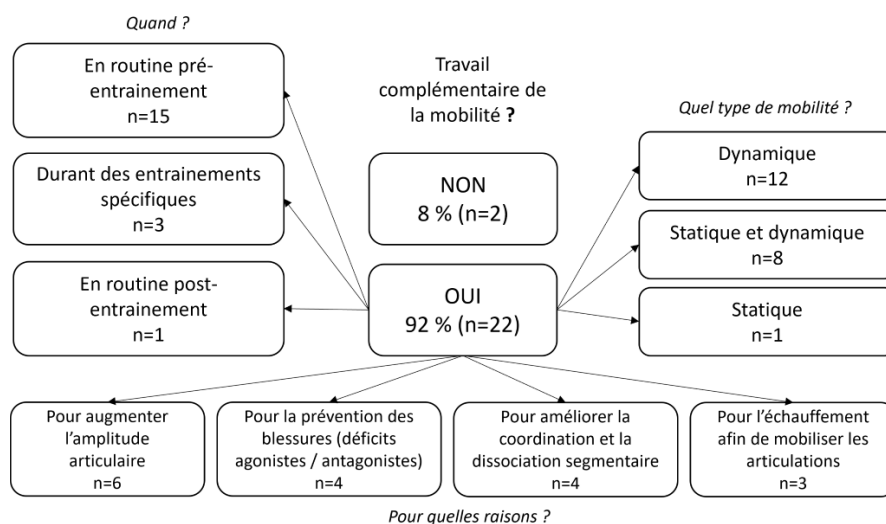


Figure 31 : Utilisation, pratiques et justifications de l'entraînement complémentaire de la mobilité telles que reportées par les préparateurs physiques.

Réflexion et auto-analyse autour de l'élaboration de l'entraînement

La troisième partie du questionnaire a fourni des informations sur la façon dont les préparateurs physiques construisaient leurs séances. La Figure 32 illustre les avis des préparateurs physiques sur différents sujets. L'expérience, suivie de la littérature ressortent ainsi comme les outils sur lesquels les participants s'appuyaient le plus afin de structurer leurs interventions. La prophylaxie suivie de l'amélioration des performances étaient les principaux objectifs des préparateurs physiques et entraîneurs justifiant de l'implémentation d'entraînement en préparation physique. Le choix des exercices prescrits était principalement basé sur les muscles mobilisés lors de ces exercices ainsi que sur les discussions des participants avec leurs pairs. Nous n'avons pas constaté de différences significatives dans l'ordre des arguments avancés pour chacune des trois questions en fonction du rôle de l'intervenant (préparateur physique uniquement ou préparateur physique et entraîneur de natation).

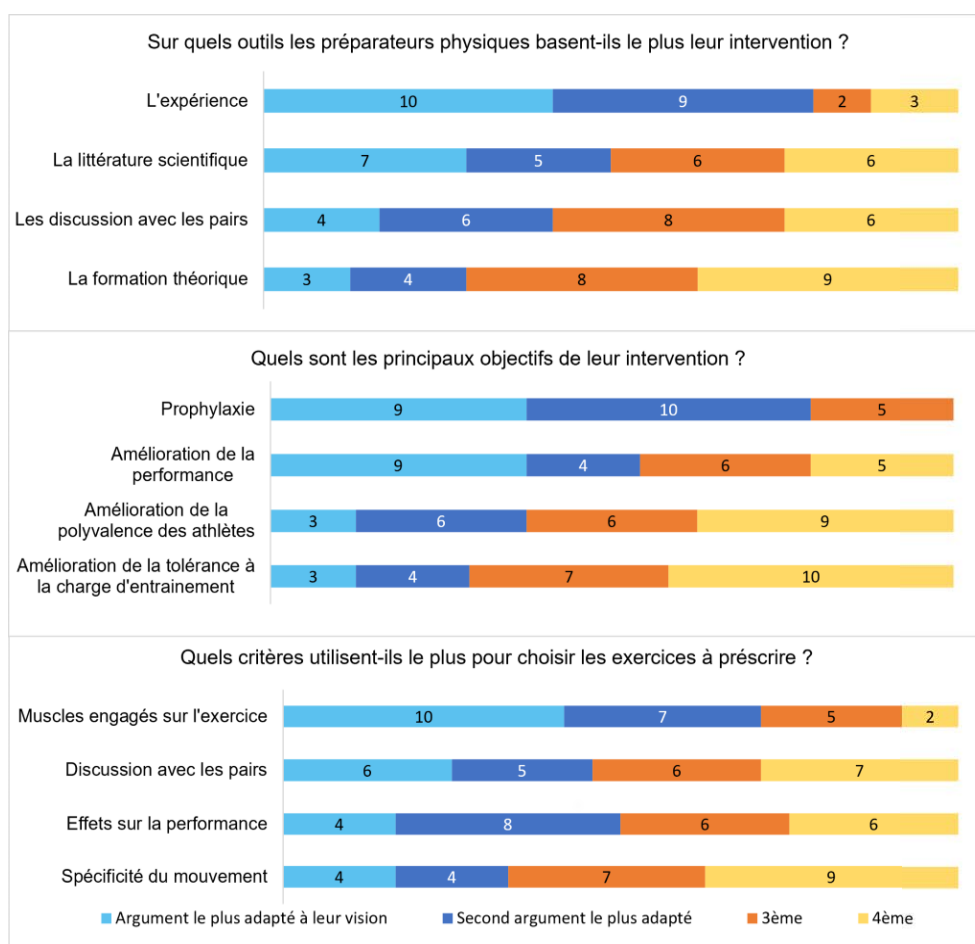


Figure 32 : Perceptions des préparateurs physiques à propos des entraînements prescrits. Chaque participant a été invité à classer de 1 à 4 les raisons qui justifient son intervention sur le terrain.

Pratiques de transfert de la préparation physique vers la nage

La communication entre les membres du staff a été citée comme le facteur le plus déterminant dans l'optimisation du transfert de la préparation physique à la nage (n=14). Les répondants au questionnaire ont déclaré que tous les intervenants auprès du groupe devaient d'abord s'entendre sur les tâches à mettre en place en priorité dans les deux conditions, à sec et dans l'eau. La cohérence et la concordance de la planification entre l'entraînement en préparation physique et dans l'eau est le deuxième facteur d'optimisation le plus mentionné par les participants (n=10). Enfin, l'enchaînement des entraînements à l'échelle d'une journée (entraînement à sec précédant ou non l'entraînement dans l'eau) a également semblé être un facteur important d'optimisation du transfert pour les préparateurs physiques (n=8). En ce qui concerne ce dernier aspect, les entraîneurs ont rapporté que les nageurs avaient une séance de préparation physique et une séance de natation le même jour entre 3 et 4 fois par semaine en moyenne (moyenne : 3,2 ; min : 1 ; max : 5). Ces deux séances étaient consécutives entre 2 et 3 fois par semaine en moyenne (moyenne : 2,6 ; min : 1 ; max : 5). Concernant les séances consécutives, les entraîneurs ont indiqué que les séances de préparation physique étaient principalement placées avant la natation (50% ; n=12). D'autres participants ont rapporté que les deux ordres étaient représentés de manière équilibrée dans la planification de leurs entraînements (33% ; n=8). En revanche, il était moins fréquent que la séance de natation précède la séance à sec (17% ; n=4). Ces ordres sont principalement liés à des contraintes temporelles (54% ; n=13) mais sont parfois un choix délibéré de l'entraîneur (42% ; n=13). Lorsque la séance de préparation physique précédait la séance de natation (67% ; n=8), cette séquence était davantage volontaire de la part du préparateur physique que lorsque les deux ordres étaient représentés de manière identique ou que la séance de natation précédait la séance de préparation physique (n=1 et n=1 respectivement).

La Figure 33 représente les différentes modalités d'entraînements qui ont été rapportées par les préparateurs physiques comme pouvant améliorer le transfert de la préparation physique vers la nage. Les personnes interrogées ont suggéré que le travail en survitesse dans l'eau était régulièrement placé après un travail de nage contre résistance pour un contraste de charge. Les séances d'entraînement mixtes (c'est-à-dire les séances d'entraînement mixant préparation physique à sec et natation) étaient composées d'exercices "techniques" (par exemple, pour essayer d'améliorer la distance par cycle ; n=2), d'exercices de "vitesse" dans l'eau (n=3) ou d'explosivité dans les phases de départ et de virage (n=1). La partie à sec de ces entraînements intégrés était principalement axée sur le contraste de charge pour le développement de la force maximale et de la vitesse maximale (n=3), ou sur la force maximale (n=1).

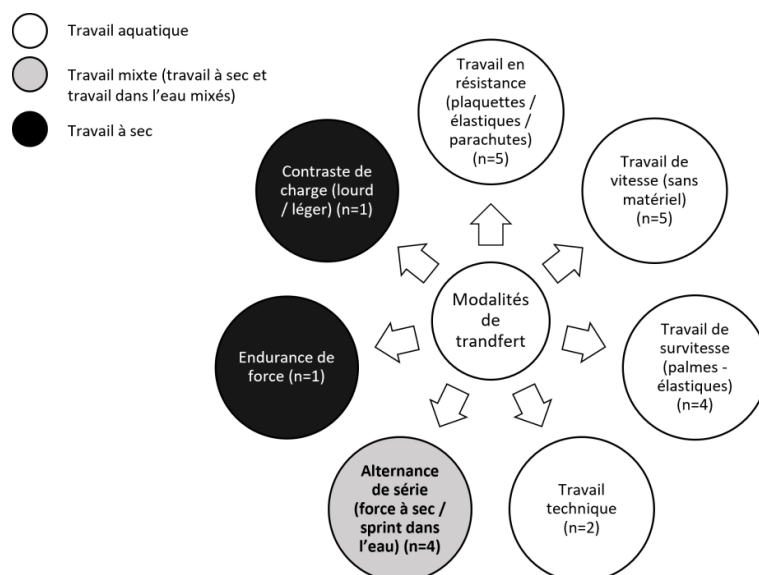


Figure 33 : Modalités appliquées au transfert de l'entraînement à sec vers la nage.

79% des personnes interrogées (n=19) ont déclaré qu'une observation parallèle de la progression à sec et dans l'eau était réalisée. Les indicateurs utilisés pour évaluer cette progression étaient principalement la performance chronométrique (n=10) et les paramètres spatio-temporels de la nage : distance par cycle, nombre et fréquence de nage (n=4). L'intégrité physique (absence de blessure) et la capacité des nageurs à terminer toutes les séances ont également été soulignées comme des indicateurs reliant la préparation physique à la nage (n=4). Les tests et la progression des charges à sec (évaluées en kg) ont également été cités (n=5).

Protocoles d'évaluation

La Figure 34 illustre les paramètres d'entraînement ou de récupération qui étaient contrôlés dans chaque groupe d'entraînement. Les répondants ont déclaré que les progrès en préparation physique à sec étaient évalués. Cette évaluation était réalisée de plusieurs façons : par la progression de la charge (n=21), l'évolution du nombre de répétitions ou l'évolution des paramètres de force/vitesse/puissance mesurée à l'aide d'outils de mesure spécifiques (n=11). Les appareils de mesure utilisés à ces fins les plus fréquemment mentionnés sont les ergomètres tels que le SkiErg (Concept 2, Morrisville, VT, USA) (n= 5) ou le Wattbike (Wattbike LTD, Nottingham, UK) (n=3). 38% (n=9) des participants ont utilisé des évaluations chiffrées de la force et de la vitesse sur des exercices de préparation physique réalisés en salle avec une barre. Différentes solutions techniques disponibles sur le marché et mesurant la vitesse de la barre ont été rapportées : Gymaware (Kinematic Performance Technology, Canberra, Australie) (n=4), applications mobiles telles que MyJump ou MyLift (n=3), ou encore Beast (Beast Technologies, Brescia, Italie) (n=2), VitruveFit (SPEED4LIFTS S.L., Mostoles, Madrid) (n=1) et Myotest (Myotest

SA, Sion, Suisse) (n=1). Le suivi de la RPE a également été cité comme un moyen subjectif mais complémentaire d'évaluer les progrès en préparation physique.

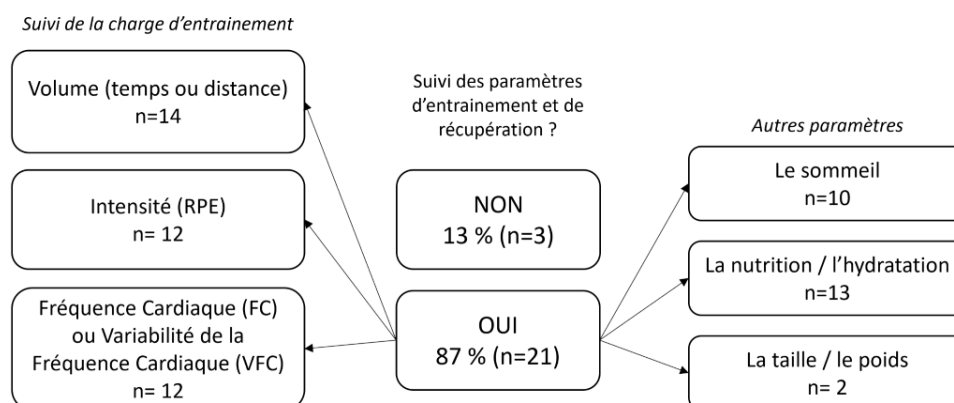


Figure 34 : Résumé des principaux paramètres suivis et contrôlés durant les périodes d'entraînement tels que reportés par les préparateurs physiques interrogés.

Les protocoles d'évaluation étaient effectués périodiquement, en moyenne $4,75 \pm 2,74$ fois par an. Les répondants ont également indiqué qu'ils effectuaient ces protocoles de test à des périodes clés, souvent pendant les stages d'entraînement d'équipe nationale, ou au début et à la fin de chaque cycle de travail en préparation physique (n=2).

Discussion

L'objectif de cette étude, réalisée à partir d'un questionnaire, était d'explorer les pratiques d'entraînement et les protocoles d'évaluation en préparation physique dans la natation de haut niveau en France, en abordant plus particulièrement les relations entre le travail à sec et le travail dans l'eau. L'originalité de ce travail réside dans son approche globale et systémique qui avait pour but de comprendre les liens qui peuvent exister entre l'entraînement à sec et la performance dans l'eau. L'originalité de l'étude était également représentée par l'intérêt porté aux représentations personnelles des entraîneurs à propos des entraînements prescrits. 24 préparateurs physiques ont répondu au questionnaire et 90% d'entre eux avaient un parcours académique avec pour près de la moitié d'entre eux un diplôme professionnel ou un brevet d'état d'entraîneur sportif qui atteste d'un niveau de connaissance dans le domaine de la préparation physique.

En ce qui concerne les objectifs de leur intervention, la "prophylaxie" est l'argument le plus avancé, suivi de "l'amélioration des performances en natation", puis de "la polyvalence des nageurs" et enfin de "l'amélioration de la tolérance à la charge d'entraînement dans l'eau". Il peut être surprenant de constater que la prophylaxie est le premier objectif avancé avant même l'amélioration des performances. Cela

peut s'expliquer par le fait que les populations encadrées par les préparateurs physiques interrogés incluaient des nageurs dont la maturation physique n'était pas achevée, ce qui peut justifier l'utilisation particulière de la préparation physique comme outil prophylactique.

Pratiques d'entraînement en préparation physique

En ce qui concerne l'entraînement à sec, il est intéressant de noter que les exercices les plus prescrits ne sont pas nécessairement les plus spécifiques en termes d'orientations de la force par rapport à celles que l'on retrouve dans la nage [Crowley, 2020]. Par exemple, la poussée effectuée lors d'un exercice de développé couché semble éloignée du mouvement de tirage réalisé dans l'eau, tout comme la poussée verticale observée lors d'un squat paraît peu comparable à la poussée quasi-horizontale effectuée lors d'un départ plongé. Cette observation est cohérente avec les réponses à un autre élément du questionnaire selon lesquelles les entraîneurs s'appuient en dernier recours sur la spécificité de l'exercice par rapport à la nage pour choisir l'exercice qu'ils vont prescrire. Certaines recherches récentes [Crowley, 2020] contredisent ce point de vue, affirmant que l'orientation des forces lors des exercices de préparation physique est un paramètre important pour l'amélioration des performances en natation. Néanmoins, d'autres études [A. Vorontsov, 2010; Wirth et al., 2022] ont nuancé cette idée, suggérant que les exercices traditionnels d'entraînement de la force (squat, développé couché, tirage vertical) resteraient le meilleur moyen de développer la force hors de l'eau au vu des masses musculaires similairement mobilisées sur ces exercices et lors de la nage. Ces auteurs suggèrent en effet que les entraînements à sec ne correspondent jamais entièrement au mouvement tel qu'on le retrouve dans la nage et que les préparateurs physiques devraient donc éviter de tomber dans le piège de la quasi-spécificité.

Cependant, une grande majorité des préparateurs physiques interrogés (79%) ont indiqué que certains des exercices étaient ajustés en fonction de divers paramètres. Le principal élément pris en compte dans l'ajustement des exercices concernait les masses musculaires impliquées dans les différentes nages (n=9) et d'autres paramètres ont été rapportés dans une moindre mesure : la période d'entraînement de la saison (n=2), les antécédents de blessures (n=1) ou déficits physiologiques ou biomécaniques dans la nage (n=1). Les préparateurs physiques ont justifié leur choix en affirmant qu'ils cherchaient à solliciter prioritairement les muscles les plus sollicités lors de la nage, en accord avec les recommandations formulées par de nombreuses études précédentes. En effet, il a été établi que chaque style de nage présente des particularités distinctes tant sur le plan cinématique [Bartolomeu et al., 2018] que neuromusculaire [Martens et al., 2015]. La brasse, par exemple, se distingue par des caractéristiques électromyographiques spécifiques par rapport aux autres styles de nage, notamment en termes de recrutement et de coordination musculaire [Nicol et al., 2022], avec une activation prononcée des muscles des membres inférieurs [C. Bishop et al., 2013]. Cette particularité conduit certains entraîneurs

à intégrer des variations telles que le squat sumo afin de solliciter plus intensément les muscles fessiers et les adducteurs, qui jouent un rôle essentiel dans ce type de nage [Rodeo, 1984].

De manière plus générale, les résultats ont révélé que le travail des membres supérieurs était nettement plus important que celui des membres inférieurs pour la majorité des répondants (58%). Ce constat est en accord avec l'idée largement acceptée selon laquelle la majeure partie de la propulsion en natation est générée par les membres supérieurs. En crawl, il a en effet été démontré que 85 à 90 % de la propulsion provient des mouvements des membres supérieurs [Deschodt et al., 1999; Hollander, 1988]. Néanmoins, l'importance des membres inférieurs en natation ne doit pas être sous-estimée, étant donné leur influence sur la performance, tant durant les phases de nage que lors des départs, des virages et des ondulations, qui sont désormais des éléments cruciaux et déterminants dans la performance de haut niveau [Veiga et al., 2016; West et al., 2011]. Il n'est donc guère surprenant que 50 % des préparateurs physiques interrogés expriment une volonté de renforcer spécifiquement les muscles des membres inférieurs à travers des exercices à composante pliométrique. Dans cette même logique, la sollicitation des muscles du tronc, inhérente aux quatre styles de nage [Martens et al., 2015], justifie que le gainage soit fréquemment mentionné dans les réponses au questionnaire, à la fois comme un exercice incontournable et une qualité physique essentielle à développer. La stabilité du tronc serait en effet une qualité importante pour la prévention des blessures car elle aurait un impact sur le contrôle scapulaire et, par conséquent, sur la réduction des risques de douleurs à l'épaule [Kibler et al., 2006; Tate et al., 2012]. Cependant, la plupart des études qui ont examiné les effets de l'entraînement à sec sur la performance ou la force en natation se sont concentrées sur des exercices ou des qualités qui impliquent seulement les membres supérieurs ou inférieurs négligeant l'impact potentiel du tronc dans leurs analyses [Amaro et al., 2018].

Concernant les qualités de force maximale et de puissance maximale, il a été rapporté par les préparateurs physiques que leur développement reposait sur des modalités différentes. Les actions musculaires de l'entraînement de la force maximale étaient principalement représentées par l'utilisation de modes de contraction concentriques (92%), excentriques (67%) et stato-dynamiques (67%). Les modes de contraction concentrique et excentrique ont été décrits comme des modalités d'entraînement efficaces pour développer la force maximale [Suchomel et al., 2018]. Cependant, à notre connaissance, il n'existe aucune preuve de l'efficacité des méthodes d'entraînement stato-dynamiques pour le développement de la force maximale. D'autres études doivent être menées, en particulier en natation, pour savoir s'il s'agit d'une méthode efficace pour développer cette qualité. Les autres paramètres du travail de la force maximale utilisés par préparateurs physiques dans notre étude (3-4 séries, 3-4 répétitions, approximativement à 90% de 1RM avec 3 minutes et 6 secondes de repos en moyenne) sont en adéquation avec les recommandations scientifiques et les pratiques de préparateurs physiques des nageurs élités d'autres pays en ce qui concerne le nombre de séries et de répétitions [Coburn & Malek,

2012; Pollock et al., 2019], les charges choisies [Lacio et al., 2021; Schoenfeld et al., 2017] et les temps de récupération entre les séries [De Salles et al., 2009]. En ce qui concerne les paramètres d'entraînement de la puissance maximale, les pratiques rapportées dans la présente étude (c'est-à-dire l'utilisation des modes concentriques et pliométriques, 3-4 séries, 6-7 répétitions, autour de 60% du 1RM et avec 2 minutes et 42 secondes de récupération entre les séries en moyenne) étaient également en adéquation avec les recommandations scientifiques et les pratiques d'entraînement en préparation physique des nageurs élités dans d'autres pays.

La périodisation de ces différentes qualités physiques était propre à chaque préparateur physique ou entraîneur mais semblait suivre une logique qui débutait par un travail de la force maximale pour finir par le développement de la vitesse à l'approche des compétitions. Cette approche se retrouve dans certaines recommandations scientifiques [Suchomel et al., 2018]. Cette logique pourrait se justifier entre autres par l'effet résiduel de chaque qualité physique, c'est-à-dire le temps qu'il peut s'écouler avant que l'on constate une diminution de ces capacités. Les effets résiduels de la vitesse maximale semblent être plus courts que ceux de la force maximale [Bissas et al., 2022; Bosquet et al., 2013; Pereira et al., 2020] ce qui expliquerait la volonté de solliciter le développement de la vitesse maximale à l'approche des compétitions.

En plus des exercices d'entraînement de la force à sec, des entraînements qui visaient des adaptations cardiovasculaires (par exemple de la course à pied, du cyclisme, du circuit training type crossfit) et des entraînements qui visaient une amélioration de la mobilité (c'est-à-dire l'augmentation de l'amplitude articulaire) ont été introduits, respectivement par 67% et 92% des personnes ayant répondu au questionnaire. De nombreuses raisons ont été invoquées pour justifier la mise en place d'entraînement « cardiovasculaire » hors de l'eau : « diversifier les activités » (n=5), « améliorer les capacités de récupération entre les courses » (n=4) et « rééquilibrer les systèmes nerveux / améliorer la coordination » (n=3). Étant donné que le volume d'entraînement aérobic en milieu aquatique est déjà conséquent [Haycraft & Robertson, 2015], l'introduction d'un entraînement aérobic supplémentaire en dehors de l'eau peut sembler discutable. Néanmoins, certaines études ont démontré que la fréquence cardiaque maximale lors d'un exercice de course à pied à intensité maximale est supérieure à celle observée durant un effort de même intensité en natation, en raison d'adaptations aiguës spécifiques à l'activité terrestre [Olstad et al., 2019]. Par conséquent, l'intégration d'activités complémentaires telles que la course à pied, dans le cadre de la préparation des nageurs, peut se révéler bénéfique pour atteindre des fréquences cardiaques plus élevées que celles obtenues au cours d'un entraînement en milieu aquatique. Les préparateurs physiques ont principalement utilisé la mobilité en routine pré-entraînement (n=15), de manière dynamique (n=12) ou à la fois dynamique et statique (n=8). Les principales raisons invoquées pour l'utilisation de l'entraînement à la mobilité étaient l'augmentation de l'amplitude des mouvements articulaires (n=6), la prévention des risques de blessures (n=4), l'amélioration de la

coordination (n=4) et l'échauffement des articulations (n=4). A notre connaissance, aucune étude n'a été identifiée attestant de l'efficacité de ce type de travail complémentaire sur l'incidence des blessures ou l'amélioration des performances en natation. Pour ces raisons, les pratiques des préparateurs physiques dans ce domaine pourraient être influencées par des pratiques issues d'autres sports, lesquelles pourraient toutefois ne pas être entièrement adaptées aux exigences spécifiques du milieu aquatique propre à la natation [Witvrouw et al., 2004].

Transfert de la préparation physique vers la nage

Comme l'ont souligné les entraîneurs, les contraintes spécifiques de l'environnement aquatique soulèvent la problématique du transfert des qualités physiques acquises à sec vers la nage. D'après les préparateurs physiques interrogés, ce transfert était parfois optimisé via des séances d'entraînement qui se déroulaient exclusivement dans l'eau avec diverses stratégies (travail en résistance à l'aide de plaquettes ou de bandes élastiques, n=5 ; travail de sprint, n=5 ; travail de sprint / de survitesse assistées, n=4). Ces méthodologies d'optimisation du transfert via un travail spécifique dans l'eau ont été soulignées dans une revue narrative sur la préparation physique en natation [Wirth et al., 2022] qui déclarait que la puissance ne pouvait être développée qu'après une activation nerveuse spécifique à l'activité (mouvement identique). Cela suppose que l'entraînement spécifique de la vitesse dans l'eau permettrait de mieux transférer les améliorations acquises en préparation physique à sec. Cette hypothèse semble correspondre aux pratiques de terrain rapportées chez certains préparateurs physiques dans la mesure où la vitesse et la survitesse dans l'eau étaient souvent cités (n=9) comme moyen de transférer ces qualités. Pour les entraîneurs interrogés, l'entraînement en résistance dans l'eau était également un exercice clé pour transférer la force à sec vers la nage (n=5). Les auteurs cités précédemment [Wirth et al., 2022] étaient moins en accord avec cette utilisation, soulignant le fait que l'eau n'offrirait dans tous les cas pas assez de résistance pour développer des niveaux de force suffisants pour induire un développement de la force spécifique. Ils recommandent donc, dans cet objectif de transfert, d'effectuer le travail dans l'eau avec des conditions aussi proches que possible de la nage libre, sans équipement.

Au-delà des modalités d'entraînement, les personnes interrogées ont indiqué que les membres du staff devraient d'abord s'accorder sur les priorités visées dans les deux conditions à sec et in situ. La cohérence et la concordance entre les programmes d'entraînement à sec et dans l'eau ont été l'action suivante la plus mentionnée par les participants (n=10). Cela met en lumière la disparité souvent constatée entre les aspirations des intervenants en matière de performance et les réalités logistiques rencontrées sur le terrain pour concrétiser ces objectifs. En effet, l'organisation des séances de préparation physique et de natation n'était, dans la plupart des cas, pas le fruit d'une décision stratégique des préparateurs physiques, mais plutôt dictée par des contraintes logistiques et temporelles.

L'agencement des séances d'entraînement in situ et hors de l'eau (avec la préparation physique précédant ou non la séance de natation) au cours d'une même journée semble constituer un paramètre clé dans l'optimisation du transfert, selon certains préparateurs physiques interrogés (n=8). Cette observation rejoint les conclusions de plusieurs auteurs ayant étudié cette question, notamment Arsoniadis et al. (2020). Les répondants ont ainsi suggéré que le travail en survitesse dans l'eau se réalisait principalement à la suite d'un entraînement en résistance in situ, afin de créer un contraste de charge qu'ils estimaient propice à la performance. Ce transfert pourrait également prendre la forme d'un entraînement intégré, combinant des séquences hors de l'eau et des exercices dans l'eau, comme l'ont suggéré certains répondants (n=4). Cette approche inclut majoritairement des alternances entre des exercices de développement de la force maximale hors de l'eau et des sprints dans l'eau. Toutefois, selon les participants à l'enquête, les séances exclusivement axées sur la préparation physique à sec, qu'il s'agisse de travail en contraste de charge ou d'endurance de force, ne semblaient pas être la méthode la plus efficace pour maximiser le transfert entre la préparation physique et la performance en nage. Bien que ces pratiques soient couramment utilisées pour améliorer les performances en natation sprint et aient été largement étudiées dans la littérature [Girolid et al., 2007; Kojima et al., 2018], leurs effets sur la performance restent relativement limités. Cela pourrait s'expliquer par le fait que de nombreux facteurs influencent le transfert, tels que l'ordre des séances ou les charges imposées lors des entraînements. En se penchant plus précisément sur la question de l'ordre des séances, il apparaît que l'option consistant à faire précéder la séance de préparation physique à celle de natation a été mentionnée plus fréquemment et choisie de manière plus délibérée par les préparateurs physiques interrogés, en comparaison avec l'ordre inverse, où la séance de natation précède la préparation physique. D'un point de vue scientifique, une revue récente sur ce sujet [Arsoniadis et al., 2022] a révélé que, sur le long terme, l'ordre des séances dans le cadre d'un entraînement parallèle en préparation physique et en natation n'influence pas significativement les gains de performance. Toutefois, il est essentiel de respecter une courte période de récupération, de quelques minutes, entre les séances pour optimiser ces gains. En revanche, selon cette étude, les effets aigus d'une séance peuvent impacter négativement la performance lors de la séance suivante. Ainsi, si l'objectif principal de la journée est d'améliorer les performances aquatiques, il est recommandé de commencer par la séance de natation.

Ces résultats mettent en lumière le dilemme auquel l'entraîneur est confronté, devant concilier les recommandations issues de la recherche scientifique, les contraintes logistiques inhérentes à la pratique sur le terrain, ainsi que les objectifs spécifiques de performance. Par ailleurs, une identification plus précise des séances d'entraînement susceptibles d'optimiser le transfert entre la préparation physique et la performance en natation pourrait encore être affinée. Une telle clarification contribuerait à renforcer l'efficacité des protocoles d'entraînement, en facilitant une meilleure intégration des principes de la préparation physique aux exigences spécifiques de la discipline aquatique.

Protocoles d'évaluation

Les exercices de musculation traditionnels, en plus d'être largement prescrits, sont également les plus couramment cités dans la littérature pour évaluer les niveaux de force des nageurs en conditions réelles [Morais et al., 2020]. Il apparaît donc crucial que les protocoles scientifiques et les pratiques d'évaluation sur le terrain soient adaptés et rigoureux [Wirth et al., 2022]. En ce sens, l'élaboration et l'optimisation des procédures de tests sur le terrain constituent également un aspect fondamental qui mérite une attention approfondie dans les recherches futures.

Dans le cadre spécifique de la préparation physique, certains préparateurs physiques (n=11) ont signalé recourir à des mesures de force et de vitesse afin de suivre l'évolution de ces capacités chez les athlètes. Toutefois, l'accessibilité limitée des dispositifs d'évaluation les plus récents, notamment en raison de leur coût élevé, pourrait expliquer pourquoi certains entraîneurs n'intègrent pas de tels protocoles dans leurs programmes d'entraînement. En effet, seuls les préparateurs physiques opérant au sein de centres nationaux d'entraînement, souvent placés dans des conditions plus avantageuses, ont rapporté l'utilisation de ces équipements onéreux.

Pour 79,2 % des répondants (n=19), il a été rapporté des progrès concomitants / parallèles à sec et hors de l'eau. Les indicateurs utilisés pour évaluer cette progression incluaient principalement la performance chronométrique en natation (n=10) ainsi que des paramètres spatio-temporels de nage, tels que la distance par cycle, le nombre de mouvements de bras et la fréquence de nage (n=4). Bien que cette approche, reposant sur des paramètres cinématiques simples, soit essentielle, il est crucial que la perception subjective de l'entraîneur soit renforcée par une évaluation objective de la force et de la puissance, tant hors de l'eau qu'en condition de nage. De surcroît, l'estimation de l'efficacité de la propulsion, qui décrit la manière dont la puissance mécanique totale est utilisée pour vaincre les forces de traînée, revêt une importance particulière [Peterson Silveira et al., 2023]. Dans cette optique, l'analyse du profil F-V, à la fois dans le cadre de la préparation physique à sec et en situation de nage [Raineteau, Nicolas, Duchateau, et al., 2023], pourrait fournir des informations précieuses pour mieux comprendre et optimiser le transfert entre ces deux environnements d'entraînement.

Limites

Cette étude a fourni une analyse approfondie des pratiques actuelles des entraîneurs en matière de préparation physique, en mettant particulièrement l'accent sur le transfert entre les exercices hors de l'eau et la nage. Toutefois, certaines limites méritent d'être soulignées. En premier lieu, bien que nous ayons suivi un processus rigoureux de conception du questionnaire, en conformité avec la checklist CHERRIES (Eysenbach, 2004), il convient de souligner que ce questionnaire n'a pas encore été validé dans la littérature scientifique. Une telle validation pourrait offrir une perspective différente quant à la

pertinence et à la fiabilité des questions dans l'évaluation des différentes variables étudiées. Il convient toutefois de noter que les risques de biais inhérents à l'utilisation d'un questionnaire non validé sont limités, compte tenu des données quantitatives recueillies ainsi que du choix de la population cible (spécialiste en préparation physique). En outre, des éléments qualitatifs ont également été intégrés à l'analyse, tels que les descriptions des tâches, les types de séances d'entraînement et les méthodologies employées, dans une optique holistique de la préparation physique au service de la performance en natation.

L'échantillon de cette étude, bien que relativement restreint (24 entraîneurs), doit être considéré à la lumière de la population estimée des préparateurs physiques répartie dans les 51 structures permettant la formation de nageurs de haut niveau en France [Fédération Française de Natation, 2019a]. Toutefois, étant donné que l'objectif principal était d'examiner les pratiques des préparateurs encadrant des nageurs de haut niveau, la représentativité de cet échantillon apparaît adéquate. Néanmoins, un échantillon plus large, incluant des préparateurs intervenant auprès de nageurs de niveaux inférieurs, permettrait d'étendre la portée des conclusions et de mieux généraliser les résultats à l'ensemble de la population des préparateurs physiques en natation. Dans la même philosophie, la composition de cet échantillon soulève la question de la représentativité internationale, étant donné que tous les préparateurs physiques interrogés étaient exclusivement français. Les qualifications requises pour cette profession, ainsi que les particularités de la culture sportive, peuvent varier d'un pays à l'autre, ce qui pourrait influencer les pratiques observées.

Il est également pertinent de considérer que les réponses fournies par les préparateurs physiques pourraient avoir varié selon la spécialisation (type de nage ou distance) des nageurs encadrés. Cependant, cette limite semble atténuée par le fait que la majorité des préparateurs physiques interrogés travaillaient principalement avec des sprinteurs. Enfin, demander aux participants de différencier leurs réponses en fonction du sexe, du niveau, ou de l'âge des nageurs aurait permis de nuancer davantage les analyses et de proposer une réflexion plus approfondie. Cette approche pourrait constituer une piste intéressante à explorer dans le cadre de recherches futures.

Apports de cette étude pour la thèse

Cette étude s'est concentrée sur les réflexions et les pratiques des préparateurs physiques en natation, plus spécifiquement sur la manière dont ils conçoivent et organisent les entraînements à sec ainsi que leur transfert vers l'environnement aquatique. Bien que les pratiques varient d'un entraîneur à l'autre, certaines tendances communes se dégagent, offrant ainsi plusieurs applications pratiques potentielles. Tout d'abord, les préparateurs physiques gagneraient à s'appuyer davantage sur la littérature

scientifique pour affiner et perfectionner leurs interventions sur le terrain. Les écarts les plus significatifs entre les perceptions des entraîneurs et les données issues de la recherche semblent concerner deux aspects majeurs : 1. L'ordre des séances à sec et dans l'eau : la majorité des entraîneurs interrogés privilégiait la réalisation de la préparation physique à sec avant la séance de natation. Toutefois, la littérature scientifique ne relève pas de différence notable en termes de performance à long terme, que la séance de préparation physique précède ou suive l'entraînement aquatique. 2. L'entraînement en résistance dans l'eau : cet aspect, souvent employé pour transférer les gains obtenus à sec vers le milieu aquatique, semble moins bien soutenu par les études du fait de l'absence de résultats tangibles et unanimes. En effet, bien que quelques études aient exploré cette pratique, certaines suggèrent que son impact sur l'amélioration des performances en natation pourrait être limité, remettant ainsi en question l'efficacité de cette méthode courante.

Ainsi, les conclusions de ce questionnaire soulignent notamment l'importance pour les préparateurs physiques de continuer à se tenir informés des avancées scientifiques afin de renforcer la pertinence de leurs pratiques et d'optimiser les résultats sportifs de leurs athlètes. Les préparateurs physiques ont la possibilité de concevoir des tests et de mettre en place un suivi rigoureux de divers paramètres dans les deux environnements — à sec et dans l'eau — afin d'analyser de manière plus précise le transfert des qualités physiques, telles que la force, la puissance et l'endurance, acquises lors des entraînements à sec vers le milieu aquatique. L'intégration d'outils simples, accessibles et peu coûteux, comme les applications mobiles, peut s'avérer particulièrement utile. Ces outils offrent des données précieuses, tant pour évaluer la préparation physique des athlètes que pour mener des analyses spatio-temporelles en milieu aquatique. En outre, d'autres technologies émergentes, notamment les dispositifs électromécaniques, représentent une voie prometteuse pour l'évaluation des qualités physiques des nageurs. Ces outils plus sophistiqués permettent de mesurer avec précision divers paramètres de performance, ouvrant ainsi la voie à une compréhension plus fine du transfert entre les différents types d'entraînement. L'intégration de ces nouvelles technologies dans les pratiques d'évaluation pourrait contribuer à optimiser les méthodes de préparation physique, en fournissant des données plus détaillées et pertinentes pour le développement des athlètes.

Etude n°2

Relations entre le profilage charge-vitesse et les paramètres de course de nageurs élités sur 100 et 200 m nage libre

Cette étude publiée fait référence à l'article suivant :

Raineteau, Y., Nicolas, G., Bideau, B., Bideau, N., & Pla, R. (2023). Associations between load-velocity profiling and race parameters of elite swimmers in the 100 and 200m freestyle events. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1326106.

Résumé

Objectifs : L'objectif de cette étude était d'examiner les relations entre les profils charge-vitesse (L-V), évalués grâce à un protocole de nage semi-attachée, avec les performances et les paramètres de course sur 100 m et 200 m nage libre.

Méthodes : Huit nageurs élités ont réalisé un profilage L-V en utilisant un protocole de sprint contre résistance composé de quatre sprints (25 m, 25 m, 20 m, 15 m) avec des charges croissantes (0.1, 2.0, 4.0, 6.0 kilogrammes respectivement) et une récupération complète entre les répétitions (5 minutes). La régression linéaire L-V a permis d'estimer les paramètres maximaux de vitesse (V_0) et de charge relative au poids de corps (rL_0). Trois puis quatre jours plus tard, les nageurs ont participé, lors d'une compétition internationale en bassin de 50 m, aux épreuves du 200 m et du 100 m nage libre respectivement. L'analyse vidéo a permis de calculer des paramètres de course tels que la vitesse de nage (V), la fréquence de nage (SR), la distance par cycle (SL) et l'indice de nage (SI).

Résultats : Les résultats des profils L-V ont montré des niveaux élevés de vitesse (moyenne $\pm$ SD : $1,87 \pm 0,04$ m/s) et des charges maximales relatives importantes (moyenne $\pm$ SD : $38,5 \pm 6,51$ % du poids de corps). Les nageurs ont également réalisé des performances de haut niveau sur le 100 m (temps moyen $\pm$ SD : 51.95 ± 0.75 s) et sur le 200 m (temps moyen $\pm$ SD : 113.85 ± 2.67 s). rL_0 a montré une forte corrélation avec la performance sur 100 m ($r=0,63$) alors qu'une corrélation triviale a été observée avec la performance sur 200 m ($r=0,12$). SR sur le 100 m et le 200 m a également montré une très forte association avec rL_0 ($r=0.83$) et une forte association avec V_0 ($r=0.68$) respectivement.

Conclusion : Les résultats montrent que les relations entre les profils L-V et les facteurs de performance dépendent de la distance de course. Cependant, les profils L-V semblent moins liés aux évolutions de SR et de SL lors de l'épreuve du 100 m que lors de l'épreuve du 200 m, chaque distance de course impliquant des contraintes physiologiques et biomécaniques spécifiques. De plus, d'une manière générale, les profils L-V tendent à être plus liés à la performance sur 100m que sur 200m nage libre. Les profils L-V pourraient être un outil utile pour évaluer indirectement l'organisation spatio-temporelle des nageurs de 200m nage libre et pour estimer la performance sur les distances de sprint (50m / 100m).

Introduction

Depuis plusieurs années, grâce au développement de nouvelles technologies et à l'amélioration des méthodes d'analyse, le nombre d'études sur l'analyse de la performance en compétition a fortement augmenté [Gonjo & Olstad, 2020]. Les principaux déterminants de la performance dont il est question dans ces études sont les paramètres de nage tels que la fréquence de nage (SR) et la distance par cycle (SL) [Craig et al., 1985; Hellard et al., 2008; Huot-Marchand et al., 2005]. Cependant, il est difficile pour les entraîneurs de disposer d'informations supplémentaires en compétition. C'est pourquoi certains tests sont pertinents afin d'évaluer la technique de nage en amont de la compétition [Barbosa et al., 2021]. Plus précisément, ces tests peuvent par exemple permettre d'identifier certains facteurs clés de la performance et d'adapter l'entraînement en fonction des profils des sportifs testés [Sheppard et al., 2021].

Comme décrit précédemment (cf. section 4 du cadre théorique), le profilage F-V est une méthodologie utilisée afin d'évaluer les athlètes et orienter l'entraînement [Cross, Lahti, et al., 2018; Jiménez-Reyes et al., 2018, 2022] dans différents sports comme la course à pied, le rugby et le football. En natation, une méthodologie similaire appelée profilage L-V est adaptée à l'environnement aquatique. Bien que certains auteurs précurseurs aient mis en lien les paramètres issus de cette méthodologie d'évaluation avec la performance en sprint [Gonjo et al., 2020, 2021; Olstad et al., 2024], ces études présentent certaines lacunes. En effet, seuls les paramètres de charge maximale théorique (L_0 / rL_0) ou de vitesse maximale théorique (V_0) étaient utilisés pour identifier les qualités des nageurs lors des tests, ce qui empêche d'émettre des hypothèses sur la contribution des différents facteurs hydrodynamiques dans la performance. De même, la performance évaluée n'était réalisée que sur une seule distance, le 50 m, ce qui limite l'extrapolation des résultats à des nageurs de plus longues distances. Enfin, les performances évaluées n'étaient pas réalisées en situation réelle de compétition soulevant la problématique de différence d'engagement entre une performance réalisée à l'entraînement et en compétition.

La présente étude se propose donc de pallier à certaines de ces limites en mesurant plusieurs paramètres, tels que l'efficacité propulsive ainsi que les variations de vitesse intra-cyclique, pouvant influencer les facteurs hydrodynamiques de la performance. Ces paramètres ont également été mis en lien avec la performance et les paramètres spatio-temporels des courses sur 100 m et 200 m nage libre en situation réelle de compétition chez des nageurs de haut niveau.

Méthodes

Participants

Huit nageurs masculins ($18,6 \pm 1,9$ ans ; $74,5 \pm 5,9$ kg ; $182,0 \pm 2,9$ cm) finalistes aux championnats de France Elite et faisant partie du même groupe d'entraînement dans un club d'excellence, ont volontairement participé à cette étude. Leur volume d'entraînement annuel était de 1844 km au cours de la saison durant laquelle l'étude a été menée. 62,5 % du volume nagé dans la saison a été réalisé à faible intensité (lactate sanguin $[La]b < 2$ mmol·L⁻¹), 20,5 % à intensité modérée ($[La]b$ entre 2 et 4 mmol·L⁻¹), et 17 % à $[La]b > 4$ mmol·L⁻¹ [Hellard et al., 2019]. Les nageurs avaient au moins 9 ans d'expérience en tant que nageurs de compétition et leurs caractéristiques de performance sont présentées dans le Tableau 5. Sur la base de leurs meilleures performances personnelles, quatre nageurs pouvaient être classés au niveau 3, trois au niveau 2 et un au niveau 1 [Ruiz-Navarro et al., 2023].

	Age (années)	Taille (cm)	Masse corporelle (kg)	Meilleure performance (points World Aquatics)
Nageur 1	19	183	86,6	737
Nageur 2	18	178	69,8	771
Nageur 3	17	185	75,8	766
Nageur 4	21	180	72,7	930
Nageur 5	20	186	74,0	807
Nageur 6	17	182	74,2	788
Nageur 7	22	180	68,5	851
Nageur 8	20	185	78,6	861

Tableau 5 : Caractéristiques des participants.

Protocole expérimental

La session de mesure a eu lieu avant le Meeting Open Méditerranée, une compétition en bassin de 50 m. Le profilage L-V a été réalisé dans une piscine intérieure de 25 m (température de l'air : 25,1°C ; température de l'eau : 28,5°C). Les nageurs étaient équipés de leur maillot d'entraînement habituel. La session de mesure s'est déroulée entre 7h00 et 9h00 le même jour pour chaque nageur. Chaque nageur a effectué un échauffement individualisé de 20 minutes comprenant 600 m à faible intensité, 200 m d'exercices spécifiques et trois répétitions de courtes distances (20 m) à vitesse maximale. La compétition, organisée dans un bassin de 50 m, s'est déroulée 3 jours après la session de test pour le 200 m et 4 jours après pour le 100 m. Un des nageurs n'a pas participé à l'épreuve du 100 m nage libre, et un autre n'a pas participé à l'épreuve du 200 m nage libre.

Profilage L-V in situ

Les nageurs ont participé à un protocole de sprint contre résistance en utilisant le 1080 sprint (1080 motion, Lidingö, Suède), un outil avec une fréquence d'échantillonnage de 333 Hz et permettant de réaliser le profilage L-V. Le protocole suit celui mis en place dans de précédentes études [Gonjo et al., 2020, 2021]. Le protocole consistait pour les nageurs à parcourir quatre distances à intensité maximale (25 m, 25 m, 20 m et 15 m) contre des charges croissantes (0,1 ; 2 ; 4 et 6 kg respectivement) avec une récupération complète entre chaque sprint (>5 min). Les charges ont été choisies en fonction des recommandations scientifiques exposées dans le cadre théorique (section 4) [Cuenca-Fernández, Gay A., et al., 2020; Dominguez-Castells & Arellano, 2012; Olstad et al., 2020] afin de ne pas dégrader le pattern de nage tout en prenant en compte le niveau des nageurs évalués. La vitesse instantanée a été collectée directement via l'appareil pour chaque charge imposée. Concernant le traitement des données post-session, la vitesse horizontale de la nage (v_h) a été calculée comme suit :

$$v_h = v \cdot \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{0,45}{LC} \right) \right] \quad (28)$$

où v représente la vitesse mesurée par le dispositif, LC représente la distance entre le dispositif et le nageur, et 0,45 représente la hauteur (en mètre) entre le dispositif et la surface de l'eau (Figure 35).

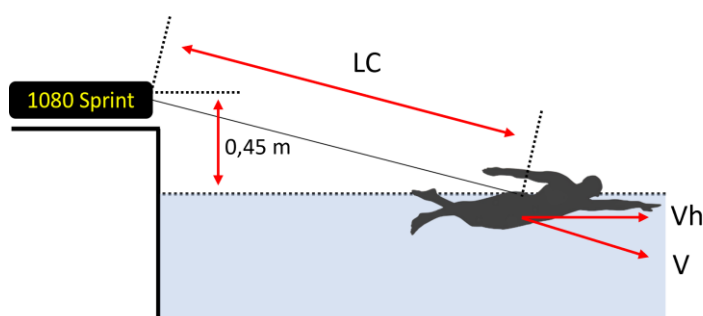


Figure 35 : Installation du système de résistance motorisé et détermination de la vitesse horizontale

Les vitesses horizontales moyennes ont été calculées pour chaque essai en utilisant trois cycles de mouvement de bras consécutifs au milieu des sprints, ce qui exclut la poussée au mur et la coulée, comme décrit dans une précédente étude [Gonjo et al., 2021]. Les valeurs maximales de vitesse (V_0) et de charge normalisée à la masse corporelle (rL_0) ont été calculées en utilisant la régression linéaire L-V. La pente de la régression linéaire a été calculée selon l'équation 23 présentée dans la section 4 du cadre théorique. Le premier passage de chaque nageur lors du protocole était filmé de face afin de calculer l'efficacité propulsive des bras (η_p). Plus précisément, η_p a été calculé en utilisant le modèle de la roue à aube [Martin et al., 1981]. Ce modèle considère que le bras est un segment rigide (l) tournant à une vitesse angulaire constante (ω) et que l'un des deux bras entre dans l'eau ($\alpha = 0$) lorsque l'autre en sort ($\alpha = \pi$) (Figure 36) [Zamparo et al., 2005] :

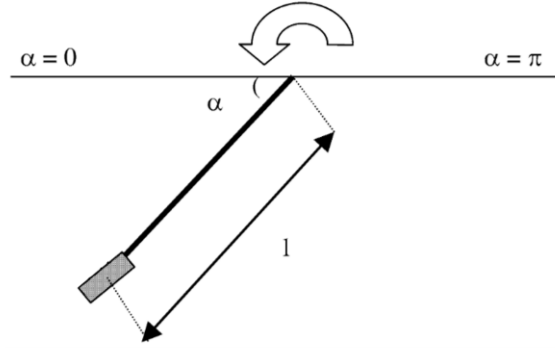


Figure 36 : Modèle de la roue à aube, illustrée par [Zamparo et al., 2005], inspiré de [Martin et al., 1981].

La vitesse de la main (v_{hand}) peut donc être calculée comme suit :

$$v_{hand} = \omega \cdot l \quad (29)$$

La vitesse angulaire (ω) et la longueur du bras (l) ont été calculés à partir de la fréquence de nage (SR) et de l'angle entre le bras et l'avant-bras (θ) obtenus à partir de la vidéo, ainsi que de la mesure des bras (l_b) et des avant-bras (l_{ab}). Nous pouvons donc écrire :

$$\omega = 2\pi \cdot SR \quad (30)$$

et

$$l = \sqrt{l_b^2 + l_{ab}^2 - 2 \cdot l_b \cdot l_{ab} \cdot \cos \theta} \quad (31)$$

Nous supposons que l'action des bras contribue à 90% de la vitesse maximale en sprint sur 25 m, comme suggéré par de précédentes études [Deschodt et al., 1999; Peterson Silveira et al., 2017; Zamparo et al., 2005]. Ainsi, à partir de la vitesse du nageur (v) mesurée par le 1080 Sprint et de la vitesse de sa main (v_{hand}), nous pouvons donc calculer l'efficacité propulsive η_P (des membres supérieurs comme suit [Peterson Silveira et al., 2019] :

$$\eta_P = \frac{0,9 \cdot v}{v_{hand}} \quad (32)$$

Enfin, la variation de vitesse intra-cycle (IVV) a été calculée en utilisant cette équation [Schnitzler et al., 2010] :

$$IVV = \frac{\text{Écart type de la vitesse}}{\text{Vitesse moyenne}} \times 100 \quad (33)$$

Mesures, traitement et analyse des données en situation de course : performance et paramètres spatio-temporels

Pendant la compétition, toutes les courses ont été enregistrées avec une caméra fixe 1080p (Sony FDR AX700) en mode panoramique, positionnée au niveau de la ligne des 25 mètres, en haut des gradins et perpendiculairement à l'axe longitudinal de la piscine. La fréquence d'échantillonnage était de 50 Hz. Comme décrit dans une étude précédente [Hellard et al., 2008; Pla et al., 2021], la vidéo a ensuite été analysée image par image à l'aide d'un logiciel d'analyse de course (Espadon, Actriss, Brest, France), permettant de calculer la vitesse et les paramètres spatio-temporels de la nage pour chaque participant. En utilisant un traitement manuel des images et à l'aide des repères inscrits sur chaque ligne tous les cinq mètres [Veiga & Roig, 2016], le moment où la tête du nageur franchissait chaque repère, ainsi que le début de chaque mouvement de bras était relevé. Pour mesurer tous les paramètres spatio-temporels, le temps et les points de la première et de la dernière entrée du bras pour chaque longueur ont été déterminés, définissant ainsi le début et la fin de chaque partie nagée et permettant de calculer la vitesse de nage (V ; vitesse de nage excluant les parties sous-marines). Cette vitesse de nage (m/s) a été déterminée en divisant la distance totale parcourue sur ces parties nagées par le temps mis pour effectuer cette distance. SC représente le nombre total d'entrées du bras à la surface de l'eau. La distance par cycle (SL) a été calculée en divisant la distance de nage par SC. La fréquence de nage (SR) a été calculée en divisant le temps de nage par SC. L'indice de nage (SI) est le produit de V et de SL [Costill et al., 1985]. Nous avons recueilli ces paramètres pour chaque longueur (une valeur par longueur pour chaque paramètre de nage). Dans le cadre de l'analyse statistique, nous avons calculé une moyenne globale sur toute la durée de la course pour chaque paramètre (en utilisant la moyenne des deux longueurs pour le 100 m et des quatre longueurs pour le 200 m).

Analyses statistiques

Pour toutes les variables, des statistiques descriptives (moyenne, écart type, minimum, maximum et coefficient de variation inter- et intra-individuel) ont été réalisées. Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour vérifier la normalité des données. Les coefficients de corrélation r de Pearson ont été calculés entre les paramètres issus du profilage L-V et les paramètres de course. Nous avons considéré les seuils de 0,1 ; 0,3 ; 0,5 ; 0,7 et 0,9, correspondant respectivement à des corrélations faibles, modérées, fortes, très fortes et presque parfaites [Hopkins et al., 2009]. La signification statistique des données a été évaluée à l'aide du test T de Student. L'hypothèse nulle a été rejetée pour $p < 0,05$. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Rstudio (PBC, Boston, Massachusetts, USA).

Résultats

Les nageurs ont réalisé un temps moyen de 51,95 s (minimum : 50,89 s ; maximum : 52,47 s) sur le 100 m nage libre et de 113,85 s (minimum : 109,55 s ; maximum : 117,73 s) sur le 200 m nage libre, ce qui correspondait respectivement à 90,3 % et 89,6 % des records du monde.

Malgré des résultats homogènes en compétition, les résultats ont montré des profils L-V variés (Figure 37). Pour de faibles variations inter-individuelles de V_0 (entre 1,80 m/s et 1,93 m/s), nous avons observé une grande amplitude de rL_0 (de 0,30 à 0,50 kg/kg de poids corporel).

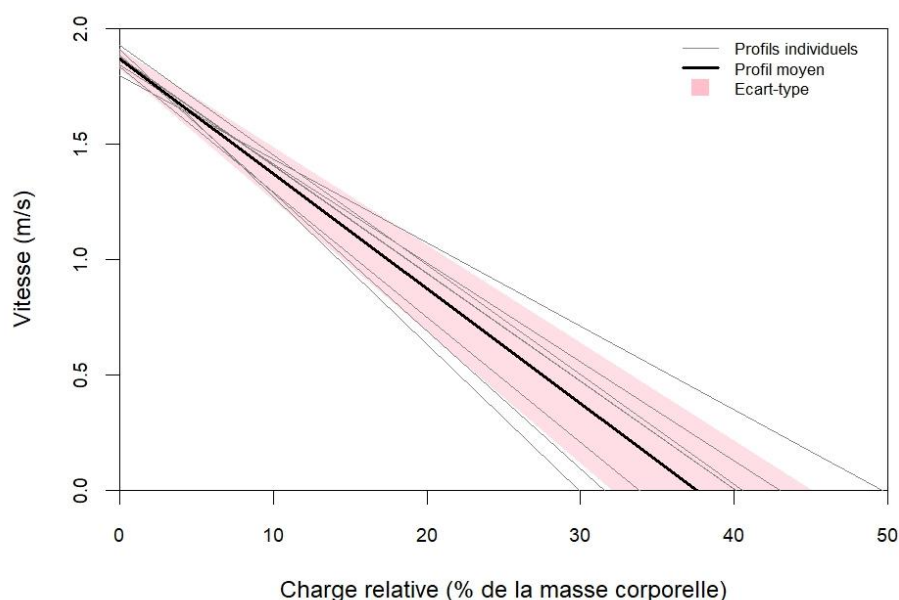


Figure 37 : Résultats individuels des régressions linéaires charge-vitesse, présentant également la moyenne interindividuelle et l'écart-type des résultats de groupe.

La Tableau 6 présente l'ensemble des résultats des profilages charge-vitesse et des paramètres de course. Concernant les résultats du profilage L-V, V_0 est le paramètre avec le coefficient de variation inter-individuel le plus bas (2,3 %), reflétant le résultat le plus homogène. Tous les paramètres spatio-temporels de la nage sont présentés pour les épreuves de 100 m et 200 m nage libre. Les valeurs représentent les moyennes intra-individuelles des paramètres de vitesse de nage, de fréquence de nage, distance par cycle et indice de nage, sur l'ensemble de la course. Nous avons observé plus de variations intra-individuelles de SL que de SR lors des épreuves de 100 m et 200 m nage libre.

	Moyenne ± Ecart-type	Minimum	Maximum	Coefficient de variation inter-individuel
Résultats issus des profilages charge- vitesse				
V ₀ (m/s)	1,87 ± 0,04	1,80	1,93	2,30%
rL ₀ (en % de la masse corporelle)	38,5 ± 6,51	29,9	49,7	16,90%
ηP (en % de la puissance totale)	51,0 ± 3,8	46	56	7,48%
IVV (en % de la vitesse moyenne)	10,7 ± 2,77	6,1	14,8	25,98%
Paramètres de course du 100 m nage libre				
				Moyenne des coefficients de variation intra-individuels (par 50 m)
Vitesse des phases nagées (m/s)	1,79 ± 0,03	1,76	1,83	1,66%
Fréquence de nage (c/min)	49,6 ± 0,9	48,3	50,6	1,90%
Distance par cycle (m/cycle)	2,24 ± 0,05	2,17	2,32	3,31%
Indice de nage (m ² /s)	4,02 ± 0,12	3,82	4,16	4,79%
Paramètres de course du 200 m nage libre				
Vitesse des phases nagées (m/s)	1,73 ± 0,04	1,67	1,79	1,97%
Fréquence de coups de bras (c/min)	42,9 ± 2,2	39,9	45,6	4,18%
Distance par cycle (m/cycle)	2,39 ± 0,13	2,24	2,53	5,40%
Indice de nage (m ² /s)	4,13 ± 0,27	3,80	4,52	6,22%

Tableau 6 : Résultats des profilages charge-vitesse et des paramètres de course.

Les matrices de corrélation (Figures 38.A. & B.) décrivent les relations entre les profils L-V et les paramètres spatio-temporels des courses de 100 m et le 200 m nage libre respectivement. V₀ était très fortement corrélé avec SL sur le 200 m ($r = -0,76$), mais seules des corrélations faibles ou modérées ont été trouvées entre V₀ et les paramètres de course sur le 100 m. D'autre part, rL₀ était très fortement corrélé avec SR ($r = 0,83$) et fortement corrélé avec la vitesse de nage sur le 100 m ($r = 0,63$), mais seules des corrélations faibles ou modérées ont été trouvées entre rL₀ et les paramètres de course sur le 200 m.

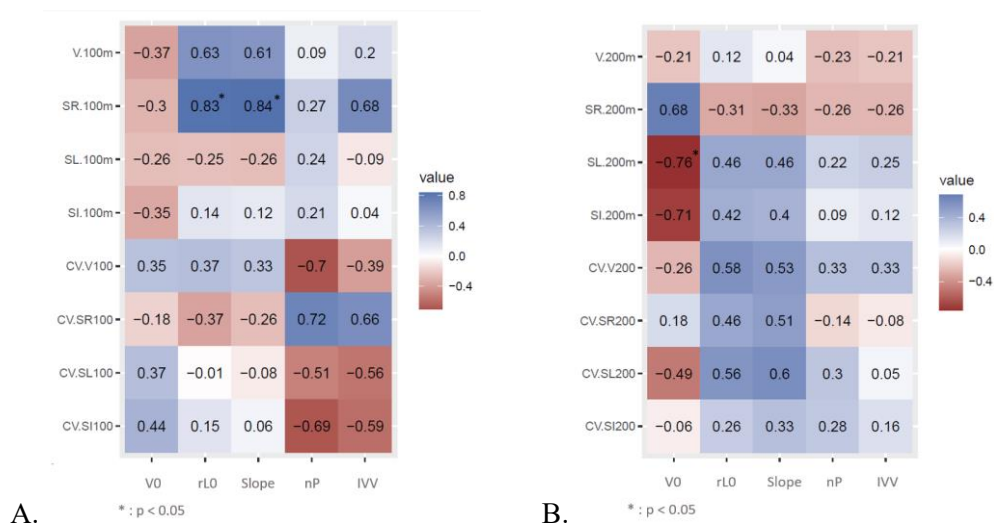


Figure 38 : (A) Coefficient de corrélation r de Pearson entre les paramètres de course sur 100 m et les paramètres issus du profilage L-V. (B) Coefficient de corrélation R de Pearson entre les paramètres de course sur 200 m et les paramètres issus du profilage L-V.

La Figure 39 représente les profils des sept nageurs différents ayant participé à l'épreuve du 100 m. Nous pouvons remarquer que deux de ces nageurs (en rouge et en bleu) ont des performances similaires sur 100 m, mais présentent des profils hydrodynamiques distincts avec des valeurs de η_p et d'IVV opposées.

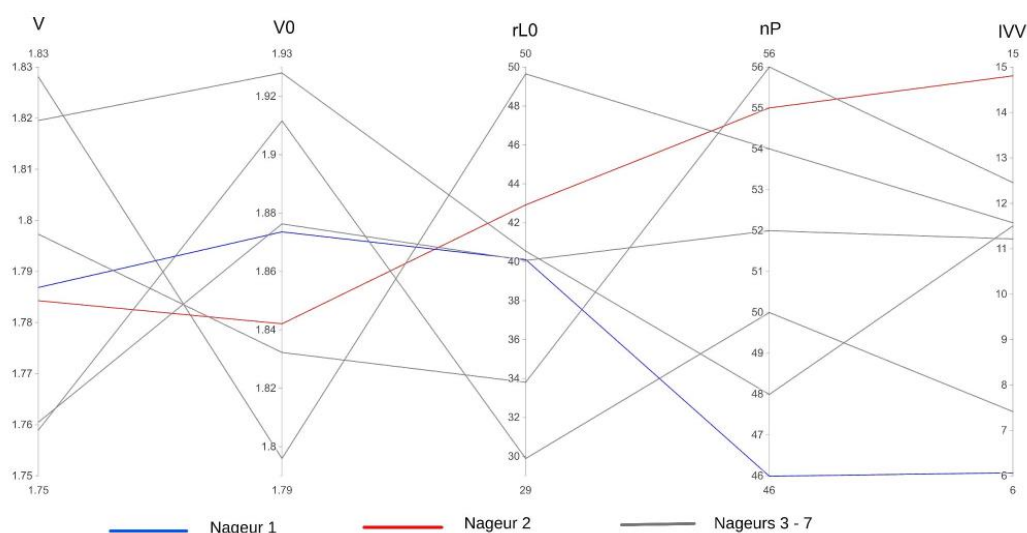


Figure 39 : Représentation globale des profils des nageurs, en tenant compte de la variable de vitesse lors de l'épreuve du 100 m nage libre et d'autres variables issues de la session de tests. Chaque ligne représente un nageur.

Discussion

Originalité de l'étude

Cette étude est la première à décrire les associations entre les profils L-V réalisés en natation et les paramètres spatio-temporels de course chez des nageurs d'élite. Les principaux résultats suggèrent que V_0 n'est pas un bon déterminant de la performance sur 100 m ou 200 m, mais que ce paramètre est fortement lié aux paramètres de nage en compétition (SL, SR et SI) sur 200 m, tandis que rL_0 est fortement corrélé avec la performance sur 100 m. Cette étude est également la première à présenter les profils L-V de nageurs de ce niveau. En effet, nos résultats montrent des valeurs plus élevées de V_0 et de rL_0 par rapport aux travaux précédents réalisés sur des nageurs élites [Gonjo et al., 2021]. De plus, ces résultats mettent en évidence un groupe plus homogène avec un coefficient de variation (CV) plus faible pour V_0 et rL_0 . Nous avons également observé des résultats différents en ce qui concerne les corrélations entre les résultats issus du profilage L-V et la vitesse de nage par rapport à l'étude mentionnée plus haut, rL_0 et V_0 montrant une association plus faible avec la performance dans la présente étude. Les paramètres utilisés pour l'expression de la performance (la vitesse moyenne des parties nagées en surface vs. la vitesse moyenne totale) et la distance évaluée (100 et 200 m vs. 50 m) diffèrent entre les deux études (la présente étude et la précédente [Gonjo et al., 2021] respectivement), ce qui pourrait expliquer les différences de résultats.

Relations entre les résultats des profilages L-V et les paramètres issus des courses

Les corrélations entre les résultats des profilages L-V et les paramètres spatio-temporels des courses diffèrent également entre les deux distances évaluées dans la présente étude. Plus la distance de course était longue, plus les paramètres de nage sur cette course étaient associés à V_0 (Figure 38). Cela peut s'expliquer par le fait que chaque distance requiert des capacités physiologiques et biomécaniques spécifiques [Gonjo & Olstad, 2020]. Cependant, V_0 n'était pas corrélé à la vitesse de nage sur 100 m et 200 m. Il est possible que les valeurs de V_0 assez homogènes au sein du groupe (CV = 2,3 %) ainsi que les organisations de course différentes entre les nageurs évalués puissent expliquer ce résultat. Concernant les résultats du 100 m, nous avons observé une forte corrélation entre V et rL_0 , ainsi qu'une très forte corrélation entre SR et rL_0 . Ces résultats sont en accord avec une étude précédente [Morouço et al., 2012] qui a montré des résultats similaires, soulignant une forte corrélation entre les valeurs de force moyenne mesurées sur un protocole de nage attachée de 30 s et la performance sur 100 m ($r = 0,72$). De plus, l'association entre rL_0 et SR sur 100 m pourrait s'expliquer par la capacité des nageurs de courte distance à produire plus de force et de puissance, et probablement à maintenir une fréquence de nage (SR) plus élevée [Carvalho et al., 2019]. D'autres études ont montré qu'une amélioration de SR et de la vitesse pouvait se produire après un programme d'entraînement en force [Lopes et al., 2021]. Il a également montré que les nageurs élites présentaient un SR plus élevé que les nageurs d'un niveau

plus faible, paramètre lui-même associé à une phase propulsive plus efficace et à la stabilité de ces valeurs durant la course [Seifert et al., 2007].

Les corrélations entre les paramètres issus du profilage L-V et les variations de vitesse et de fréquence de nage au cours des courses soutiennent cette observation. Nous avons constaté que η_p , mesurée lors de la session de test, présentait une corrélation négative avec les variations de vitesse sur le 100 m, tandis qu'elle était positivement corrélée avec les variations de SR lors de la même épreuve. On peut donc en déduire que les nageurs les plus efficaces semblent maintenir leur vitesse tout au long du 100 m grâce à leur capacité à ajuster leur SR. En comparaison, une étude précédente a montré que les nageurs les plus rapides sur 100 m nage libre se distinguaient par leur capacité à maintenir leurs paramètres de nage tout au long de la course [Chollet et al., 1997]. Les résultats de cette étude diffèrent légèrement des nôtres ce qui pourrait en partie être expliqué par la différence des paramètres considérés (à savoir, l'efficacité et la vitesse respectivement). Néanmoins ces paramètres sont des notions liées par la performance. En effet, comme évoqué dans le cadre théorique (section 4), la capacité à nager vite résulte théoriquement de la capacité : (i) à produire une puissance mécanique élevée permettant de générer une force propulsive importante ; (ii) à réduire la traînée ; (iii) à performer avec une efficacité importante [Toussaint et al., 2000]. De plus, certaines études ont montré que les nageurs caractérisés par la plus grande efficacité propulsive sont également les plus économes [Di Prampero et al., 2011], ce qui pourrait être bénéfique pour maintenir la vitesse sur 200 m, mais aussi sur 100 m.

Les relations entre les évolutions de vitesse et de fréquence de nage avec des paramètres biomécaniques telles que la force en nage attachée ont également été étudiées par certains auteurs [Costa et al., 2023], qui ont montré une forte corrélation ($r = 0,62$) entre le pic de force (F_{peak}) et les changements relatifs de vitesse durant le 100 m nage libre. Nous avons trouvé une association plus faible entre rL_0 et les variations de vitesse sur le 100 m. Nous supposons que cette différence de résultats est due aux différents paramètres dynamiques mesurés dans notre étude (rL_0) et dans l'étude mentionnée ci-dessus (F_{peak}), suggérant que rL_0 reflète des qualités différentes, en intégrant notamment l'efficacité propulsive, par rapport à F_{peak} .

Vue d'ensemble des profils

Cette hypothèse peut être étayée par l'étude de cas de deux nageurs ayant réalisé des performances similaires au 100 m nage libre (c'est-à-dire 49,04 et 49,37 s). Bien qu'ils aient également obtenu des résultats similaires lors du profilage L-V, leurs profils hydrodynamiques étaient très différents, avec des valeurs opposées aux extrêmes du groupe pour certains paramètres comme η_p ou encore IVV. En effet, la performance en natation consiste à trouver un équilibre entre propulsion et force de traînée. Ainsi, la production de vitesse peut dépendre de paramètres allant dans le sens d'une force de propulsion totale ou utile élevée, ou de traînée active faible [Toussaint et al., 2000]. Les valeurs

d'IVV moins élevée chez le nageur 1 que chez le nageur 2 et, par conséquent, une traînée active supposée plus faible [Barbosa et al., 2013] pourrait ainsi expliquer les vitesses de nage en course similaires malgré l'efficacité propulsive plus faible chez le nageur 1 que chez le nageur 2. Cela souligne l'importance de combiner les mesures pour évaluer les paramètres cinématiques et dynamiques en natation.

Limites

Ces résultats doivent être interprétés en tenant compte des limites potentielles de cette étude. Premièrement, le nombre de participants était restreint et la population ne comprenait que des nageurs masculins, pour lesquels nous n'avons analysé que les épreuves de nage libre. De plus, l'évaluation et la compétition ont eu lieu à un moment de la saison ne correspondant pas à un pic de forme des nageurs, et l'entraîneur du groupe n'avait pas réduit leur charge d'entraînement en vue de cette compétition. Toutes ces raisons pourraient avoir atténué certaines conclusions de cette étude.

D'un point de vue méthodologique, cette étude s'est cantonnée à un profilage L-V, comme la très grande majorité des études à ce jour [Gonjo et al., 2021; Olstad et al., 2020]. Le contrôle précis de la charge via le système électro-magnétique utilisé, ainsi qu'une méthodologie expérimentale rigoureuse (choix du nombre de points, implication totale des nageurs dans chaque effort de sprint) donnent une grande confiance dans l'acquisition des points de mesure du profil. Toutefois, le profilage F-V serait une perspective intéressante mais nécessiterait la mise en œuvre d'une méthode telle que la VPM, ce qui fera l'objet de mesures réalisées dans l'étude n°4. En effet, cette dernière étude est réalisée dans le cadre d'une évaluation de l'effet d'un programme de préparation physique à sec qui pourrait impacter les paramètres hydrodynamiques par une modification des paramètres anthropométriques.

Apports de cette étude pour la thèse

Les résultats de cette étude proposent des implications pour les entraîneurs qui accordent une grande importance à l'évaluation de la technique des nageurs pendant les périodes d'entraînement. Le profilage L-V, ainsi que les paramètres biomécaniques qui en découlent, peuvent être des outils précieux pour évaluer la technique, suivre les changements des paramètres spatio-temporels de la nage, et identifier les domaines à améliorer tant au niveau de la propulsion que des aspects techniques du crawl. De plus, le profilage des nageurs à l'aide de ce protocole de sprint semi-attaché offre une 'carte d'identité' complète de chaque nageur. Par ailleurs, la charge relative maximale, qui reflète le niveau maximal de nage contre résistance et est associée à la performance sur différentes distances, pourrait justifier l'intégration d'entraînements en résistance dans l'eau. Ces observations soulignent l'importance de considérer un panel important de paramètres biomécaniques lors de l'évaluation du profil d'un nageur. De plus, l'étude met en lumière la variabilité entre les différentes distances de course, ce qui semble influencer la relation entre les résultats du profilage L-V et les paramètres de nage en compétition.

Etude n°3

Associations entre les paramètres dérivés des profilages force-vitesse à sec et charge-vitesse dans l'eau, une étude sur des nageurs de haut niveau.

Résumé

Introduction : En natation, l'amélioration de la propulsion peut être engendrée en partie par l'entraînement en résistance à sec. En effet, de précédentes études ont montré que la capacité à produire une puissance maximale et une force maximale à sec est fortement liée à la performance en natation sprint. Cependant, ces études n'ont pas abordé la relation entre les paramètres dérivés des profils F-V à sec et des profils L-V dans l'eau. L'objectif de cette étude est donc d'examiner ces relations chez des nageurs de sprint de haut niveau.

Méthodes : Dix nageurs et sept nageuses (moyenne $\pm$ écart-type, âge : $18,4 \pm 2,2$ ans ; masse corporelle : $67,5 \pm 6,3$ kg ; taille : $178,7 \pm 7,9$ cm) ont réalisé des profilages F-V à sec sur trois exercices différents (tirage vertical, développé couché et tirage banc). Un profilage L-V en crawl a ensuite été réalisé dans l'eau grâce à un protocole de nage semi-attachée. Des régressions linéaires multiples et des corrélations de Spearman ont été effectuées pour établir des relations entre les paramètres mesurés dans les deux conditions.

Résultats : Les principaux résultats de cette étude ont montré que la force maximale ex situ (à sec), comparée à la vitesse maximale ex situ, était plus fortement corrélée aux paramètres issus du profilage in situ (en conditions de nage). Plus précisément, de fortes corrélations ont été trouvées entre la force maximale mesurée sur l'exercice de tirage vertical et les paramètres issus du profilage dans l'eau. D'autres résultats ont suggéré que les paramètres de force, de vitesse et de puissance à sec étaient plus fortement associés à la vitesse maximale dans l'eau qu'à la charge maximale. Un effet dépendant du sexe a finalement été observé concernant les paramètres L-V et certains paramètres mesurés à sec tels que la puissance maximale.

Conclusion : Cette étude souligne l'importance de cibler les capacités à développer (comme la force maximale à sec) et les exercices à utiliser (comme le tirage vertical) dans l'amélioration des facteurs de performance en natation sprint.

Introduction

La précédente étude de ces travaux de thèse s'est attachée à mettre en lien les paramètres issus du profilage L-V en crawl et la performance en compétition. Les résultats de cette étude, associés aux résultats d'études antérieures, ont permis d'identifier des relations différentes en fonction de la distance de course entre les paramètres mesurés lors des tests et en compétition. Cette relation était particulièrement forte entre V_0 , rL_0 / L_0 et la performance en sprint [Gonjo et al., 2020, 2021; Raineteau, Nicolas, Bideau, et al., 2023] permettant notamment d'identifier la charge maximale théorique comme un indicateur des capacités propulsives du nageur. Dès lors, le profilage L-V en natation pourrait être considéré comme un outil de suivi des qualités de propulsion du nageur.

D'autre part, l'amélioration de la propulsion en natation peut être réalisée grâce à diverses méthodes, dont l'entraînement en résistance à sec, utilisé par plus de 85 % des préparateurs physiques en natation [Crowley et al., 2018]. Comme décrit précédemment (cf. section 4 cadre théorique), le profilage F-V est une méthodologie communément utilisée afin d'évaluer les capacités maximales de force, de vitesse et de puissance du sportif testé, sur différents mouvements ou exercices de préparation physique [Baena-Raya et al., 2021]. Cette méthodologie a notamment été utilisée en natation par certains auteurs afin de mettre en relation les paramètres issus du profilage F-V et la performance [Chalkiadakis et al., 2023; García-Ramos, Tomazin, et al., 2016; Morouço, Neiva, et al., 2011]. De même, d'autres auteurs ont mis en lien certains paramètres mesurés à sec avec des paramètres issus du profilage L-V dans l'eau [Cuenca-Fernández, Gay A., et al., 2020]. Néanmoins, aucune étude à notre connaissance ne s'est attachée à mettre en lien les capacités maximales déterminée par le profil F-V à sec avec les paramètres issus du profilage L-V en natation.

L'objectif de la présente étude était donc d'établir les relations entre les profils F-V réalisés sur différents exercices de préparation physique et les profils L-V dans l'eau réalisés en crawl. Ce travail doit ainsi permettre d'identifier les exercices et les qualités à sec les plus fortement corrélées avec les paramètres dans l'eau. Les relations F-V des exercices à sec étant influencées par l'effet du sexe [Nikolaidis, 2012], nous avons également proposé de distinguer les résultats des profils F-V et L-V en fonction du sexe des participants.

Méthodes

Afin de répondre aux problématiques soulevées dans l'introduction, des profilages F-V à sec ont été réalisés sur trois exercices couramment prescrits en préparation physique chez les nageurs [Pollock et al., 2019; Raineteau et al., 2024]. Ces exercices mobilisent des groupes musculaires similaires à ceux sollicités lors de la nage en crawl [Crowley, 2020]. Les exercices ciblaient exclusivement les membres supérieurs, puisqu'il a été montré qu'ils contribuent à environ 90 % de la

propulsion en crawl [Deschodt et al., 1999]. De même, un profilage L-V en natation a été réalisé en crawl en utilisant un protocole de sprint contre résistance, tel que décrit dans l'étude 2.

Participants

Dix-sept nageurs, majoritairement sprinteurs, ont participé à cette étude : dix hommes (moyenne $\pm$ écart-type, âge : $18,4 \pm 2,5$ ans ; masse corporelle : $70,8 \pm 4,3$ kg ; taille : $183,6 \pm 4,5$ cm) et sept femmes (moyenne $\pm$ écart-type, âge : $18,3 \pm 2,0$ ans ; masse corporelle : $62,9 \pm 5,8$ kg ; taille : $171,7 \pm 6,2$ cm). Les nageurs avaient en moyenne neuf ans d'expérience en compétition. Sur la base de leur meilleure performance en compétition, trois nageurs pouvaient être classés comme "niveau 1", quatre comme "niveau 2", sept comme "niveau 3" et trois comme "niveau 4" [Ruiz-Navarro et al., 2023]. Pour indication, le "niveau 1" correspond à une performance de plus de 875 points World Aquatics et le "niveau 4" à plus de 450 points. L'étude a été menée conformément à la Déclaration d'Helsinki. Après une explication détaillée des objectifs et des modalités, tous les participants, ou leurs parents pour les participants de moins de 18 ans, ont signé un formulaire de consentement éclairé de participation à l'étude. Le protocole de recherche a été approuvé par le Comité de Protection des Personnes Sud Méditerranée 1 et porte le numéro suivant : 2021-A00250-41.

Protocole expérimental

Après un échauffement standardisé de 15 minutes incluant une mise en charge progressive sur les exercices correspondants, les nageurs ont complété un profilage F-V sur trois exercices : le tirage vertical (TV), le développé couché (DC) et le tirage allongé (TA) (Figure 40).



Figure 40 : Illustration des exercices évalués. De gauche à droite : tirage vertical, développé couché, et tirage allongé.

Les nageurs devaient effectuer deux répétitions avec une intention de vitesse maximale sur la phase concentrique du mouvement sur quatre charges incrémentales représentant 20, 40, 60 et 80 % de leur 1 RM. Cette dernière avait été directement évaluée par l'entraîneur une semaine avant la mesure

[W. Kraemer et al., 1995]. Tous les participants ont effectué la première série de répétitions avant de passer à la suivante. Ainsi, la récupération entre les séries était complète (> 5 min). La vitesse de déplacement des charges a été mesurée à l'aide d'un encodeur linéaire (Gymaware, Kinematic Performance Technology, Canberra, Australie) avec un correcteur d'angle intégré afin de déduire la composante verticale de la force et de la vitesse. Il était ainsi possible d'estimer la force produite par chaque sujet à partir de l'accélération a , la gravité (g) et de la masse déplacée (m) (équation 15).

Le profilage L-V dans l'eau a eu lieu quatre heures après le profilage F-V à sec. Le profilage L-V a été effectué en piscine intérieure de 25 mètres. Les nageurs étaient équipés de leur maillot de bain d'entraînement habituel. Ils ont effectué un échauffement standardisé de 20 minutes d'intensité faible à modérée, suivi d'une série de courtes répétitions de sprint. Les nageurs ont ensuite réalisé un profilage L-V en crawl en utilisant un dispositif électromécanique permettant d'ajouter une charge contrôlée au nageur (1080 motion, Vasteras, Suède). Le protocole utilisé correspond à celui décrit dans de précédentes études [Gonjo et al., 2021; Raineteau, Nicolas, Bideau, et al., 2023]. Les nageurs devaient en effet parcourir quatre distances à intensité maximale (25, 25, 20 et 15 m induisant un temps d'effort similaire) contre des charges croissantes (0,1, 2,0, 4,0 et 6,0 kg respectivement) avec une récupération complète entre les efforts (> 5 min).

Analyse des données

Concernant les tests à sec, la répétition la plus rapide sur chaque charge a été sélectionnée pour l'analyse. Les valeurs maximales de vitesse (V_{max}) et de force relative à la masse corporelle (rF_{max}) ont été calculées pour chaque exercice en utilisant la régression linéaire F-V. Pour chaque sujet, la pente de la régression linéaire F-V était calculée comme suit :

$$Pente\ relative\ (\grave{a}\ sec) = -\frac{V_{max}}{rF_{max}} \quad (34)$$

La puissance maximale relative à la masse corporelle (rP_{max}) a été calculée comme suit :

$$rP_{max} = \frac{rF_{max} \cdot V_{max}}{4} \quad (35)$$

Concernant les tests dans l'eau, les vitesses horizontales moyennes pour chaque charge ont été calculées comme décrites par l'équation 28 à partir de la vitesse mesurée par le 1080 Sprint sur trois cycles au milieu du sprint. Les valeurs maximales estimées de vitesse (V_0) et de charge relative à la masse corporelle (rL_0) ont été calculées en utilisant la régression linéaire L-V. La pente de la régression L-V a été calculée comme suit :

$$Pente\ relative\ (dans\ l'eau) = -\frac{V_0}{rL_0} \quad (36)$$

Analyses Statistiques

Une analyse descriptive a été réalisée pour toutes les variables et la normalité de la distribution des données a été vérifiée en utilisant le test de Shapiro-Wilk. Un test T de Welch pour les données normalement distribuées et un test U de Mann-Whitney pour les données non normalement distribuées ont été utilisés pour la comparaison des moyennes en fonction du sexe. Les tailles d'effet g de Hedges concernant la comparaison des valeurs en fonction du sexe ont également été estimées [Hedges, 1981] avec des valeurs seuils de 0,2, 0,5 et 0,8 correspondant à des tailles d'effet faible, modérée et forte, respectivement. La moyenne des vitesses maximales ($\text{Mean } V_{\max}$) et la moyenne des forces maximales relatives à la masse corporelle ($\text{Mean } rF_{\max}$) sur les trois exercices effectués à sec ont été calculées. Des corrélations de Spearman ont été calculées entre les paramètres L-V dans l'eau et les paramètres F-V à sec. Nous avons considéré des valeurs seuils de coefficient de 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 et 0,9 correspondant à des corrélations faibles, modérées, fortes, très fortes et quasi-parfaites, respectivement [Hopkins et al., 2009]. Pour éviter tout effet du sexe dans l'analyse qui concernait la population globale, toutes les données ont été normalisées en centrant les moyennes des femmes sur celles des hommes. Une première régression linéaire multiple a été effectuée pour examiner les relations entre les paramètres moyens à sec ($\text{Mean } V_{\max}$ et $\text{Mean } rF_{\max}$) avec V_0 et rL_0 dans l'eau. Une deuxième régression linéaire multiple a été calculée pour examiner les relations entre $rF_{\max}$ sur chaque exercice à sec avec V_0 et rL_0 dans l'eau. Cela nous a permis d'identifier quel exercice à sec était le plus fortement associé à la nage. Le niveau de significativité utilisé dans cette étude était de 95 % ($p < 0,05$).

Résultats

Les valeurs moyennes de chaque paramètre mesuré dans l'eau et à sec sont présentées dans le Tableau 7. Nous avons observé des valeurs de vitesse et de force plus élevées sur le TV par rapport au TA, et sur le TA par rapport au DC, tant pour les hommes que pour les femmes. Des valeurs plus élevées des paramètres F-V et L-V ont été observées pour les hommes par rapport aux femmes. Il est apparu que les différences liées au sexe sur les paramètres mesurés lors de la nage étaient plus significatives pour V_0 ($r < 0,01$) que pour rL_0 ($r = 0,03$). Les différences entre les pentes des profils L-V dans l'eau des hommes et des femmes n'étaient pas significatives ($p = 0,05$), malgré une forte taille d'effet du sexe. Les plus grandes différences liées au sexe ont été observées sur $rF_{\max}$ et $rP_{\max}$ à l'exception du DC, exercice sur lequel nous avons trouvé une différence significative ($p < 0,01$) et une forte taille d'effet ($g = 1,77$) pour $V_{\max}$.

	Groupe entier Moyenne $\pm$ SD	Hommes Moyenne $\pm$ SD	Femmes Moyenne $\pm$ SD	Comparaison H/F p- value	Taille d'effet g de Hedges
Paramètres charge-vitesse dans l'eau					
V0 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1,75 $\pm$ 0,09	1,80 $\pm$ 0,06	1,66 $\pm$ 0,04	< 0,01	2,55
rL0 (% de la masse corporelle)	28,84 $\pm$ 6,62	31,68 $\pm$ 6,53	24,78 $\pm$ 4,51	0,03	1,13
Pente relative ($-\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$)	-6,28 $\pm$ 1,10	-5,85 $\pm$ 0,87	-6,89 $\pm$ 1,15	0,05	0,99
Paramètres force-vitesse à sec					
Vmax DC ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1,93 $\pm$ 0,13	2,01 $\pm$ 0,10	1,83 $\pm$ 0,09	< 0,01	1,77
rFmax DC ($\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$)	9,70 $\pm$ 1,84	10,33 $\pm$ 1,82	8,80 $\pm$ 1,58	0,09	0,84
Pente relative DC ($-\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$)	-0,21 $\pm$ 0,04	-0,20 $\pm$ 0,03	-0,21 $\pm$ 0,04	0,42	0,35
rPmax DC ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$)	4,71 $\pm$ 1,08	5,20 $\pm$ 1,01	4,02 $\pm$ 0,80	0,02	1,19
Vmax TA ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2,04 $\pm$ 0,28	2,09 $\pm$ 0,32	1,96 $\pm$ 0,18	0,32	0,48
rFmax TA ($\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$)	11,83 $\pm$ 1,70	12,48 $\pm$ 1,68	10,91 $\pm$ 1,33	0,06	0,96
Pente relative TA ($-\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$)	-0,17 $\pm$ 0,03	-0,17 $\pm$ 0,03	-0,18 $\pm$ 0,03	0,41	0,40
rPmax TA ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$)	6,07 $\pm$ 1,46	6,57 $\pm$ 1,60	5,34 $\pm$ 0,88	0,09	0,86
Vmax TV ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2,22 $\pm$ 0,26	2,26 $\pm$ 0,26	2,16 $\pm$ 0,26	0,46	0,36
rFmax TV ($\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$)	14,15 $\pm$ 2,77	15,09 $\pm$ 2,73	12,80 $\pm$ 2,40	0,09	0,84
Pente relative TV ($-\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{N}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$)	-0,16 $\pm$ 0,04	-0,15 $\pm$ 0,03	-0,18 $\pm$ 0,06	0,54	0,52
rPmax TV ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$)	7,84 $\pm$ 1,73	8,53 $\pm$ 1,76	6,85 $\pm$ 1,19	0,04	1,03
Moyenne des paramètres à sec					
Moyenne des Vmax ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2,06 $\pm$ 0,16	2,12 $\pm$ 0,17	1,98 $\pm$ 0,12	0,08	0,88
Moyenne des rFmax ($\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$)	11,89 $\pm$ 1,91	12,63 $\pm$ 1,79	10,84 $\pm$ 1,64	0,06	0,98
Moyenne des rPmax ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$)	6,21 $\pm$ 1,37	6,77 $\pm$ 1,41	5,40 $\pm$ 0,86	0,04	1,06

Tableau 7 : Données descriptives des paramètres évalués à sec et dans l'eau, présentées pour la population générale ainsi qu'en fonction du sexe.

La première régression linéaire multiple, illustrée par la Figure 41, a révélé que la valeur moyenne des forces maximales sur les trois exercices à sec était plus fortement associée avec V₀ ($p < 0,1$) et avec rL₀ ($p < 0,01$) en natation que la valeur moyenne des vitesses maximales à sec.

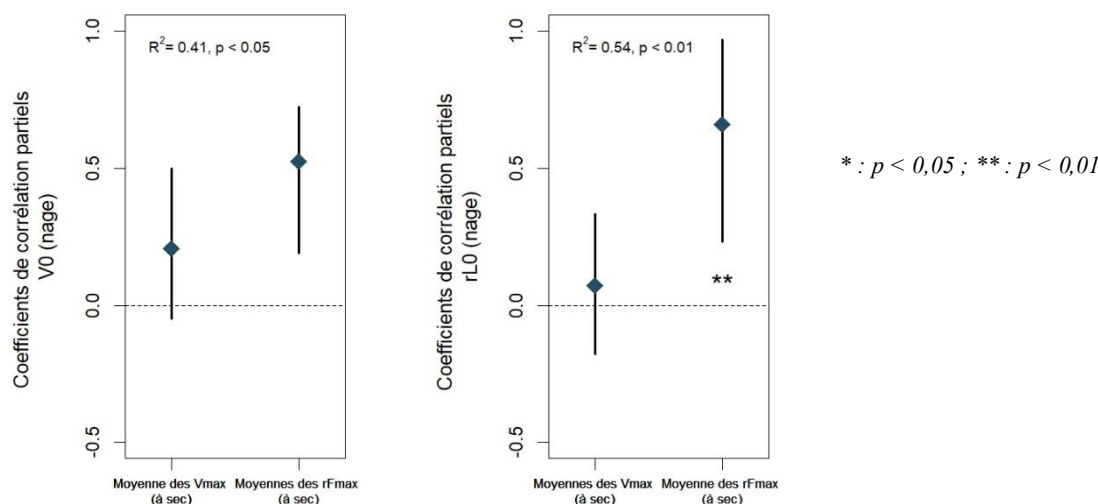


Figure 41 : Coefficients de corrélation partiels et leur intervalle de confiance (95 %) entre les capacités maximales de vitesse et de force à sec avec les résultats des profils charge-vitesse en natation. Les échantillons ont suivi la méthode bootstrap afin d'obtenir les intervalles de confiance.

La seconde régression linéaire multiple, illustrée par la Figure 42, a révélé que la force maximale sur le TV avait l'association la plus forte avec V_0 ($p < 0,05$) et avec rL_0 ($p < 0,05$) en natation par rapport à la force maximale sur les autres exercices.

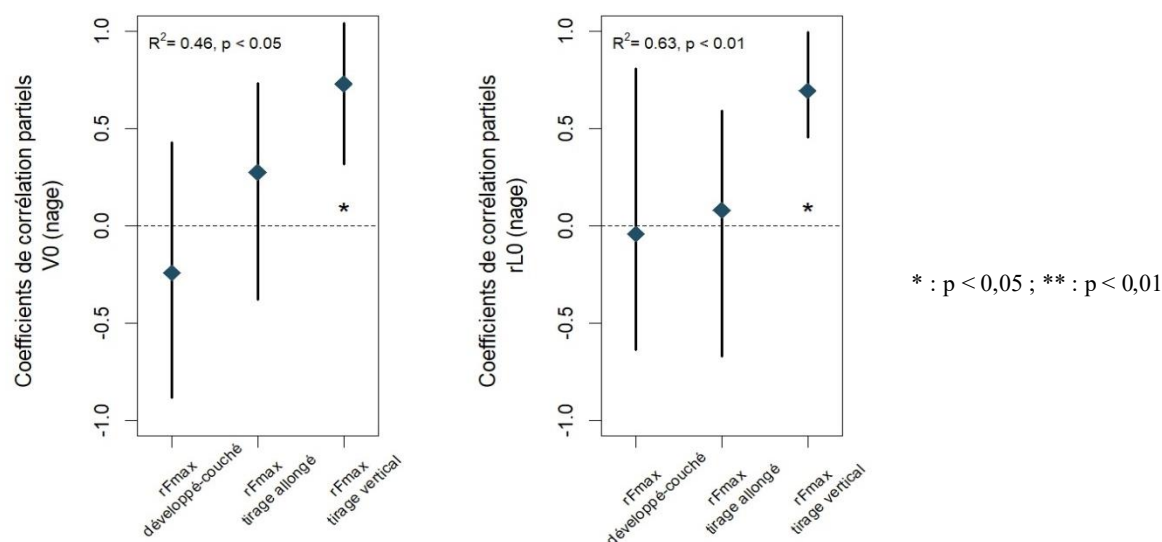


Figure 42 : Coefficients de corrélation partiels et leur intervalle de confiance (95 %) entre les valeurs de force à sec des trois exercices à sec avec les résultats des profils charge-vitesse en natation. Les échantillons ont suivi la méthode bootstrap afin d'obtenir les intervalles de confiance.

Les corrélations entre les paramètres issus des profilages F-V à sec pour chaque exercice et les paramètres issus du profilage L-V en natation sont présentés dans le Tableau 8. Les paramètres à sec étaient plus fortement associés à V_0 qu'à rL_0 . Plus spécifiquement, les paramètres $rF_{\max}$ et $rP_{\max}$ à sec étaient plus fortement associés à V_0 ($r = 0,62$ et $r = 0,63$ respectivement) et rL_0 ($r = 0,55$ et $r = 0,58$ respectivement) que $V_{\max}$ ($r = 0,47$ avec V_0 et $r = 0,34$ avec L_0), à l'exception du DC.

	V0	rL0
Développé couché		
Vmax	0,62**	0,30
rFmax	0,39	0,37
rPmax	0,52*	0,36
Tirage allongé		
Vmax	0,39	0,35
rFmax	0,42	0,46
rPmax	0,54*	0,46
Tirage vertical		
Vmax	0,12	0,13
rFmax	0,67**	0,58*
rPmax	0,66**	0,65**
Moyenne des paramètres à sec		
Moyenne des Vmax	0,47	0,34
Moyenne des rFmax	0,62**	0,55*
Moyenne des rPmax	0,63**	0,58*

*Tableau 8 : Coefficients de corrélation de Spearman entre les paramètres charge-vitesse en natation et les paramètres force-vitesse à sec. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$.*

Discussion

L'objectif de cette étude était d'examiner les relations entre les capacités de force et de vitesse maximales dans l'eau et à sec, en utilisant des exercices de résistance couramment prescrits en préparation physique à sec et le crawl en natation. En offrant une couverture plus large du spectre F-V par rapport aux études précédentes, notre travail a fourni des informations sur les relations entre les capacités F-V à sec et les profils L-V en natation, ce qui n'avait pas été étudié auparavant.

Un des principaux résultats de cette étude a permis de remarquer que la force maximale à sec était plus fortement corrélée aux paramètres mesurés dans l'eau par rapport à la vitesse maximale à sec (Figure 41). À notre connaissance, aucune étude n'a tenté d'associer les capacités F-V à sec avec les paramètres L-V en natation. Cependant, certains auteurs ont exploré des sujets connexes, s'interrogeant sur le paramètre (i.e. force maximale à sec et vitesse maximale à sec) qui exerce la plus grande influence sur la performance en natation [Chalkiadakis et al., 2023; Miras-Moreno et al., 2024; Ruiz-Navarro et al., 2022]. Les résultats mis en évidence dans notre étude étaient globalement en accord avec ceux de ces travaux, bien que certaines différences entre les protocoles puissent être soulignées. Tout d'abord, la présente étude a inclus la mesure de la vitesse maximale en natation, tandis que les études précédentes ont évalué les performances chronométriques sur diverses distances. Par ailleurs, la présente étude a inclus des mesures F-V sur trois exercices différents à sec, tandis que les études précédentes mesuraient les capacités des nageurs uniquement sur un exercice à sec (DC, tractions et TA, respectivement). Les différences entre les protocoles utilisés ont donc pu conduire à des divergences de résultats par rapport à notre étude. Par exemple, certains auteurs [Sorgente et al., 2023] ont examiné la relation entre la force et la vitesse mesurées sur des tractions et la performance sur différentes distances et styles de nage. Ils ont montré que l'association de la vitesse à sec avec les performances en natation était plus forte comparé à la force à sec, ce qui est en contradiction avec nos résultats. Ces différences peuvent être attribuées au fait que la force et la vitesse étaient mesurées avec une unique charge rendant impossible l'estimation des capacités de force et de vitesse maximales. De manière plus générale, l'existence d'une relation forte entre la force maximale à sec et les paramètres mesurés dans l'eau selon nos résultats, n'est pas surprenante au regard de la relation quadratique entre la traînée active et la vitesse, ce qui peut impliquer un niveau significatif de force propulsive (et probablement de force totale) à des vitesses plus élevées [Kolmogorov & Duplishcheva, 1992].

Alors que la relation entre la force ou la vitesse à sec avec les paramètres in situ fait l'objet de débat, la forte association entre la puissance maximale et la performance in situ donne lieu à un accord presque unanime dans la littérature scientifique [Haff & Nimphius, 2012]. Néanmoins, peu d'études appliquées à la natation ont mis en évidence des différences d'association entre la force maximale et la puissance maximale à sec avec la performance en natation [Chalkiadakis et al., 2023; Garrido, Marinho, Barbosa, et al., 2010; Miras-Moreno et al., 2024]. Cependant, cette relation a été explorée sur des sprints

lors d'activités terrestres parmi des athlètes de différents sports, soulignant l'importance d'évaluer préférentiellement la puissance maximale par rapport à la force maximale lors de la mise en relation avec la performance en sprint [Loturco et al., 2019; Singh et al., 2021]. De même, d'autres chercheurs [Junge et al., 2021] ont examiné les relations entre les profils F-V lors d'un squat jump, d'un hip-thrust et d'un sprint. Ces auteurs ont révélé une association plus forte entre les puissances et forces maximales mesurées sur les exercices de résistance avec la vitesse maximale en sprint, par rapport aux vitesses maximales mesurées sur les exercices de résistance. Les mêmes auteurs ont également souligné que les paramètres de force et de vitesse mesurés lors d'exercices de résistance et lors de sprint représentent des capacités différentes. Plus spécifiquement, les exercices de résistance n'impliquent que des membres spécifiques, tandis que le sprint en natation ou lors d'activités terrestres implique un mouvement du corps complet, induisant le déplacement du centre de gravité.

Afin d'approfondir l'investigation des résultats, des distinctions ont été faites entre les exercices de préparation physique (DC, TA, TV) concernant leurs relations avec les paramètres L-V en natation. Plus spécifiquement, des relations fortes ont été trouvées entre la force maximale mesurée sur le TV et les paramètres aquatiques. Ce résultat est en accord avec les conclusions d'autres études [Morouço, Neiva, et al., 2011; Pérez-Olea et al., 2018]. En effet, cela peut se justifier par l'implication de masse musculaire similaire entre les deux modalités de mesure, le grand dorsal étant principalement impliqué à la fois sur la phase de propulsion en crawl et sur le TV [Doma et al., 2013; Pink et al., 1991]. Le muscle grand pectoral est également fortement impliqué sur la nage en crawl et le DC. Cependant, nous n'avons trouvé qu'une faible association entre la force produite sur cet exercice et les paramètres mesurés dans l'eau. En outre, la vitesse maximale sur cet exercice (DC) semblait être plus fortement liée aux paramètres mesurés dans l'eau par rapport à la vitesse maximale mesurée sur les autres exercices. Par conséquent, il semblerait que malgré la spécificité des masses musculaires impliquées, les conditions sous lesquelles l'exercice de DC est effectué le différencient des exercices de tirage (TA et TV). En effet, les exercices de poussée et de tirage semblent être distingués par une sollicitation de groupes musculaires aux architectures différentes et composés de bras de levier distincts [Sánchez-Medina et al., 2013]. Une autre raison possible à la particularité du DC est la différence significative de vitesse maximale entre les hommes et les femmes sur cet exercice, qui n'a pas été observée sur les autres exercices. En effet, la vitesse maximale sur le DC est le paramètre comportant la différence la plus significative entre les sexes, ainsi que la plus grande taille d'effet liée au sexe.

La présente étude a également montré que les paramètres de force, de vitesse et de puissance à sec avaient une association plus forte avec V_0 qu'avec rL_0 dans l'eau (Tableau 8). Un point d'intérêt qui peut partiellement expliquer notre résultat réside dans les implications biomécaniques de la nage semi-attachée (lors de la nage avec des charges élevées) comparée à la nage libre. En effet, pour obtenir la valeur du paramètre rL_0 , la relation L-V est extrapolée jusqu'à atteindre une charge à vitesse nulle. Cette

extrapolation est réalisée en utilisant des points de mesure incluant une charge relativement élevée (c'est-à-dire 6 kg). Cependant, plusieurs études précédentes ont montré que la nage libre à des vitesses élevées représente un meilleur indicateur de performance que la nage attachée [Ruiz-Navarro et al., 2022], d'autres auteurs montrant même une plus grande perte de puissance dans la masse d'eau accélérée lors de la nage attachée [Wei et al., 2022]. Ces résultats pourraient donc partiellement expliquer pourquoi les paramètres à sec sont moins liés à rL_0 qu'à V_0 . Cette observation apparaît novatrice car peu d'études ont comparé les relations des variables à sec avec la vitesse maximale et la charge maximale dans l'eau. Certains auteurs ont néanmoins identifié une tendance similaire, montrant une relation plus forte de la puissance mesurée sur le TV avec la vitesse de nage sur 50 m, qu'avec la force moyenne telle que mesurée sur de la nage attachée [Morouço, Neiva, et al., 2011]. Cependant, des recherches supplémentaires s'avèrent nécessaires, d'autant que certaines études ayant examiné des paramètres similaires ont montré des différences liées au sexe dans ces relations [Ruiz-Navarro et al., 2022].

Dans notre étude, bien que nous n'ayons observé aucune différence significative entre les hommes et les femmes concernant certaines variables à sec, un effet lié au sexe (avec des valeurs plus faibles pour les femmes) a été observé pour d'autres variables (principalement rP_{max}). Aucune différence significative ou taille d'effet importante liée au sexe concernant les pentes des profils F-V à sec n'a été observée. En revanche les distinctions liées au sexe semblent se différencier en fonction des exercices de préparation physique testés. En effet, les résultats de notre étude concernant le DC étaient en phase avec les résultats d'une étude précédente qui a observé des différences liées au sexe sur la puissance et la vitesse maximale mesurées au DC mais pas sur la force maximale ni sur le ratio F-V [Nikolaidis, 2012]. Cependant, nos résultats concernant le TV et le TA semblaient aller dans la direction opposée comparés au DC, car la force présentait une différence plus marquée entre les sexes que le paramètre de vitesse. Comme mentionné précédemment, les résultats singuliers concernant le DC peuvent être expliqués par la spécificité des mouvements de poussée par rapport aux mouvements de tirage. Concernant les paramètres issus des profilages dans l'eau, les principaux résultats ont révélé des valeurs significativement plus élevées de V_0 et rL_0 chez les hommes par rapport aux femmes. Aucune différence significative n'a été trouvée concernant la pente des profils L-V, mais des fortes tailles d'effet pour les trois variables dans l'eau ont été observées. En effet, la différence de pente nous a fait remarquer que les profils des femmes étaient plus orientés vers des qualités de vitesse que ceux des hommes. À notre connaissance, les différences liées au sexe concernant les profils L-V en natation n'ont pas encore été étudiées. En comparaison avec d'autres sports, certains auteurs ont étudié les différences de profils F-V mesurés lors de sprints chez des joueurs de football selon le sexe et ont mis en évidence des résultats opposés : les profils des hommes étaient davantage orientés vers la vitesse que ceux des femmes [Devismes et al., 2021]. Cette spécificité des nageuses (profils F-V plus orientés vers la vitesse par rapport aux nageurs) pourrait en partie être expliquée par un couple de redressement plus faible par rapport aux hommes, ainsi qu'une composition corporelle qui pourrait favoriser la conservation de la

vitesse [Zamparo et al., 1996]. Une autre hypothèse aurait pu concerner une différence d'efficacité propulsive liée au genre. Toutefois, des précédentes études ne montrent pas de tels résultats, l'efficacité restant identique pour les hommes et les femmes d'âges similaires [Zamparo, 2006]. Les différences de force (sous entendues par les profils des femmes plus orientés vers la vitesse) pourraient également être expliquées par les différences de masses musculaires, moins importantes chez les nageuses comparées aux nageurs [Siders et al., 1993; Zera et al., 2022].

Cette étude a permis de fournir des informations détaillées quant aux relations entre les paramètres F-V à sec et L-V en natation, ce qui pourrait conduire à une meilleure compréhension des mécanismes de transfert d'un environnement à l'autre (de la préparation physique à sec vers la nage). Cependant, le lien entre les paramètres mesurés et la performance aurait pu être plus explicite considérant des résultats de course de sprint en compétition officielle, ce qui pourrait constituer une perspective d'amélioration de ces travaux. Néanmoins, certains des paramètres évalués, en particulier V_0 , représentaient déjà une forme d'évaluation de la performance. De plus, les liens entre les paramètres L-V en natation et la performance en sprint en papillon et en nage libre a été démontrée dans des études récentes [Gonjo et al., 2020, 2021; Raineteau, Nicolas, Bideau, et al., 2023].

Apports de cette étude pour la thèse

Nos résultats ont mis en lumière l'importance de prendre en compte les paramètres de force et de puissance dans les évaluations à sec, puisque ces derniers semblent avoir une corrélation plus forte avec les paramètres mesurés en natation par rapport à la vitesse à sec. Ainsi, l'intégration des mesures de force, de vitesse et de puissance provenant à la fois de l'environnement aquatique et de la préparation physique peut offrir une compréhension plus complète des profils et facteurs de performance en natation. Le TV s'est notamment révélé être un exercice crucial dans l'entraînement en préparation physique, caractérisé par des paramètres de force et de puissance montrant une forte relation avec les paramètres L-V de la nage. Cela souligne l'importance des exercices d'entraînement ciblés dans un but d'amélioration de la performance en natation en renforçant les groupes musculaires spécifiques impliqués dans la propulsion. Enfin, les valeurs de force et de vitesse peuvent différer de manière significative entre les sexes dans les deux environnements. Bien que des profils F-V à sec similaires (plus particulièrement les pentes) aient été observés chez les hommes et les femmes, il semblerait donc important de prendre en compte les différences liées au sexe lors de l'interprétation des profils L-V.

Etude n°4

Effet d'un entraînement en force maximale en préparation physique sur les profils force-vitesse à sec ainsi que sur les profils charge-vitesse et les paramètres de traînée active dans l'eau

Résumé

Introduction : Cette étude visait à évaluer l'impact d'un entraînement en force maximale à sec sur l'évolution simultanée des paramètres F-V à sec et L-V en natation.

Méthodes : Dix-huit nageurs de niveau régional ont été répartis en deux groupes pour une période d'entraînement de six semaines. L'entraînement du groupe contrôle (GC) s'est concentré exclusivement sur l'entraînement en natation tandis que le groupe expérimental (GE) a suivi en plus un programme de développement de la force maximale sur les exercices de développé couché (DC) et de tirage vertical (TV). Ce programme comprenait deux séances d'une heure par semaine pendant cinq semaines, suivi d'une semaine sans entraînement à sec. Les mesures pré- et post-intervention incluaient des profilages F-V sur le DC et le TV, ainsi qu'un profilage L-V en crawl avec estimation des paramètres hydrodynamiques.

Résultats : Les principaux résultats ont montré une amélioration de la force maximale hors de l'eau pour les deux groupes, avec des améliorations légèrement supérieures pour le GE. Des différences notables entre les évolutions des paramètres mesurés sur les exercices de DC et de TV ont été constatées pour les deux groupes. Concernant les profils L-V en natation, les résultats ont indiqué que les améliorations de la force (L_0) pour le GE étaient plus importantes que les améliorations de la vitesse (V_0), tandis que les améliorations de la vitesse pour le GC étaient plus significatives que les améliorations de la force.

Conclusion : Ces résultats suggèrent que l'entraînement en force maximale à sec peut permettre d'améliorer les capacités spécifiques de force et de vitesse des nageurs. Cette étude a notamment mis en lumière les interactions de l'entraînement de la force à sec avec l'entraînement en natation, illustrées par exemple par le délai nécessaire à l'apparition de bénéfices en termes de performance, ainsi que par l'impact sur les paramètres de traînée. Un suivi régulier et concomitant des paramètres F-V à sec, L-V dans l'eau et des paramètres hydrodynamiques semble pertinent pour quantifier ces effets et adapter les entraînements en conséquence.

Introduction

Les précédentes études de ce travail de thèse ont permis de montrer que les qualités de force maximale à sec telles que mesurées sur des exercices communément prescrits lors d'entraînement en préparation physique en natation étaient particulièrement liées aux paramètres issus du profilage L-V en crawl (L_0 et V_0), présentant eux même des liens forts avec la performance sur différentes distances (étude n°3). De même, les pratiques des préparateurs physiques en natation montrent que le développement de la force maximale est un des objectifs privilégiés de la préparation des nageurs, devant le développement de la puissance maximale. Il semblait alors opportun d'évaluer l'effet d'un programme de développement de la force maximale sur les paramètres étudiés précédemment, c'est-à-dire les paramètres issus du profilage F-V à sec et C-V dans l'eau.

Comme décrit lors de la revue de littérature (cf. section 3 du cadre théorique), la majorité des études portant sur l'impact de l'entraînement de force maximale hors de l'eau sur la performance en natation ont rapporté des améliorations en sprint [Girolid et al., 2007, 2012; Schumann et al., 2020; Strass, 1988] et, dans une moindre mesure, sur des épreuves de distance mixtes [Schumann et al., 2020]. Cependant, les mécanismes sous-jacents à ces améliorations restent insuffisamment compris lorsque l'analyse se limite à l'évaluation des performances. Par conséquent, d'autres recherches se sont intéressées aux effets de différents types d'entraînement hors de l'eau, en particulier ceux basés sur la force maximale, sur la production de force dans l'eau, en utilisant souvent des méthodes de nage attachée ou semi-attachée pour évaluer la performance [Aspenes et al., 2009; Gatta et al., 2014; Norberto et al., 2023; Sadowski et al., 2012]. Bien que ces dernières études aient fourni des informations précieuses en termes d'applications pratiques, plusieurs limites méritent d'être soulignées. En particulier, toutes n'ont pas intégré d'évaluations à sec avant et après l'entraînement, ce qui semble pourtant essentiel pour établir un lien entre les changements observés sur les paramètres à sec et les améliorations des paramètres évalués dans l'eau. De plus, lorsque de telles évaluations ont été incluses, les tests n'étaient pas toujours spécifiques aux exercices de préparation physique prescrits dans le cadre du protocole. Enfin, la diversité des exercices inclus dans certains programmes d'entraînement rendait difficile la détermination des exercices spécifiques ayant contribué de manière significative aux améliorations observées, tant sur les paramètres à sec qu'en natation.

L'évaluation et le suivi des capacités ciblées par les protocoles d'entraînement permettent de pallier certaines limites abordées précédemment afin d'optimiser les effets de ces protocoles, en particulier par l'individualisation et la régulation des contenus de l'entraînement [Helms et al., 2020]. Dans cette optique, le profilage F-V est une approche largement utilisée pour évaluer les paramètres de force, de vitesse et de puissance maximale à sec [Baena-Raya et al., 2021]. En natation, une méthodologie similaire, le profilage L-V, basé sur un protocole de nage semi-attachée, est utilisé pour estimer à la fois les forces propulsives et résistives [Gonjo & Olstad, 2022; Olstad et al., 2020].

Ainsi, la présente étude visait à évaluer l'impact d'un entraînement en préparation physique à sec axé sur la force maximale sur l'évolution simultanée de certains facteurs de performance en natation, tant à sec ($F_{\max}$, $V_{\max}$, $P_{\max}$) que dans l'eau (L_0 , V_0 , D_a , K_a). Contrairement aux études précédentes qui ont mis en œuvre des interventions d'entraînement relativement générales, la présente étude a ciblé spécifiquement deux exercices couramment pratiqués en préparation physique à sec, le TV et le DC, lesquels ont été évalués avant et après l'intervention. En outre, la littérature existante indique que des modifications des paramètres propulsifs peuvent avoir un impact sur les facteurs hydrodynamiques [Gatta et al., 2018; Toussaint et al., 2000]. Par conséquent, de manière complémentaire aux paramètres issus des profils F-V et L-V, nous avons également quantifié l'évolution des paramètres de traînée suite au programme d'entraînement à sec, en utilisant un protocole de nage semi-attachée.

Méthodes

Participants

Dix-huit nageurs de niveau régional, huit filles et dix garçons (âge : $14,9 \pm 1,3$ ans), ont participé à cette étude. Tous les participants étaient membres du même groupe d'entraînement et étaient licenciés dans un même club affilié à la FFN. Au cours de la saison précédant l'étude, les entraînements à sec du groupe étaient essentiellement axés sur du gainage et des exercices au poids du corps tels que des pompes, des tractions et des squats. Ces nageurs n'avaient aucune expérience en travail de la force. Tous les participants ont réalisé une séance d'entraînement par semaine pendant un mois avant le début de l'étude pour se familiariser avec les exercices de préparation physique. Cette phase initiale a été réalisée uniquement à l'aide de barres de différents poids (de 7,5 à 20 kg) pour le DC et de poids légers (de 10 à 20 kg) pour le TV. Les nageurs ont ensuite été répartis en deux groupes. Le groupe contrôle (GC, hommes $n=4$, femmes $n=4$) a suivi un programme d'entraînement en natation, tandis qu'un programme d'entraînement axé sur la force maximale à sec a été intégré en complément de l'entraînement en natation pour le groupe expérimental (GE, hommes $n=5$, femmes $n=5$). Les caractéristiques des deux groupes sont présentées dans le Tableau 9. Seuls les nageurs exempts de blessures et ayant participé à l'ensemble des séances d'entraînement à sec ont été retenus pour cette étude. Après une explication verbale, tous les nageurs ont signé un consentement éclairé afin de participer. L'étude a été réalisée conformément à la Déclaration d'Helsinki et a été approuvée par un comité de protection à la personne (numéro 2021 - A00250 - 41).

	Groupe expérimental	Groupe contrôle
	Moyenne $\pm$ Ecart-type (intervalle)	
Taille (cm)	169,8 $\pm$ 12,8 (153 – 192)	167,0 $\pm$ 10,8 (148 – 180)
Masse corporelle (kg)	61,9 $\pm$ 11,0 (50 – 87)	55,6 $\pm$ 9,3 (42-70)
Age (année)	16,0 $\pm$ 0,7 (15,2 – 16,9)	14,2 $\pm$ 0,9 (12,8 – 15,8)
Meilleure performance sur 50 NL (s)	28,83 $\pm$ 2,97 (24,52 – 34,67)	31,26 $\pm$ 2,03 (29,01 – 34,27)

Tableau 9 : Caractéristiques des 18 participants des groupes contrôle et expérimental.

Procédure d'intervention en préparation physique

Cette étude consistait à évaluer les effets d'un programme d'entraînement à sec pour le GE. L'étude a débuté en octobre, après un cycle initial d'entraînement en début de saison suivi par tous les nageurs. Le GE a suivi un programme d'entraînement en force maximale de six semaines, comprenant deux séances d'entraînement à sec par semaine pendant cinq semaines suivies d'une semaine sans entraînement à sec avant l'évaluation post-intervention. L'entraînement en force maximale à sec consistait en cinq séries de cinq répétitions à 85 % de la charge maximale (1 RM) de chaque nageur, évaluée préalablement à l'intervention. Trois minutes de récupération étaient imposées entre les séries. Cet entraînement correspond à un programme type pour le développement de la force maximale [Amara, Crowley, et al., 2021; Haycraft & Robertson, 2015]. Les nageurs du GE ont accompli ce programme sur deux exercices couramment prescrits par les préparateurs physiques : le DC et le TV. Ces exercices ont été choisis en raison de la similarité des activations musculaires entre ces mouvements et les mouvements retrouvés lors de la nage en crawl. Ce choix était également soutenu par les résultats de recherches antérieures montrant leur impact potentiel sur la performance [Crowe et al., 1999; Pollock et al., 2019; Raineteau et al., 2024].

Le GC a suivi un programme d'entraînement en natation identique à celui du GE, complété par une séance hebdomadaire de préparation physique générale incluant des exercices de gainage et des mouvements au poids du corps tels que des pompes et des squats. Afin de garantir une charge d'entraînement en natation similaire entre les groupes, nous avons soigneusement surveillé des variables clés de l'entraînement. En particulier, la durée totale de l'entraînement en natation (en minutes) et la difficulté perçue de l'effort (RPE) évaluée à l'aide de l'échelle de Borg modifiée CR-10 [Foster et al., 2001], ont été recueillies après chaque séance de natation [Psycharakis, 2011].

Deux sessions de tests ont été conduites avant et après cette intervention. Une familiarisation avec la procédure de profilage a eu lieu deux semaines avant la session de test préliminaire. Les sessions de test comprenaient chacune une partie d'évaluation à sec et une partie d'évaluation en natation.

Mesures ex situ

Les tests à sec ont été effectués en début d'après-midi, à la fois pour l'évaluation pré-intervention et post-intervention, afin de minimiser l'influence des variations circadiennes sur les performances physiques et de garantir la comparabilité des données entre les deux phases de l'étude [Ayala et al., 2021]. Après un échauffement standardisé de 20 minutes comprenant des sollicitations musculaires et une mobilisation complète des articulations, les nageurs ont réalisé un profilage F-V sur les deux exercices prescrits dans le cadre de l'entraînement en force maximale (DC et TV). Le protocole ainsi que les méthodes de traitement des données étaient similaires à ceux décrits dans l'étude précédente.

Mesures in situ

Deux heures après la fin des tests à sec avait lieu la session de test en natation dans un bassin intérieur de 25 m. La session comprenait un échauffement de 20 minutes à intensité faible/modérée incluant des efforts continus avec des instructions techniques (éducatifs), des exercices de dissociation de la propulsion des membres supérieurs/inférieurs, et un effort progressif jusqu'à un sprint très court. Le sprint réalisé à la fin de l'échauffement était filmé avec une caméra GoPro Hero8 (GoPro, Inc., San Mateo, Californie, États-Unis) dans une résolution de 1080p et à 60 images par seconde dans le plan frontal pour chaque participant. Concernant le protocole de profilage L-V, il était demandé aux nageurs de parcourir quatre distances (25 m ; 25 m ; 20 m ; 15 m) le plus rapidement possible contre des charges incrémentales. Les charges étaient de 1 kg concernant le premier passage et correspondaient à 10 % de la masse corporelle (m) du nageur concernant le dernier passage [Gonjo et al., 2024]. Les deux charges intermédiaires étaient ensuite calculées afin d'assurer l'imposition de charges uniformément réparties sur l'intervalle allant de 1 kg à 10% du poids de corps :

$$Charge\ n^{\circ}2 = 1 + \frac{1}{3} (0,1 \cdot m - 1) \quad (37)$$

$$Charge\ n^{\circ}3 = 1 + \frac{2}{3} (0,1 \cdot m - 1) \quad (38)$$

Comme décrit dans les précédents travaux, les vitesses horizontales moyennes de chaque passage étaient calculées puis les valeurs maximales théoriques de charge (L_0) et de vitesse (V_0) en crawl ont été estimées en utilisant la régression linéaire L-V. La pente de cette régression a été obtenue selon l'équation 23. De plus, sur la base de la relation linéaire entre la force externe appliquée par le système à résistance motorisée 1080 sprint et la vitesse de déplacement, la traînée active a été estimée en utilisant la méthode SPM [Gonjo & Olstad, 2022; Kolmogorov, 2023]. En effet, cette méthode suppose que la puissance développée par les nageurs est maximale et identique entre la condition de nage libre et la condition de nage avec l'application d'une charge externe [Kolmogorov &

Duplishcheva, 1992]. La relation L-V est donc utilisée pour déterminer la force correspondant à une diminution de la vitesse de 15 % [Keller et al., 2024] comme décrit précédemment selon l'équation 24 (cf. cadre théorique section 4). Le coefficient de traînée spécifique à la vitesse (K_a) a ensuite été obtenu comme suit [Cortesi et al., 2024] :

$$K_a = \frac{D_a}{V_0^2} \quad (39)$$

Enfin, la vidéo du sprint réalisé en fin d'échauffement, combinée à V_0 estimée pour chaque nageur, permettait d'obtenir une estimation de leur efficacité propulsive (η_p) selon l'équation 32 (cf. Étude n°2).

La Figure 43 présente l'ensemble de la procédure expérimentale et les paramètres mesurés lors des évaluations pré- et post-intervention.

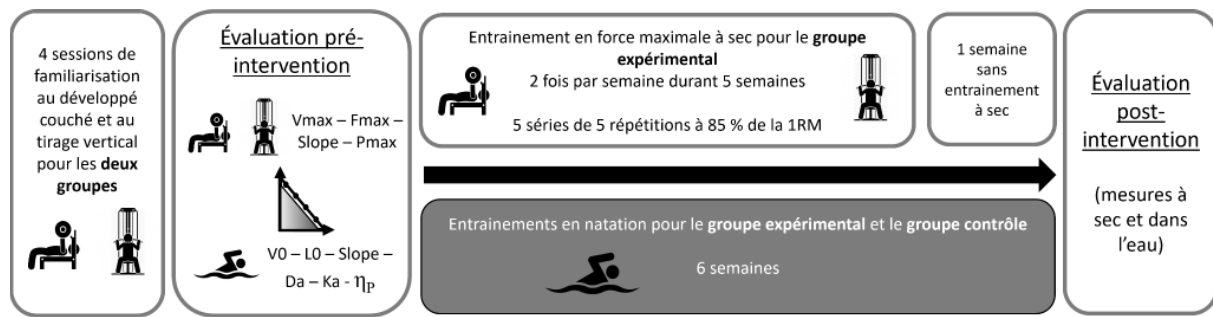


Figure 43 : Vue d'ensemble du protocole expérimental.

Analyse statistique

La distribution normale des données de toutes les variables décrites précédemment a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Un test T de Welch a été utilisé pour les données normalement distribuées, et le test de Mann-Whitney pour les données non distribuées normalement, afin de comparer les conditions avec une estimation de la taille de l'effet [Hedges, 1981]. Nous avons pris en compte les valeurs seuils de taille d'effet de 0,2, 0,5 et 0,8 correspondant respectivement à des tailles d'effet faibles, modérées et fortes [Cohen, 1988]. Par la suite, une ANOVA à deux facteurs - groupe (GE et GC) x condition (avant et après intervention) - a été réalisée via R-Studio pour estimer l'interaction entre le programme d'entraînement en force maximale et les résultats des deux sessions de mesure.

Résultats

Le Tableau 10 présente les évolutions des paramètres mesurés sur les exercices en préparation physique et en natation pour chaque groupe après le programme d'entraînement de six semaines. Concernant les résultats obtenus sur les exercices de préparation physique à sec, F_{max} et P_{max} sur le DC se sont améliorées de manière significative pour les deux groupes : +11,18 % ($p < 0,01$) pour le GE et

+9,08 % ($p<0,01$) pour le GC concernant $F_{\max}$, et une amélioration de la $P_{\max}$ de +6,81 % ($p<0,01$) pour le GE et de +9,08 % ($p=0,04$) pour le GC. La $F_{\max}$ a progressé davantage pour le GE par rapport au GC, tandis que la $P_{\max}$ a montré une amélioration plus importante dans le GC que dans le GE. Ces tendances ont également été observées pour la $F_{\max}$ et la $P_{\max}$ sur l'exercice de TV, bien que les résultats ne soient pas significatifs. Nous avons également observé une tendance à la diminution de $V_{\max}$ sur les deux exercices à sec (-3,96 %, $p=0,15$ sur le DC et -2,45 %, $p=0,09$ sur le TV) pour le GE. Des tailles d'effet faibles uniquement ont été observées, à l'exception de la pente F-V sur le DC, qui présentait une taille d'effet modérée.

Concernant les résultats obtenus sur les mesures dans l'eau, nous avons observé une amélioration significative de V_0 pour le GC, tandis que des améliorations plus faibles et non significatives ont été rapportées pour le GE. Nous avons également remarqué une tendance à l'amélioration de L_0 pour le groupe expérimental. K_a a montré une tendance à la diminution pour le GC, alors qu'aucun changement notable n'a été observé pour le GE après le programme de six semaines. Enfin, des gains significatifs de masse corporelle ont été observés pour les deux groupes : +2,05 % ($p=0,01$) pour le GE et +1,83 % ($p=0,02$) pour le GC.

Variables		Groupes	Pre-test Moyenne $\pm$ Ecart-type	Post-test Moyenne $\pm$ Ecart-type	Δ (%)	p (pré-test / post-test)	Tailles d'effet (d de Cohen)
A SEC	Vmax développé couché ($m \cdot s^{-1}$)	GE	1,78 $\pm$ 0,15	1,71 $\pm$ 0,18	-3,96	0,15	0,42
		GC	1,65 $\pm$ 0,22	1,66 $\pm$ 0,12	0,42	0,46	0,04
	Fmax développé couché (N)	GE	515 $\pm$ 206	572 $\pm$ 213	11,18	<0,01**	0,27
		GC	383 $\pm$ 131	419 $\pm$ 133	9,54	<0,01**	0,28
	Pmax développé couché (W)	GE	234 $\pm$ 109	250 $\pm$ 111	6,81	<0,01**	0,14
		GC	159 $\pm$ 65	174 $\pm$ 57	9,08	0,04*	0,24
	Pente développé couché ($m \cdot s^{-1} \cdot N^{-1}$) $\cdot 10^2$	GE	-0,39 $\pm$ 0,13	-0,33 $\pm$ 0,10	-15,57	0,04*	0,53
		GC	-0,47 $\pm$ 0,17	-0,43 $\pm$ 0,14	-8,55	0,05	0,26
	Vmax tirage vertical ($m \cdot s^{-1}$)	GE	1,80 $\pm$ 0,11	1,75 $\pm$ 0,14	-2,45	0,09	0,21
		GC	1,68 $\pm$ 0,21	1,71 $\pm$ 0,26	1,86	0,35	0,26
	Fmax tirage vertical (N)	GE	663 $\pm$ 281	686 $\pm$ 255	3,36	0,10	0,08
		GC	533 $\pm$ 164	537 $\pm$ 158	0,83	0,41	0,03
	Pmax tirage vertical (W)	GE	304 $\pm$ 144	307 $\pm$ 137	0,97	0,34	0,02
		GC	228 $\pm$ 95	233 $\pm$ 91	1,98	0,18	0,05
DANS L'EAU	V0 ($m \cdot s^{-1}$)	GE	1,54 $\pm$ 0,18	1,56 $\pm$ 0,19	1,48	0,13	0,12
		GC	1,35 $\pm$ 0,16	1,41 $\pm$ 0,14	4,83	0,01*	0,44
	L0 (kg)	GE	12,1 $\pm$ 4,2	12,9 $\pm$ 4,8	6,03	0,09	0,16
		GC	10,6 $\pm$ 3,0	10,8 $\pm$ 2,2	2,33	0,32	0,09
	Slope ($m \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$)	GE	-0,13 $\pm$ 0,03	-0,13 $\pm$ 0,02	1,41	0,36	0,08
		GC	-0,14 $\pm$ 0,02	-0,13 $\pm$ 0,02	-3,27	0,33	0,21
	Da (N)	GE	57,9 $\pm$ 16,7	60,6 $\pm$ 18,8	4,65	0,08	0,15
		GC	51,5 $\pm$ 11,9	52,8 $\pm$ 9,2	2,52	0,24	0,12
	Ka ($kg \cdot m^{-1}$)	GE	24,3 $\pm$ 4,0	24,5 $\pm$ 3,3	0,78	0,42	0,05
		GC	28,8 $\pm$ 6,8	26,4 $\pm$ 1,7	-8,29	0,13	0,48
	ηP (% Wt)	GE	42,1 $\pm$ 2,8	41,4 $\pm$ 3,9	-1,62	0,32	0,20
		GC	42,3 $\pm$ 5,1	40,6 $\pm$ 3,9	-3,81	0,09	0,35

Tableau 10 : Evolutions entre les mesures pré- et post-intervention des différents paramètres évalués sur les deux groupes.

Le Tableau 11 présente la comparaison des évolutions des paramètres mesurés à sec et en natation entre le GE et le GC. Aucune différence significative d'évolution entre les groupes pour toutes les variables mesurées n'a été rapportée. Des tailles d'effet faibles uniquement ont été relevées, à l'exception de V_0 pour lequel la taille de l'effet était modérée. L'ANOVA a révélé des effets de groupe pour certaines variables ($F_{\max}$ DC, $P_{\max}$ DC, pente DC, V_0 , K_a), mais sans effet significatif d'interaction entre les facteurs de groupe et de condition.

	Variables	Valeur p des différences entre les moyennes des Δ des GE & GC	Tailles d'effet des différences entre les moyennes des Δ des GE & GC	ANOVA		
A SEC	Vmax DC	0,21	0,41	Groupe	2,62	0,12
				Condition	0,39	0,54
				Interaction	0,45	0,51
	Fmax DC	0,27	0,28		5,61	0,02*
					0,65	0,43
					0,03	0,86
	Pmax DC	0,27	0,33		6,02	0,02*
					0,25	0,62
					0,00	0,98
	Slope DC	0,25	0,32		4,21	< 0,05*
					1,25	0,27
					0,17	0,68
	Vmax TV	0,20	0,45		1,73	0,20
					0,03	0,86
					0,38	0,55
Fmax TV	0,22	0,39		3,34	0,08	
				0,04	0,85	
				0,01	0,91	
Pmax TV	0,50	< 0,01		3,30	0,08	
				0,01	0,93	
				0,00	0,99	
Slope TV	0,17	0,53		2,60	0,12	
				0,12	0,73	
				0,09	0,77	
DANS L'EAU	V0	0,07	0,76		8,64	< 0,01**
					0,54	0,47
					0,14	0,71
	L0	0,40	0,13		2,02	0,17
					0,17	0,69
					0,04	0,85
	Pente	0,30	0,27		2,03	0,16
					0,02	0,89
					0,18	0,68
	Da	0,42	0,11		1,95	0,17
					0,17	0,68
					0,02	0,89
	Ka	0,17	0,48		4,61	0,04*
					0,43	0,52
					0,77	0,39
ηP	0,32	0,22		0,04	0,84	
				0,69	0,41	
				0,12	0,73	

Tableau 11 : Différences entre le groupe expérimental (GE) et le groupe contrôle (GC) des évolutions entre les mesures pré- et post-intervention.

Discussion

La présente étude visait à évaluer l'impact d'un entraînement en force maximale à sec sur l'évolution simultanée des paramètres F-V à sec et L-V en natation. Les principaux résultats de cette étude ont révélé une amélioration de la force maximale à sec pour les deux groupes, avec des gains légèrement plus prononcés dans le GE. Inversement, une tendance à la diminution de la vitesse

maximale à sec a été remarquée pour le GE, alors qu'aucune baisse similaire n'a été observée pour le GC. Des différences dans l'évolution des paramètres à sec entre les exercices de DC et de TV ont également été observées pour les deux groupes. En ce qui concerne le profil L-V en natation, les résultats indiquent que le GE a montré des améliorations plus importantes de L_0 par rapport à V_0 , tandis que le GC a montré des gains plus significatifs de V_0 que de L_0 . En outre, une tendance à la diminution de K_a a été observée pour le GC mais pas pour le GE. La différence la plus significative dans l'évolution entre les groupes a été observée pour V_0 . De plus, les résultats suggèrent que les différences entre les groupes expliquent la majorité de la variabilité des différents paramètres observés.

En ce qui concerne les résultats des paramètres mesurés à sec, nous avons observé une augmentation des niveaux de force maximale dans le GE, en particulier sur le DC. Étant donné la courte durée de l'intervention (six semaines / dix séances d'entraînement ciblant ces exercices), ces gains sont probablement principalement attribuables à des adaptations nerveuses [Sale, 1988], bien que des effets hypertrophiques aient également pu intervenir dans une certaine mesure [Hughes et al., 2018]. De manière plus inattendue, une amélioration des niveaux de force a également été observée pour le GC, qui peut probablement être expliquée par leur familiarisation avec les tests à sec. Bien que les nageurs du GC n'aient pas participé aux entraînements en préparation physique durant l'étude, leur technique sur les deux exercices a pu s'améliorer grâce aux pré-tests de profilage F-V, ce qui pourrait expliquer l'amélioration des niveaux de force post-intervention [Calder & Gabriel, 2007]. La maturation biologique des nageurs du GC au cours de l'étude, comme en témoignent partiellement les augmentations de leur masse corporelle [Nyati et al., 2023], pourrait également expliquer les améliorations observées en force et en puissance maximales à sec. En effet, la maturation biologique est étroitement liée au développement de la compétence motrice [Drenowatz & Greier, 2019]. De plus, l'âge moyen de 14,2 ans des nageurs du GC (min : 12,8 ans ; max : 15,8 ans), correspondait à une période de croissance accélérée typique pour cette tranche d'âge de la population générale [Bozzola & Meazza, 2012]. Cependant, les nageurs du GE étaient en moyenne plus âgés (+1,8 ans) que ceux du GC, ce qui correspond à une phase où les taux de croissance tendent généralement à ralentir. Ainsi, l'augmentation significative des masses corporelles observée dans le GE pourrait davantage être attribuée aux adaptations hypertrophiques résultant de l'entraînement en force maximale. Cette hypothèse doit néanmoins être nuancée en considérant l'influence potentielle des différences de genre au sein de chaque groupe, ce qui pourrait avoir contribué aux variations observées des paramètres pris en compte.

Bien que nous ayons observé une tendance à l'augmentation de $F_{\max}$ sur le TV pour les deux groupes, ces améliorations étaient moins marquées par rapport aux gains significatifs de $F_{\max}$ observés sur le DC. La disparité des résultats entre les deux exercices pourrait être attribuée à l'entraînement en préparation à sec que les nageurs avaient effectué avant l'étude. Bien que les exercices précédemment

prescrits se limitaient à des mouvements au poids du corps (pompes, tractions), les tractions imposent une contrainte équivalente à 100 % du poids du corps, tandis que les pompes imposent une contrainte équivalente à 70 % du poids corporel environ [Suprak et al., 2011]. Les activations musculaires sur les tractions sont plus proches des groupes muscles activés lors du TV [Doma et al., 2013], tandis que les pompes sont plus étroitement liées au mouvement du DC [Van Den Tillaar, 2019]. Il est donc possible que les nageurs aient eu une expérience préalable plus importante de l'entraînement en force ciblant les muscles impliqués sur le TV, ce qui a pu limiter leur potentiel de progression supplémentaire sur cet exercice au cours de l'étude. De plus, des recherches suggèrent que les gains de force peuvent être limités par un volume élevé de l'entraînement en natation [Haycraft & Robertson, 2015], pouvant entraîner une réduction de la fonction neuromusculaire [Raglin et al., 1996]. Étant donné que le TV est étroitement lié à la propulsion en crawl, impliquant des groupes musculaires similaires [Morouço, Neiva, et al., 2011], il est possible que cet exercice ait subi une plus grande interférence liée au volume de nage, ce qui aurait davantage freiné le développement de la force sur cet exercice que sur le DC.

Outre les améliorations de $F_{\max}$, nous avons constaté une tendance de baisse de $V_{\max}$ pour le GE. Ce phénomène a été précédemment observé à la suite d'un entraînement de la force maximale sur d'autres exercices de préparation physique, tels que la presse à cuisse [Colyer et al., 2018]. Les adaptations hypertrophiques induites par l'entraînement en force maximale pour le GE pourraient être une explication possible de ce résultat. L'hypertrophie augmenterait en effet l'inertie des tissus [Ross & Wakeling, 2016] ainsi que la longueur du bras de levier intra-musculaire [Vigotsky et al., 2015], ce qui pourrait potentiellement contribuer à une réduction de la vitesse de raccourcissement musculaire. Cependant, les mécanismes sous-jacents à cette perte de vitesse maximale après un entraînement en force maximale restent peu documentés. Les vitesses spécifiques exigées par les charges imposées lors de l'entraînement en force maximale constituent une autre explication potentielle de ce résultat. La littérature suggère en effet que des adaptations différentes se produisent selon les zones de vitesse ciblées par l'entraînement. Dans notre étude, les résultats relatifs aux modifications de la pente du profil F-V indiquent que l'entraînement en force maximale a principalement affecté les vitesses associées aux niveaux de force plus élevés (proches de $F_{\max}$), tout en ayant un impact plus limité sur les vitesses correspondant aux niveaux de force inférieurs (proches de $V_{\max}$).

Concernant les résultats issus des profilage L-V dans l'eau, une amélioration de V_0 a été observée dans les deux groupes ; cependant, cette amélioration n'a atteint un seuil de significativité statistique que pour le GC. D'autre part, L_0 a montré une tendance à augmenter plus fortement pour le GE que pour le GC. Cette observation est en accord avec les résultats rapportés par Aspenes et al. (2009), qui ont relevé l'absence d'amélioration significative de la performance en natation après un entraînement en force maximale à sec, malgré une amélioration significative de la force de nage attachée pour le GE. Ce résultat pourrait être attribué à des effets d'interférence potentiels dus à la mise en place

conjointe d'entraînements à sec et en natation. En effet, des recherches antérieures suggèrent qu'un type de séance d'entraînement, à sec ou en natation, peut avoir un effet négatif sur la séance d'entraînement suivante [Arsoniadis et al., 2022]. Cette étude recommande de placer en premier lieu la condition d'entraînement correspondant aux adaptations principales recherchées, afin d'optimiser leur développement. Dans notre étude, toutes les séances d'entraînement à sec ont été effectuées juste avant les entraînements en natation, ce qui pourrait avoir entravé la progression du GE en termes de vitesse. Au-delà de l'ordre entre les séances d'entraînement, la durée du programme d'entraînement de la force à sec, suivie de la semaine de repos sans entraînement à sec, pourrait également avoir contribué aux améliorations limitées de la vitesse de nage observées pour le GE. Des études antérieures ont en effet indiqué que, bien que l'entraînement en préparation physique à sec puisse générer un impact positif presque immédiat sur les paramètres spatio-temporels de la nage, les effets bénéfiques sur la performance globale en natation se manifestent souvent avec un certain délai [Morais et al., 2018].

Un autre facteur pouvant expliquer la différence d'amélioration de la vitesse de nage entre les deux groupes concerne les paramètres de traînée. Étant donné que D_a est influencée simultanément par K_a et la vitesse de nage, l'interprétation des variations des paramètres de traînée est plus simple lorsqu'elles sont analysées au travers des changements de K_a . Bien que les résultats ne soient pas statistiquement significatifs, une tendance à la diminution de K_a a été observée dans le GC, tandis qu'une légère augmentation a été observée dans le GE. Cette augmentation observée de K_a pour le GE pourrait être attribuée aux adaptations hypertrophiques [Toussaint et al., 2000], qui pourraient entraîner une expansion de la surface corporelle. En revanche, la réduction de K_a dans le GC pourrait s'expliquer par des améliorations induites par l'entraînement et par l'amélioration de la technique de nage [Pendergast et al., 2005; Toussaint et al., 2000]. Cette hausse de K_a dans le GE soutient une hypothèse courante chez certains entraîneurs selon laquelle l'entraînement en force pourrait potentiellement altérer les compétences techniques d'un nageur, augmentant ainsi les forces de traînée [Newton et al., 2002]. Néanmoins, il est important de noter que bien que l'entraînement en force puisse accroître les paramètres de traînée, il pourrait simultanément améliorer les capacités de propulsion. Ces capacités de propulsion étaient en partie représentées dans la présente étude par η_P qui a montré une tendance à la baisse pour les deux groupes. Le paramètre d'efficacité propulsive ne représente cependant pas la propulsion d'un nageur dans son ensemble. Nous remarquons en effet que D_a , qui en moyenne est égale à la force propulsive [Toussaint & Beek, 1992], présentait une tendance à l'augmentation pour les deux groupes, et plus particulièrement pour le GE. Avec les évolutions combinées de η_P et de D_a , nous pouvons ainsi émettre l'hypothèse que la production de force totale dans l'eau s'est globalement améliorée, ce qui pourrait compenser les effets négatifs d'une traînée accrue. Cette interaction entre propulsion améliorée et augmentation de la traînée pourrait finalement avoir contribué aux améliorations observées en termes de vitesse.

Cette étude a permis de mettre en lumière des perspectives concrètes sur les effets d'un programme d'entraînement en force maximale à sec, tant sur les profils F-V à sec que sur les paramètres de nage. Néanmoins, plusieurs limites doivent être soulignées. Premièrement, les écarts de niveau en natation et de maturité biologique entre les deux groupes ont pu influencer les résultats (Tableau 9). Nous nous sommes donc assurés que le programme d'entraînement soit ajusté aux capacités physiques de chaque groupe, en adaptant la charge relative de l'entraînement en conséquence. Une autre limite réside dans l'absence d'évaluation de la performance en natation avant et après l'intervention. Cependant, cette limite est en partie comblée par l'évaluation de V_0 , un paramètre qui a montré une forte corrélation avec la performance en natation [Gonjo et al., 2021]. De manière plus large, cette étude établit une relation entre les résultats F-V et les paramètres hydrodynamiques obtenus via la méthode de petite perturbation des vitesses ("small perturbation method") [Kolmogorov, 2023; Kolmogorov & Duplishcheva, 1992], offrant une explication plausible des tendances observées. Cette méthode présente toutefois certaines limites inhérentes, comme l'hypothèse d'une puissance égale entre la condition de nage libre et la condition de nage avec application d'une charge externe. Pour minimiser les potentielles imprécisions dans la détermination des paramètres hydrodynamiques, nous avons choisi une réduction de vitesse de 15 % (correspondant à 85 % de V_0) pour estimer les forces de traînée (D_a), conformément à des recherches antérieures [Gonjo & Olstad, 2022; Keller et al., 2024]. De plus, des consignes rigoureuses de production d'efforts maximaux ont été fournies aux nageurs, avec une récupération complète entre chaque essai. Le respect strict du protocole renforce la fiabilité des paramètres F-V déterminés à l'aide du dispositif du 1080 sprint [Olstad et al., 2020].

Apports de cette étude pour la thèse

Cette étude met en lumière des considérations importantes pour l'optimisation des protocoles d'entraînement croisé en préparation physique et en natation. L'intégration d'un entraînement de la force maximale à sec présente un potentiel prometteur pour l'amélioration des capacités spécifiques de force et de vitesse des nageurs. Cependant, plusieurs facteurs clés doivent être gérés avec soin, tels que l'influence de l'entraînement en force maximale sur les capacités de vitesse maximale, les interférences potentielles entre les adaptations induites par l'entraînement à sec et le volume d'entraînement en natation, ainsi que le délai requis pour que les gains de force se traduisent efficacement en une amélioration de la vitesse de nage. Ainsi, un suivi régulier des profils F-V à sec, des profils L-V en natation, et des paramètres hydrodynamiques peut fournir des informations précises, permettant aux entraîneurs d'adapter le contenu de l'entraînement en fonction des progrès et des adaptations techniques de chaque athlète. Cette approche soutient une programmation individualisée et adaptative, alignée sur les besoins de développement et les objectifs compétitifs de chaque nageur, et vise in fine à maximiser les gains de performance.

Etude n°5

Monitoring des profils force-vitesse à sec et charge-vitesse dans l'eau au cours d'une saison : étude de cas de cinq nageurs élités

Résumé

Introduction : L'objectif de cette étude était d'illustrer l'application pratique des outils et méthodes utilisés précédemment pour l'optimisation de la performance chez des nageurs de haut niveau.

Méthodes : Cinq nageurs élités ont participé à cette étude. Les mesures consistaient à réaliser conjointement des profilages F-V à sec sur des exercices de préparation physique (DC - TA - TV - SJ) et des profilages L-V dans leur nage de spécialité trois fois au cours de la saison (T1 - T2 - T3). Les nageurs suivis durant la saison ont tous participé à une compétition avant T2 et à une autre compétition avant T3.

Résultats : Les résultats des profils L-V dans l'eau ont montré des améliorations non-triviales pour tous les paramètres entre T1 et T2 (+4,15% ; +7,21 % ; +5,79 % et -2,49 % pour V_0 , L_0 , F_{prop} et K_a respectivement). Entre T2 et T3, les évolutions sont moins importantes (évolutions positives pour V_0 et négative pour L_0 et F_{prop}) sauf pour K_a qui a continué de diminuer largement (-5,63%). Concernant les évolutions des profils F-V à sec, les résultats ont montré une tendance globale à l'amélioration de V_{max} entre T1 et T2 (résultats positifs : +5,24% ; +2,53 % ; +7,07 % pour le DC, le TA et le SJ respectivement) sauf sur le TV (résultat trivial, -1,82 %), ainsi qu'une tendance globale à l'amélioration de F_{max} entre T2 et T3 (tendances positives : +3,80 % ; +5,63 % pour le DC et le TA respectivement et triviale pour le TV : +1,78 %) sauf pour le SJ (-3,44 %). Cela se traduit par une tendance globale à l'amélioration de P_{max} pour l'ensemble des exercices évalués et sur l'ensemble de la saison.

Conclusion : Malgré une orientation du travail identique, des évolutions différentes en fonction des exercices testés ont été constatées. Néanmoins, les résultats ont également montré que l'entraînement spécifique d'une zone de vitesse du spectre F-V à sec peut avoir des effets précis sur les qualités incluses dans cette zone. Cette étude a permis de montrer l'application pratique du monitoring des qualités estimées au travers du profilage F-V et L-V dans le cadre de l'entraînement des nageurs de haut niveau. Cette étude semble fournir des pistes d'amélioration des processus d'entraînement et d'évaluation des nageurs, tant à sec qu'in situ, constituant ainsi un outil précieux pour orienter la prise de décision des entraîneurs.

Introduction

Les conclusions des précédents travaux de cette thèse, combinées avec les conclusions issues de la littérature scientifique, ont mis en évidence la difficulté de la prescription d'entraînements dans les deux conditions : en préparation physique à sec et en natation. Notamment, la planification du travail, le délai de transfert d'une condition à l'autre, ainsi que les interférences potentielles entre le travail à sec et l'entraînement natation sont autant de facteurs qui peuvent rendre l'intervention du préparateur physique et de l'entraîneur complexe. Néanmoins, l'utilisation des profilages F-V à sec et L-V dans l'eau a permis de souligner leur utilité au regard de leur lien réciproque avec la performance aquatique ainsi qu'au regard de leur capacité à quantifier les évolutions de certains facteurs clés de la performance en natation sprint. L'interdépendance des variables relevées permet d'envisager l'utilité de ces outils de profilage pour le monitoring des paramètres biomécaniques de la nage appliqué à une population de haut niveau. De plus, la sensibilité du profilage F-V et sa capacité à quantifier des évolutions spécifiques en fonction de l'orientation de l'entraînement présente donc le profilage F-V comme un outil particulièrement adapté à l'objectif de ce travail [Baena-Raya et al., 2021].

Dans le cadre de l'application pratique des résultats issus des précédentes études, la présente recherche s'est attachée à illustrer l'usage des méthodologies des mesures utilisées précédemment sur une population de nageurs élites, dont certains évoluent au niveau international. Cette approche revêt un caractère original, car elle permet d'objectiver les évolutions des paramètres évalués en les reliant aux données spécifiques et contextuelles des programmes d'entraînement généralement appliqués à des nageurs de ce niveau. De plus, cette étude propose une analyse plus exhaustive comparée aux précédentes études de ce travail de thèse, notamment en intégrant :

(1) Une évaluation des qualités F-V des membres inférieurs à sec en complément de l'évaluation de ces mêmes qualités sur les membres supérieurs. Bien que la contribution des membres inférieurs dans la propulsion totale des différentes nages (excepté la brasse) soit largement inférieure à celle des membres supérieurs [A. R. Vorontsov & Rumyantsev, 2000], leur implication dans la performance globale s'étudie parfois à travers leur lien avec les phases de départ et de virage [Keiner et al., 2019]. Le squat jump, par exemple, est un exercice communément employé pour évaluer les qualités de force, de vitesse et de puissance des membres inférieurs en lien avec la phase de départ, ces deux mouvements mobilisant essentiellement une action concentrique des groupes musculaires impliqués [Thng et al., 2020].

(2) Un lien direct entre les paramètres issus du monitoring et la performance en compétition.

La temporalité du transfert des évolutions constatées à sec sur la nage [Morais et al., 2018] semble justifier l'extension d'un suivi des qualités de force à l'échelle de la saison. La présente étude consistera

donc à discuter des évolutions des paramètres F-V à sec et dans l'eau au regard de la périodisation du travail dans les deux environnements.

Outre sa contribution scientifique, cette étude revêt également une importance pratique significative en matière d'optimisation de la performance. Afin de répondre aux attentes des acteurs de terrain, souvent confrontés à des contraintes temporelles importantes, en particulier dans le cadre de la préparation des Jeux Olympiques et Paralympiques (JOP) de 2024, des rapports individuels détaillés à destination des entraîneurs ont été élaborés. Ces rapports visaient à fournir des informations précises et directement exploitables pour guider les décisions d'entraînement. Un exemple de fiche résumé, illustrant cette démarche pratique, est présenté en annexe de ce travail (Annexe A).

Méthodes

Participants

Cinq nageurs élités, dont deux femmes et trois hommes, ont participé à cette étude. Les nageurs faisaient partie d'un même groupe et s'entraînaient au Centre National d'Entraînement de Font-Romeu. Certains d'entre eux avaient pour objectif de la saison la qualification aux JOP de Paris 2024. Parmi les cinq participants à cette étude, une nageuse était championne d'Europe senior et médaillée mondiale, une autre nageuse était championne d'Europe junior, un nageur était vice-champion d'Europe junior et tous possédaient un niveau de finaliste aux championnats de France élite senior. Le niveau des nageurs exprimé selon la classification proposée par Ruiz-Navarro et ses collaborateurs [Ruiz-Navarro et al., 2023], ainsi que leurs caractéristiques individuelles sont présentées dans le Tableau 12.

	Age (année)	Poids (kg)	Taille (cm)	Spécialité (distance / nage)	Niveau
Nageuse n°1	22	67,8	179	50 m / 100 m dos	1 (> 875 points WA)
Nageuse n°2	18	59,1	169	100 m / 200 m brasse	
Nageur n°1	18	75,2	186	100 m / 200 m dos	2 (> 800 points WA)
Nageur n°2	18	72,6	187	200 m / 400 m nage libre	
Nageur n°3	18	69,3	184	100 m / 200 m papillon	3 (> 650 points WA)

Tableau 12 : Caractéristiques des participants à l'étude, (WA = World Aquatics).

Protocole expérimental

Les mesures consistaient à réaliser conjointement des profilages F-V à sec sur des exercices de préparation physique et des profilages L-V dans l'eau plusieurs fois au cours de la saison. Les tests ont donc été réalisés à trois reprises : une première fois (T1) à la reprise des entraînements à la fin du mois d'août, une seconde fois (T2) au mois de novembre après un premier bloc de travail, ainsi qu'une troisième fois (T3) au mois d'avril après un second bloc de travail. En concertation avec les entraîneurs, une période de repos de 3 jours avant les tests était adoptée pour l'ensemble des nageurs, de sorte à favoriser un état de forme similaire entre eux et entre chaque session de mesure.

Lors de la première session entièrement dédiée aux mesures à sec et placée en début de matinée, les profilages F-V étaient réalisés sur 4 exercices communément prescrit lors de la préparation physique à sec des nageurs : le DC, le TA, le TV ainsi que le squat jump (SJ) [Raineteau et al., 2024]. Comme décrit dans l'étude n°3, il était demandé aux nageurs de réaliser la phase concentrique du mouvement le plus rapidement possible. Cette consigne était donnée pour les quatre charges différentes sur lesquelles les nageurs étaient évalués. Ces charges représentaient, pour les exercices impliquant les membres supérieurs, environ 20 – 40 – 60 et 80% de leur 1RM préalablement estimée la saison précédente. Concernant le SJ, une première série au poids de corps était évaluée, suivie de trois séries aux charges suivantes : 20 - 40 et 60 % de leur 1RM. Afin de compenser une éventuelle évolution de la 1RM des participants entre sa détermination et les profilages F-V réalisés, les vitesses d'exécution enregistrées lors de ces derniers étaient systématiquement surveillées. Ainsi, une répétition avec une charge supplémentaire de 5 kg était ajoutée si la vitesse d'exécution du mouvement dépassait $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sur la dernière répétition. Cette procédure visait à accroître l'écart de vitesse entre la charge la plus légère et la charge la plus lourde, améliorant ainsi la justesse des mesures issues du profilage [Lindberg et al., 2021]. La vitesse lors de chaque répétition étaient mesurées grâce à un encodeur linéaire (Gymaware, Kinematic Performance Technology, Canberra, Australia) pour les exercices impliquant les membres supérieurs (DC, TA, TV). La force moyenne développée par chaque nageur était ensuite estimée conformément à la méthodologie précédemment décrite dans les études 3 et 4. Concernant le SJ, chaque saut était filmé à 240 images par seconde et une résolution de 1080 pixels (iPhone SE 2020, Apple Inc., USA). La vidéo était ensuite utilisée afin d'estimer la hauteur de saut via l'application mobile *My Jump* et ainsi déterminer la vitesse et la force moyenne lors de chaque saut.

Plus précisément, l'enregistrement vidéo des sauts à haute fréquence a permis la détermination des points de décollage et d'atterrissage des pieds au sol, du temps de vol (t) et donc de la hauteur de saut (h) en utilisant les lois de la cinématique dans un champ gravitationnel uniforme [Bosco et al., 1983] :

$$h = \frac{1}{8} g t^2 = t^2 \times 1.22625 \quad (40)$$

De plus, à partir de cette hauteur de saut, de la différence de hauteur du centre de masse entre le début de la phase de poussée et lorsque les pieds quittent le sol (h_{po}) (Figure 44), de la masse du sujet (m) et de la gravité terrestre (g), la force verticale produite par le sujet pour effectuer le saut vertical (F) a pu être calculée conformément à la méthode décrite par [Samozino et al., 2008]:

$$F = mg \left(\frac{h}{h_{po}} + 1 \right) \quad (41)$$

La vitesse moyenne (V) du centre de masse durant la phase de poussée a également pu être déduite selon l'expression :

$$V = \sqrt{\frac{gh}{2}} \quad (42)$$

La régression linéaire entre la force et la vitesse permettait d'estimer les paramètres de vitesse maximale ($V_{\max}$) et de force maximale ($F_{\max}$) pour chaque exercice. La puissance maximale ($P_{\max}$) était ensuite estimée selon l'équation 14.

Des critères de réalisation ont été prescrits pour assurer la fiabilité et la reproductibilité des mesures. Concernant les sauts, il était demandé aux nageurs que l'atterrissage s'effectue avec les pointes des pieds tendues (Figure 44) afin de s'assurer que la position du sujet soit la même lors de la phase de décollage que lors de la phase d'atterrissage permettant ainsi de mesurer un temps de vol juste et fidèle [Balsalobre-Fernández et al., 2015].



Figure 44 : Illustration de la position de départ et de la position de décollage / réception du squat jump lors du protocole de mesure.

De plus, sur les mouvements impliquant les membres inférieurs tout comme pour les mouvements impliquant les membres supérieurs, un court temps de pause entre la phase excentrique et concentrique était imposé aux nageurs afin de limiter l'implication de la phase excentrique du muscle et ainsi augmenter la fiabilité de la mesure [Pallarés et al., 2014]. Il était également demandé aux nageurs que l'intention de vitesse soit maximale tout au long de la phase concentrique du mouvement.

Lors de la deuxième session entièrement dédiée aux mesures dans l'eau et placée en fin d'après-midi, les profilages L-V étaient réalisés dans la nage de spécialité de chaque nageur.se à partir d'un protocole de sprint en nage semi-attachée décrit dans les précédentes études de ce travail de thèse. La régression linéaire entre la charge et la vitesse permettait d'estimer les paramètres de vitesse maximale théorique (V_0) et de charge maximale théorique (L_0). Les paramètres de traînée active (D_a), de force propulsive (F_{prop}) et le coefficient de résistance active (K_a) étaient estimés à partir de la régression linéaire F-V comme décrit précédemment (cf. section 4 du cadre théorique).

Mesures en course

Les nageurs participaient quelques jours avant T2 aux championnats de France en bassin de 25 m et quelques jours avant T3 à un meeting international en bassin de 50 m. Les courses lors de ces deux compétitions étaient filmées et analysées selon le processus décrit dans l'étude n°2. Ces analyses de courses nous ont permis d'évaluer le temps de passage à 15 m de chaque course. Ce temps de passage inclut le temps de réaction, la phase de vol, la phase de coulée et une partie relativement faible de la nage complète correspondant à la reprise de nage. Le meilleur temps de passage pour chaque nageur et sur chaque compétition a ensuite été retenu.

Analyse statistique

Pour caractériser les variations individuelles des différents paramètres mesurés au cours de la saison, des pourcentages d'évolution et leurs intervalles de confiance à 95% ont été calculés entre T1 et T2 ainsi qu'entre T2 et T3. Afin de discriminer les évolutions notables malgré un faible nombre de participants, le plus petit changement utile (Smallest Worthwhile Change, SWC) a été calculé comme suit pour chaque paramètre [Anderson et al., 2006] :

$$SWC = 0,2 \times CV \quad (43)$$

0.2 représentant la valeur seuil d'une faible taille d'effet [Cohen, 1988] et CV étant le coefficient de variation inter-individuel. Cet indicateur est classiquement utilisé dans des cas d'application pratique d'analyse de la performance notamment pour des cas isolés ou des sports d'équipes [Harry et al., 2024].

Afin de pouvoir quantifier le transfert de force entre la condition "à sec" et la condition de nage, des corrélations de Spearman ont été calculées entre les évolutions de F_{max} des exercices à sec et les évolutions des paramètres mesurés dans l'eau, et ce entre T1 et T2 puis entre T2 et T3. De plus, dans l'objectif d'associer les résultats des tests et la performance, les évolutions des mesures de force, vitesse et puissance maximales lors du SJ entre T2 et T3 ont été mises en lien avec les évolutions des temps de passage à 15 m entre les deux compétitions grâce à des corrélations de Spearman.

Planification de la saison

Le Tableau 13 ci-dessous présente la périodisation de l'entraînement à partir du début de saison, jusqu'à la dernière session de test au mois d'avril. Aucun travail à sec ou dans l'eau n'avait été réalisé avant la première session de test, lors de la coupure estivale. La colonne présentant le travail en préparation physique ne concerne que le travail des membres supérieurs, le travail des membres inférieurs différant de celui-ci. Nous pouvons remarquer que le travail en préparation physique n'incluait pas de travail de la force maximale à sec durant le premier bloc de travail (de T1 à T2). Le travail des membres inférieurs était orienté tout au long de la saison en fonction des résultats des tests F-V, notamment selon la différence entre les profils mesurés pour chaque sujet et leurs profils optimaux décrits dans des travaux antérieurs [Samozino et al., 2012]. Les nageurs présentant essentiellement des déficits de vitesse, le travail prescrit était principalement axé sur des sauts sans charge supplémentaire à la masse corporelle, excepté pour les nageurs présentant un déficit de force en comparaison du profil optimal.

		Travail en préparation physique	Entraînement natation
Septembre	Semaine 1	Profilages T1	
	Semaine 2	PPG	Vitesse 15-50 + technique
	Semaine 3	Hypertrophie	
	Semaine 4		Régénération
Octobre	Semaine 5	Puissance max	Vitesse 50 - 100
	Semaine 6	Puissance - vitesse	
	Semaine 7	Compétition - Championnat de France 25 m	
	Semaine 8	Repos (au moins 3 jours complets)	
Novembre	Semaine 9	+ Profilages T2	
	Semaine 10	Force max	Seuil 2 + Vitesse 50 - 100
Semaine 11	Régénération		
Décembre	Semaine 12	Puissance - force	Seuil 2 + Vitesse 50 - 100
	Semaine 13		
	Semaine 14	Compétition - Meeting Amiens (50 m)	
	Semaine 15	Repos	
Janvier	Semaine 16	Hypertrophie	Vitesse 15-50 + technique
	Semaine 17		Régénération
	Semaine 18		Seuil 2 + Vitesse 50 - 100
	Février	Semaine 19	Puissance - force
Semaine 20			
Semaine 21		Puissance - vitesse	Maintien allures courses
Semaine 22			
Mars	Semaine 23	Vitesse	Régénération
	Semaine 24		Maintien allures courses
	Semaine 25		Régénération
	Semaine 26	Compétition - Giant Open (50 m)	
Avril	Semaine 27	Repos (au moins 3 jours complets)	
	Semaine 28	Profilages T3	

Tableau 13 : Périodisation du travail à sec et de l'entraînement dans l'eau au cours de la saison entre la première et la troisième session de test.

Un travail de résistance dans l'eau était ajouté environ deux fois par semaine entre T1 et T2. Ce travail était réalisé à l'aide d'outils tels que le 1080 sprint (1080 Motion AB, Lidingö, Suède) et les Swim Tower (Destro Machines, Llc). Les charges imposées correspondaient aux charges induisant une diminution de la vitesse maximale d'environ 30% selon la volonté de l'entraîneur. Entre T2 et T3, ce travail était réduit à une fois par semaine en moyenne et les charges ont été réduites afin qu'elles induisent une diminution de la vitesse maximale de 15% environ. L'objectif principal de l'entraînement dans l'eau du deuxième bloc d'entraînement (entre T2 et T3) était selon l'entraîneur « la diminution des résistances à l'avancement » correspondant à l'amélioration du positionnement hydrodynamique.

Résultats

La Figure 45 ci-dessous présente les évolutions des paramètres issus des profilages L-V réalisés dans l'eau au cours de la saison durant laquelle le suivi était réalisé. Concernant V_0 , les résultats montrent une amélioration non triviale entre T1 et T2 (+4,15 %) suivi d'une amélioration plus modérée entre T2 et T3 (+1,20 %). Les évolutions de L_0 suivent des tendances similaires à celles de F_{prop} . Des évolutions positives et non-triviales entre T1 et T2 sont observées (+7,21 % et +5,79 % respectivement). Entre T2 et T3, les évolutions de ces paramètres sont négatives (traduisant une baisse des valeurs) et triviales (-5,03 %; -3,32%). Concernant K_a , les évolutions étaient distinctes avec une amélioration non-triviale lors des deux périodes d'entraînement (-2,49 % entre T1 et T2 et -5,63 % entre T2 et T3).

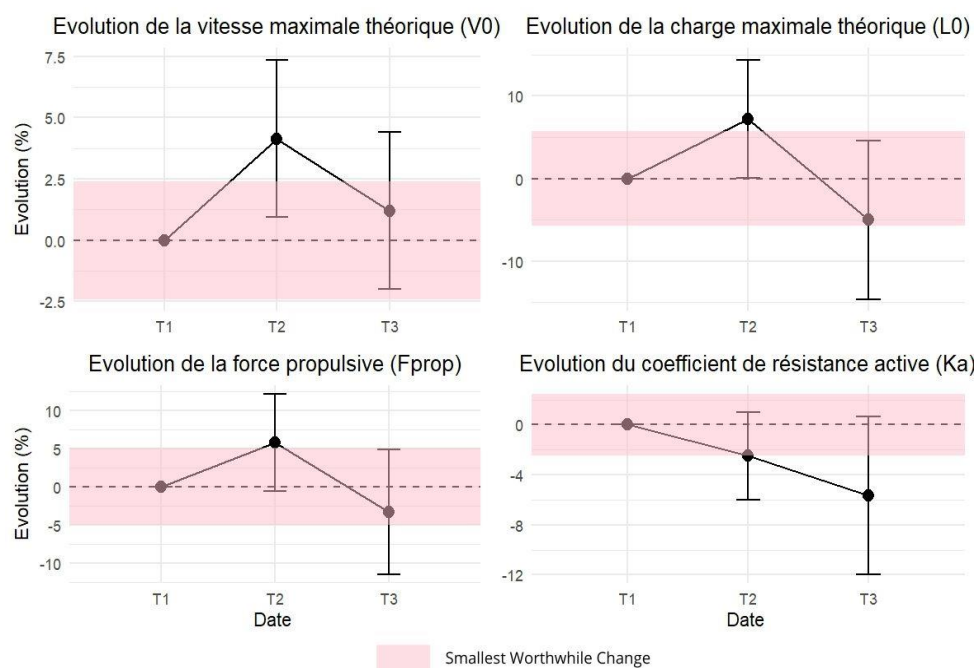


Figure 45 : Évolutions des paramètres issus du profilage charge-vitesse dans l'eau entre T1 et T3 (intervalles de confiance à 95% et SWC fixé à $0,2 \times CV$).

Le Tableau 14 ci-dessous présente les évolutions des paramètres issus des profilages F-V réalisés sur les quatre exercices décrits précédemment ainsi que le SWC. Nous pouvons remarquer la tendance globale à l'amélioration de $V_{\max}$ entre T1 et T2 (résultats positifs : +5,24 % ; +2,53 % ; +7,07 % pour le DC, le TA et le SJ respectivement) sauf sur le TV (résultat trivial, -1,82 %), ainsi que la tendance globale à l'amélioration de $F_{\max}$ entre T2 et T3 (tendances positives : +3,80 % ; +5,63 % pour le DC et le TA respectivement et triviale pour le TV : +1,78 %) sauf pour le SJ (-3,44 %). Cela se traduit par une tendance globale à l'amélioration de $P_{\max}$ pour l'ensemble des exercices évalués et sur l'ensemble de la saison.

Exercice	Qualités	Evolutions T1 – T2 (en %)	Pourcentage d'évolutions positives / triviales / négatives	Evolutions T2 – T3 (en %)	Pourcentage d'évolutions positives / triviales / négatives	SWC (en %)
Développé-couché	Vmax	5,24*	80/20/0	0,81	60/20/20	1,37
	Fmax	0,32	20/40/40	3,80*	40/60/0	3,79
	Pmax	5,48*	40/60/0	4,50*	80/20/0	4,32
Tirage couché	Vmax	2,53*	40/20/40	5,45*	60/20/20	1,44
	Fmax	-3,83	20/40/40	5,63*	60/20/20	4,70
	Pmax	-2,00	20/40/40	10,24*	100/0/0	5,11
Tirage vertical	Vmax	-1,82	20/40/40	0,70	20/60/20	2,40
	Fmax	4,86*	60/20/20	1,78	60/20/20	2,21
	Pmax	2,80	60/20/20	2,55	60/0/40	4,32
Squat Jump	Vmax	7,07*	40/20/40	7,93*	40/40/20	2,5
	Fmax	-1,08	20/60/20	-3,44*	20/20/60	2,12
	Pmax	2,42*	40/20/40	3,61*	60/20/20	2,34

*Tableau 14 : Évolutions des paramètres issus des profilages force-vitesse réalisés sur les exercices de préparation physique à sec. SWC : Smallest Worthwhile Change, * : évolutions supérieures au SWC pour les évolutions positives ou inférieures au SWC pour les évolutions négatives.*

La Figure 46 présente les relations entre les évolutions de $F_{\max}$ et de $P_{\max}$ sur les différents exercices de préparation physique et l'évolution des paramètres mesurés dans l'eau de T1 à T2 (Figure 46. A. & C.) et de T2 à T3 (Figure 46. B. & D.). Concernant les évolutions entre T1 et T2, nous avons remarqué des relations principalement triviales à l'exception des évolutions de $F_{\max}$ lors du SJ qui présente une relation négative avec tous les paramètres mesurés à sec. Concernant les évolutions entre T2 et T3, nous avons remarqué de fortes corrélations entre les évolutions observées sur le DC et les évolutions de L_0 et F_{prop} . Ces relations étaient positives malgré la diminution de L_0 et F_{prop} , ce qui signifie que les nageurs dont la $F_{\max}$ sur cet exercice à sec a le plus augmenté sont ceux dont L_0 et F_{prop} ont le moins diminué. Aucun lien n'a été trouvé entre la $F_{\max}$ sur le SJ et les paramètres dérivés de la force propulsive dans l'eau.

A. Entre T1 et T2					B. Entre T2 et T3				
	Fmax DC	Fmax TA	Fmax TV	Fmax SJ		Fmax DC	Fmax TA	Fmax TV	Fmax SJ
V0	0,3	0,3	-0,1	-0,5	V0	0,7	0,7	0,7	-0,6
rLO	0,3	0,3	-0,1	-0,5	rLO	1	0,8	0,7	0,1
Fprop	-0,1	0,5	-0,2	-0,8	Fprop	1	0,8	0,7	0,1
Pprop	0,3	0,3	-0,1	-0,5	Pprop	1	0,8	0,7	0,1
Ka	-0,3	0,7	0,4	-0,6	Ka	0,6	0,1	0,6	0,7

C. Entre T1 et T2					D. Entre T2 et T3				
	Pmax DC	Pmax TA	Pmax TV	Pmax SJ		Pmax DC	Pmax TA	Pmax TV	Pmax SJ
V0	0,3	0,2	0,3	0,7	V0	0,2	0,6	0,2	0,8
rLO	0,3	0,2	0,3	0,7	rLO	0,2	0	0,2	0,3
Fprop	-0,1	0,1	0,5	0,9	Fprop	0,2	0	0,2	0,3
Pprop	0,3	0,2	0,3	0,7	Pprop	0,2	0	0,2	0,3
Ka	-0,3	0,2	0,7	0,5	Ka	0,6	-0,2	0,6	-0,1

Figure 46 : Coefficient de corrélation Rho de Spearman entre les évolutions de F_{max} (A. & B.) et de P_{max} (C. & D.) sur les quatre exercices de préparation physique et les évolutions des paramètres dans l'eau de T1 à T2 (A. & C.) et de T2 à T3 (B. & D.).

Concernant les évolutions mesurées sur le SJ et les évolutions des temps de passage à 15 m en course, les corrélations ont montré un lien négatif parfait entre les évolutions de P_{max} sur le SJ entre T2 et T3 et les évolutions des temps de passage à 15 m ($r = -1$). Cela se traduit d'un point de vue pratique par le résultat suivant : les nageurs dont la P_{max} sur le SJ a le plus augmentée sont les nageurs dont le temps de passage à 15 m a le plus diminué traduisant une vitesse moyenne plus élevée sur cette phase. De plus, les liens entre les évolutions de F_{max} et de V_{max} sur le SJ avec les évolutions des temps de passage à 15 m ont montré des corrélations plus faibles ($r = 0,6$ et $r = -0,9$ respectivement).

Discussion

Cette étude avait pour but d'évaluer les évolutions parallèles des qualités issues des profilages F-V et L-V dans les deux environnements, hors de l'eau en préparation physique et dans l'eau lors d'efforts standardisés de sprints, au cours d'une saison. Il convient de souligner la rareté de ce genre de protocole de par la complexité de faire adhérer les nageurs et les entraîneurs de haut niveau aux mesures sur une période prolongée. Pour autant, leur adhésion remarquable a permis de garantir une rigueur méthodologique et d'offrir une interprétation unique des résultats. Cette rigueur s'illustre, par exemple, par le respect d'une période de repos complet avant les sessions de mesures ou encore la standardisation de l'heure des sessions de mesures et de tous les paramètres d'entraînement associés à celles-ci. Les principaux résultats ont montré qu'en préparation physique, les évolutions positives de la puissance maximale sur la plupart des exercices au cours de la saison étaient liées en premier lieu à un développement de la vitesse maximale (entre T1 et T2) puis à un développement de la force maximale lors de la seconde partie de la saison (entre T2 et T3). Dans l'eau, les principaux résultats ont montré

des améliorations de tous les paramètres lors de la première partie de la saison. Cependant, la diminution des résistances à l'avancement et l'augmentation de la vitesse maximale étaient les seules améliorations constatées lors de la seconde partie de la saison.

Les principaux résultats montrent donc une amélioration des qualités de force dans l'eau sans que l'on retrouve des améliorations significatives de la force maximale à sec sur 3 des 4 exercices évalués entre T1 et T2. Ces résultats semblent cohérents pour la période considérée au regard de la programmation des entraînements. Ils pourraient en effet s'expliquer par l'absence de travail de la force maximale à sec et l'intégration d'un travail contre résistance dans l'eau. Malgré le manque d'évidences scientifiques sur l'efficacité du travail en résistance dans l'eau sur la performance en natation [Jin et al., 2024], cette pratique est hypothétiquement liée à des activations musculaires et des forces propulsives proches de la nage libre [Bollens et al., 1988; Morouço, Neiva, et al., 2011]. Il est donc probable que le travail de nage contre résistance ait eu un impact sur l'amélioration de L_0 et de F_{prop} . En effet, la présente étude n'a pas investigué l'amélioration des performances, comme cela a été étudié dans la littérature, mais les évolutions des paramètres issus du protocole de test de nage semi-attachée, protocole utilisé à l'entraînement afin de travailler en résistance dans l'eau. De plus, Jin et al. (2024) supposent que la plupart des études portant sur les effets d'un entraînement en résistance dans l'eau n'aboutissent pas à des résultats concluants car la plupart des nageurs inclus dans les protocoles seraient déjà soumis dans la saison à la nage contre résistance avant le début du protocole. Or, les tests mis en place dans cette étude ont débuté dès le début de saison après une longue période sans entraînement (Tableau 13), ce qui limite le risque lié à l'effet de familiarisation initiale à l'entraînement contre résistance. Toutefois, nos résultats laissent supposer que cet entraînement contre résistance fait bien partie des facteurs d'amélioration des paramètres issus des profilages L-V dans l'eau au cours de la saison et en particulier entre T1 et T2.

Il est également possible d'analyser les différences de résultats en fonction des exercices testés à sec. La seule amélioration significative de la force maximale à sec entre T1 et T2 est observée sur le TV (des améliorations triviales sont observées pour le DC). Ce résultat peut paraître surprenant compte-tenu du fait qu'aucun travail de la force maximale à sec n'a été prescrit durant la première période d'entraînement (de T1 à T2). L'entraînement croisé de la force à sec et en résistance dans l'eau pourrait permettre d'expliquer certaines évolutions qui ne découlent pas nécessairement de l'entraînement dans le milieu dans lequel elles ont été évaluées. La nage attachée, induisant une accentuation de la phase de poussée [Maglischo et al., 1984] qui elle-même sollicite particulièrement les muscles dorsaux [Pink et al., 1991], peut alors être mise en lien avec les sollicitations musculaires similaires du TV [Doma et al., 2013].

Par ailleurs, d'autres résultats de cette étude viennent objectiver les orientations du travail proposées par l'entraîneur. Concernant les membres inférieurs, le travail était ciblé sur des qualités différentes des

exercices impliquant les membres supérieurs puisque l'objectif était essentiellement de développer la vitesse maximale. Les résultats issus des profilages F-V sur le SJ viennent confirmer cette intention. Nous avons en effet observé une amélioration significative de la vitesse maximale mesurée sur le SJ lors des deux périodes d'entraînement (entre T1 et T2 ainsi qu'entre T2 et T3). Cette observation rejoint les conclusions d'études précédentes sur le sujet [Baena-Raya et al., 2021; Jiménez-Reyes et al., 2017] affirmant qu'un entraînement ciblé sur une des deux extrémités de la régression linéaire F-V avait un impact sur l'amélioration de cette qualité (force ou vitesse). De même, nous avons pu observer une amélioration de la force maximale à T3 sur les exercices de préparation physique qui impliquaient les membres supérieurs. Cette observation confirme les effets de l'entraînement ciblé sur l'évolution des qualités développées puisque la période d'entraînement entre T2 à T3 était composée d'un cycle spécifique de travail de la force maximale à sec.

Concernant les résultats issus du profilage L-V dans l'eau à T3, l'amélioration de V_0 peut paraître étonnante au vu de la diminution des valeurs de F_{prop} et L_0 . Ce résultat peut sans doute être expliqué par la diminution significative du coefficient de résistance à l'avancement. La vitesse de déplacement est en effet, comme dans beaucoup de disciplines, un équilibre entre les forces propulsives et les forces de résistances [Gatta et al., 2016]. La baisse de F_{prop} et de L_0 dans l'eau pourrait s'expliquer par la diminution des entraînements contre résistance dans l'eau au cours de la deuxième période d'entraînement (entre T2 et T3). Malgré la diminution de F_{prop} et L_0 , leur forte association avec les évolutions de F_{max} sur le DC ($r=1$), le TA ($r=0,8$) et le TV ($r=0,7$) montrent que les nageurs dont la force propulsive et les paramètres associés ont le moins diminué sont ceux dont la force maximale mesurée sur les exercices à sec impliquant les membres supérieurs a le plus augmenté.

Par ailleurs, peu de liens cohérents ont été observés entre F_{max} lors du SJ et les paramètres mesurés dans l'eau. Néanmoins, la corrélation parfaitement négative entre les évolutions de P_{max} sur le SJ et les évolutions des temps de passage à 15 m entre T2 et T3 montrent l'importance du travail personnalisé en fonction du déficit F-V des membres inférieurs. En effet, les nageurs présentaient majoritairement des déficits de vitesse et leurs entraînements étaient adaptés en fonction de ces résultats afin d'améliorer la puissance maximale de façon individualisée. Dès lors, nous pouvons supposer que cet entraînement a eu les effets escomptés au regard de la forte corrélation négative ($r=-0,9$) des évolutions de vitesse maximale sur le SJ avec l'évolution des temps de passage ainsi que de la corrélation positive toutefois moins forte ($r=0,6$) entre les évolutions de force maximale sur le SJ et les évolutions des temps de passage.

Cette étude a permis d'obtenir des informations précieuses quant à l'évolution des qualités physique dans l'eau et à sec au cours d'une saison pré-olympique sur une population réduite de nageurs de haut niveau. L'évaluation de ce type de population impose un certain nombre de contraintes nécessitant des choix et des adaptations et donc de potentielles limites dans la mise en place du protocole

expérimental. Notamment, le placement des sessions de mesures dépendait fortement des disponibilités du groupe, nageurs et entraîneurs, ce qui a conduit à une période d'entraînement plus importante entre T2 et T3 qu'entre T1 et T2. Une session de mesure supplémentaire entre T2 et T3 aurait éventuellement permis de mettre en lumière des variations plus précises et de pouvoir comparer plus facilement ces évolutions avec celles qui ont été constatées entre T1 et T2.

D'un point de vue méthodologique, il est également essentiel de souligner des points de vigilance concernant l'utilisation de certaines données. L'interprétation des données de F_{prop} est notamment basée sur le principe qu'à vitesse constante les valeurs de force de traînée active sont égales aux valeurs de force propulsive, mais ces données ne fournissent pas d'information sur le caractère instantané des forces propulsives. De plus, le seuil arbitrairement utilisé dans le calcul du SWC (0,2), bien que basé sur des valeurs précédemment employées en sciences du sport et en statistiques [Anderson et al., 2006; Cohen, 1988], correspond à une magnitude de changement observé relativement faible. Ce seuil semble adapté à la population de haut niveau pour laquelle les évolutions se trouvent généralement autour de cette valeur seuil choisie. Toutefois, il est légitime de s'interroger sur sa capacité à représenter des changements véritablement utiles sur d'autres populations comme le suggèrent des travaux antérieurs ayant employé des seuils plus élevés (0,5 puis 0,3) [Hopkins, 2004]

Apports de cette étude pour la thèse

Cette étude, présentant les évolutions des résultats issus des profilages F-V à sec et L-V dans l'eau sur des nageurs de très haut niveau, a permis de tirer des informations utiles dans le cadre d'une éventuelle application pratique, que ce soit dans le champ de la préparation physique, de l'entraînement dans l'eau ou du transfert entre les deux environnements. Il semble tout d'abord que, malgré une orientation du travail identique pour tous les exercices de préparation physique impliquant les membres supérieurs, nous puissions observer des évolutions différentes en fonction des exercices testés. Néanmoins, nous pouvons aussi remarquer que l'entraînement spécifique d'une zone de vitesse du spectre F-V à sec peut avoir des effets précis sur les qualités incluses dans cette zone (amélioration de la force maximale suite à un entraînement à des vitesses faibles ou amélioration de la vitesse maximale suite à un entraînement à des vitesses élevées). De plus, il est possible d'observer des évolutions à sec qui ne semblent pas se retrouver dans l'eau ainsi que des évolutions dans l'eau qui ne semblent pas être le fruit d'évolutions constatées à sec. Cela pourrait s'expliquer par les délais de transfert entre les deux environnements, constituant une dimension fondamentale de la périodisation des entraînements à sec et dans l'eau.

DISCUSSION GÉNÉRALE

1. Principaux résultats

Cette thèse visait à approfondir la compréhension du transfert des programmes d'entraînement à sec vers l'optimisation de la performance en natation de sprint. Pour atteindre cet objectif, cinq contributions originales, sous la forme d'études expérimentales situées à l'interface entre la recherche scientifique et les applications pratiques, ont été réalisées.

La première étude a permis de recenser les pratiques des préparateurs physiques et entraîneurs de haut niveau en natation en France. Ces pratiques ont révélé que les mouvements traditionnels de la force tels que le développé-couché, les tractions ou les squats étaient les mouvements parmi les plus souvent prescrits par les répondants au questionnaire. De même, les qualités de force et de puissance étaient parmi les plus souvent prescrites par les préparateurs physiques et entraîneurs. La périodisation de ces différentes qualités physiques semblait partir de la force maximale pour aller vers la vitesse maximale à l'approche des compétitions cibles. Seuls 38 % des participants ont indiqué utiliser des outils électroniques permettant l'évaluation de la vitesse, de la force et de la puissance produites sur les mouvements en préparation physique.

La seconde étude a permis de mettre en lien les paramètres issus des profilages L-V dans l'eau ainsi que des paramètres complémentaires à l'analyse de la propulsion du nageur tel que η_P et IVV avec la performance et les paramètres de nage en course sur 100 m et 200 m nage libre. SR sur 100 m a été montré comme particulièrement corrélé à rL_0 ($r = 0,83$; $p = 0,02$), paramètre lui-même lié aux capacités d'application de la force lors de la nage [Gonjo et al., 2020]. Cette étude a également permis de mettre en avant des différences de profils hydrodynamiques entre des nageurs produisant une même vitesse de nage en course.

La troisième étude a permis de mettre en lien les paramètres issus des profils L-V dans l'eau et les paramètres issus des profils F-V à sec. De ces résultats sont ressortis des liens beaucoup plus forts et significatifs entre la $F_{\max}$, comparés à la $V_{\max}$, des différents exercices mesurés à sec et les paramètres L-V dans l'eau. Ce lien s'exprimait particulièrement sur le TV.

La quatrième étude a permis de montrer que le travail en force maximale à sec avait un impact plus important sur les capacités d'application de la force dans l'eau (+ 6,03 % ; $p = 0,09$ pour rL_0) que sur la vitesse maximale dans l'eau (+ 1,48 % ; $p = 0,13$ pour V_0) au bout de 6 semaines. L'entraînement en force à sec n'a pas eu d'influence significative sur le coefficient de traînée (+ 0,78 % ; $p = 0,42$ pour K_a).

Enfin, la cinquième et dernière étude a révélé l'utilité du profilage F-V à sec et L-V dans l'eau afin de monitorer les capacités de force, de vitesse et de puissance des nageurs à sec et dans l'eau, ainsi que des résistances à l'avancement lors de la nage sur des nageurs de haut niveau. Les résultats ont

montré des évolutions significatives correspondant pour certaines à un entraînement spécifique du paramètre mesuré. Certaines de ces évolutions ont également présenté un lien fort avec des facteurs de performance en compétition, notamment sur la phase de départ.

Ainsi ces résultats offrent des applications pratiques et scientifiques à l'amélioration du processus d'évaluation des qualités physiques et techniques des nageurs, aussi bien à sec que dans l'eau. Il peut notamment être noté que le profilage L-V réalisé in situ est une méthode peu invasive et peu contraignante pour les nageurs et entraîneurs, fournissant des informations précieuses quant aux qualités propulsives et l'hydrodynamisme des nageurs, qui représentent des qualités en lien avec la performance et certains paramètres de nage en course telle que SR et SL. De même, les paramètres issus des profilages F-V à sec représentent des informations supplémentaires permettant de mesurer la progression des nageurs et d'estimer l'efficacité d'un programme d'entraînement à sec en vue d'optimiser le transfert des qualités exprimées ex situ vers la nage.

2. Limites

Malgré les nombreuses contributions scientifiques et pratiques de ce travail de thèse, il convient de mentionner certaines limites. En effet, certains des résultats exposés dans le cadre de cette thèse auraient probablement pu être exacerbés par des durées d'intervention ou de suivi plus longues. Concernant l'étude n°4 sur les effets d'un entraînement à sec sur les paramètres F-V et L-V, ainsi que l'étude n°5 sur le suivi des paramètres F-V et L-V, les résultats nous ont notamment permis de mettre en lumière le temps de latence que l'on peut observer entre le développement des qualités de force à sec et leur contribution à l'amélioration des facteurs de performance in situ. Ce constat est apparu logique au regard de précédents travaux qui ont mis en évidence ce phénomène [Amaro et al., 2017; Morais et al., 2018] mais les durées des études, influencées par la conception du protocole et les objectifs des études, ne nous ont pas permis de quantifier le temps nécessaire afin d'observer des améliorations de la vitesse dans l'eau dues à l'entraînement des qualités à sec. Cette limite, prévisible dès le début des études, n'a pour autant pas pu être surmontée en raison des contraintes inhérentes au terrain et notamment à celles du haut niveau. Concernant la cinquième et dernière étude, la mise en place des sessions de mesure était en effet conditionnée par le calendrier chargé du groupe étudié, particulièrement à l'approche des échéances de qualification aux JOP de Paris 2024. Cette période n'a pas offert suffisamment d'opportunités pour planifier une session de mesure supplémentaire.

Une autre limite concerne la population restreinte ciblée par la majorité de ces travaux. En effet, même si les nageurs de sprint se distinguent par des niveaux de puissance plus élevés que ceux des nageurs spécialisés sur des épreuves mixtes (200 / 400 m) en raison de la durée d'effort, ces épreuves mixtes semblent elles-aussi influencées par les paramètres de force à sec. Certaines études ont par exemple montré des liens forts entre la force ainsi que la puissance à sec et la performance sur des

épreuves mixtes [Chalkiadakis et al., 2023; Platzer et al., 2009]. De même, l'entraînement en résistance à sec a montré des effets positifs sur la performance sur ces distances [Aspenes et al., 2009; Potdevin et al., 2011; Schumann et al., 2020]. Néanmoins, les relations entre les paramètres mesurés à sec et la performance sur des épreuves mixtes sont moins importantes qu'avec la performance en sprint. Ces relations plus faibles peuvent probablement s'expliquer par le fait que les nageurs d'épreuves mixtes et d'épreuves de longue distance ont moins l'habitude du travail contre résistance à sec et expérimentent plutôt des séances de conditionnement métabolique [Pollock et al., 2019]. Il semble alors cohérent qu'un travail en force ou en puissance puisse avoir un impact conséquent sur la performance de ces nageurs.

Ces arguments justifient l'intérêt porté aux nageurs de sprint lors de ces travaux de thèse mais permettent également d'ouvrir des perspectives pour de futurs travaux. Par exemple, les effets d'une intervention en préparation physique pour des nageurs de distances supérieures pourraient être analysés à travers l'évaluation de paramètres tels que la fatigue musculaire et la vitesse critique [Dekerle & Paterson, 2016] ou encore l'efficacité énergétique, en impliquant des mesures de VO_2 ou d'autres variables métaboliques [Zamparo et al., 2005]. Des applications à des disciplines annexes à la natation course, comme les disciplines en eau libre pourraient par exemple être envisagées. L'intérêt porté à ce sujet par d'autres recherches du laboratoire M2S, comme l'analyse des variables cinématiques in situ par centrale inertielle [Bouvet et al., 2023] pourrait ainsi permettre de croiser ces approches.

3. Perspectives

L'objectif de cette thèse était d'apporter une contribution scientifique et pratique à l'optimisation des programmes d'entraînement à sec et dans l'eau. Cette contribution était abordée par le biais de la compréhension des pratiques de terrain, des mécanismes biomécaniques et des aspects méthodologiques de l'entraînement et de l'évaluation des nageurs. Nous pouvons donc distinguer deux axes d'application pratique de ces travaux. D'une part, nous proposons des recommandations pour l'évolution des pratiques d'évaluation des nageurs de sprint dans l'optique d'identifier leurs habiletés techniques et d'individualiser l'entraînement. D'autre part, nous proposons également d'envisager une approche différente des pratiques de transfert entre les programmes d'entraînement en préparation physique à sec et l'entraînement en natation.

Pour l'évolution des pratiques d'évaluation

Une attention particulière d'aide à la décision envers les entraîneurs et préparateurs physiques a été portée pendant toute la durée de cette thèse. Cette attention particulière concerne la rapidité avec laquelle les comptes-rendus étaient transmis, mais également l'individualisation des rapports en fonction des informations et des modes de visualisation auxquels les entraîneurs étaient sensibles. Une perspective afin d'améliorer les pratiques d'évaluation implique donc cet aspect primordial de la communication entre l'évaluateur et l'entraîneur susceptible d'amplifier les bénéfices de ces pratiques

[Torres-Ronda & Curtis, 2024]. La recherche perpétuelle d'amélioration de ce processus peut par exemple passer par :

- la mise en place de mesures réalisables directement par l'entraîneur via le développement d'outils intuitifs et de protocoles simples.
- l'amélioration de la rapidité de transmission d'information via le développement de systèmes de traitement de données automatisés et / ou optimisés.
- l'amélioration de la compréhension des résultats via une vulgarisation et visualisation des données individualisées en fonction des entraîneurs.

De plus, d'autres aspects méthodologiques peuvent également conduire à des perspectives d'amélioration du processus d'évaluation. Par exemple, les charges utilisées dans le cadre des profilages L-V dans l'eau lors de ces travaux de thèse ont été choisies en fonction des recommandations scientifiques ainsi qu'à l'égard de certains aspects pratiques de l'évaluation. Le choix de ces charges ainsi que le traitement des données suivaient donc les recommandations faites dans la littérature en termes d'impact sur le pattern de nage ainsi qu'en termes de fiabilité de la mesure, notamment pour l'estimation des paramètres de traînée active [Dominguez-Castells & Arellano, 2012; Gonjo & Olstad, 2022; Keller et al., 2024]. Néanmoins, nos travaux suggèrent qu'une charge n'a pas les mêmes effets en termes de perturbation des vitesses (supposée être dans une gamme de perturbation de 5 à 10 % [Kolmogorov & Duplishcheva, 1992]) en fonction du niveau et de la masse corporelle des nageurs testés, ce qui impacte potentiellement la détermination des paramètres résistifs tels que D_a ou encore K_a . En effet, certains auteurs ont relevé des valeurs incohérentes de D_a lorsqu'elles étaient obtenues à partir du MAD-System et de la SPM, suggérant que l'égalité de la puissance produite n'était pas respectée dans tous les tests effectués dans leur étude [Toussaint et al., 2004]. Ils ont également souligné que l'hypothèse d'une efficacité de propulsion égale dans la VPM pourrait être sujette à des violations si la résistance ajoutée était trop importante, bien qu'à notre connaissance, cela n'ait pas encore été étudié. Ainsi, au-delà de questionner l'utilisation de charges fixes pour tous les nageurs dans le cadre du profilage L-V, ces travaux de thèse permettent également de remettre en question l'utilisation d'une perturbation fixe de la vitesse lors du traitement des données en vue de la détermination des paramètres de traînée active.

Dans ce travail, nous avons utilisé un système à résistance motorisé, permettant l'ajout et le contrôle de la charge en vue de la nage contre une résistance externe, comme outil d'évaluation des nageurs. Toutefois, le développement de tels systèmes permet également de les envisager comme des outils d'entraînement. En effet, la nage contre résistance constitue, comme évoqué dans la première étude, un moyen utilisé par les entraîneurs afin d'améliorer le transfert entre les qualités développées à sec et la vitesse de nage, bien que peu d'études dans la littérature aillent dans ce sens. La précision ainsi que la facilité d'utilisation d'appareil comme le 1080 Sprint offrent alors l'opportunité de pouvoir

étudier les effets d'un entraînement contre résistance avec ces appareils, dans l'eau, sur le transfert des qualités à sec vers la nage. Cette approche a fait l'objet d'une précédente étude, de manière à évaluer l'effet d'un entraînement via des appuis fixes dans l'eau (pouvant toutefois dénaturer la nage), en utilisant le MAD-System non plus comme un outil d'évaluation de la propulsion des nageurs mais comme un outil d'entraînement [Toussaint & Vervoorn, 1990].

Les études menées dans le cadre de ce travail de thèse se sont intéressées aux facteurs biomécaniques de la performance en natation. Bien que les aspects énergétiques soient étroitement liés aux habiletés techniques du nageur, ces dernières sont évaluées au travers des paramètres biomécaniques [Barbosa et al., 2010] : notre analyse se cantonne donc à l'analyse des forces qui régissent le déplacement du nageur dans l'environnement aquatique. L'amélioration de la vitesse de déplacement du nageur, comme expliqué lors de la revue de littérature (cf. section 1 du cadre théorique), peut résulter d'une augmentation des forces propulsives, d'une diminution des forces de traînée, ou de ces deux paramètres conjointement [Gatta et al., 2016]. Le profilage L-V en natation permet la quantification de paramètres liés à la production de force propulsive (notamment L_0 et F_{prop}) et la création de force de traînée (notamment D_a et K_a) du nageur [Gonjo et al., 2020; Gonjo & Olstad, 2022]. Le défi pour l'amélioration de la performance consiste donc à optimiser cet équilibre entre ces deux aspects, notamment représenté par la vitesse maximale du nageur. Le travail réalisé lors de l'étude n°2 a notamment permis de mettre en évidence que des nageurs produisant une même performance pouvaient présenter des profils avec un équilibre différent entre propulsion et traînée. Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a permis d'identifier un équilibre optimal entre ces forces, cet équilibre restant difficile à objectiver car très individuel et multifactoriel (ressources physiques, hydrodynamisme, anthropométrie etc.). Nous pouvons néanmoins imaginer dans une future étude pouvoir déterminer pour un individu donné, si l'augmentation de ses capacités de propulsion serait plus avantageuse comparé à la diminution de ses forces de traînée pour l'amélioration de la performance ou inversement.

La compréhension de cet équilibre, et notamment de l'implication des capacités de propulsion des nageurs en situation de compétition passe généralement à travers l'analyse des paramètres de nage tels que SR et SL [Craig et al., 1985] qui sont parfois comparés aux profils F-V dans leur relation avec la vitesse de nage [Barbosa et al., 2010]. Les mesures de forces propulsives et de forces de traînée, à travers leur mise lien avec les paramètres et la vitesse de nage en compétition permettent donc de compléter l'identification des profils des différents nageurs et d'envisager des axes d'améliorations qui tiennent compte de ces profils.

La préparation physique à sec étant un outil permettant d'optimiser les paramètres aquatiques décrits précédemment et notamment les capacités propulsives du nageur, le suivi des qualités qu'il est possible de développer à sec apparaît alors comme primordial pour l'optimisation de la performance.

En effet, étant donné que ces progressions ne s’observent pas toujours directement sur la performance [Morais et al., 2018], le suivi des qualités à sec peut servir à s’assurer que l’entraînement en préparation physique a l’effet escompté sur les qualités spécifiques visées. Les résultats de ces travaux de thèse (étude n°4 et étude n°5) ainsi que les travaux d’autres auteurs sur ce sujet [Baena-Raya et al., 2021; Jiménez-Reyes et al., 2017] montrent que les paramètres issus du profilage F-V semblent pouvoir identifier ces effets. De même, la préparation physique à sec étant une méthode d’entraînement permettant de rajouter des contraintes que l’on ne retrouve pas dans l’eau [Wirth et al., 2022], un des défis de l’entraînement global en natation est de transférer les qualités acquises lors de la préparation physique à sec vers la nage. A partir des mesures relevées dans les deux conditions, il semble alors possible de quantifier ce transfert. Certains auteurs ont par exemple défini un moyen de calculer un ratio de transfert à partir des évolutions en pourcentage de la qualité entraînée en préparation physique à sec et de la qualité dont le développement était visé dans l’eau [Sadowski et al., 2020] selon l’équation 13.

$$\text{Ratio de transfert} = \frac{\text{évolution (\%) à sec}}{\text{évolution (\%) dans l'eau}}$$

Etant donnée la multitude de paramètres évalués dans les deux conditions, nous pouvons par exemple imaginer évaluer, au travers de ce ratio, le transfert de la force maximale à sec ($F_{\max}$) vers les qualités de force dans l’eau (L_0) ou bien de la puissance maximale à sec ($P_{\max}$) vers la vitesse maximale dans l’eau (V_0). Ces ratios proposés peuvent ainsi dépendre des pratiques d’entraînement du préparateur physique ou de l’entraîneur en natation, sondées au préalable des mesures afin d’adapter le protocole et le compte-rendu des mesures. Il semble également important de garder à l’esprit que des facteurs extérieurs peuvent intervenir dans l’évolution des paramètres mesurés dans les deux conditions, impactant ainsi de manière indirecte le ratio de transfert.

Pour résumer, les évaluations combinées des paramètres issus du profilage F-V en préparation physique et des paramètres propulsifs et résistifs issus du profilage L-V en natation seraient alors un moyen (1) d’évaluer les profils hydrodynamiques des nageurs et leur caractéristiques individuelles, (2) d’établir des axes d’amélioration concernant les habiletés techniques du nageur à produire des forces propulsives importantes et efficaces, tout en réduisant au maximum les forces de traînées, (3) de quantifier l’efficacité des programmes d’entraînement à sec ayant notamment pour but la modification de ces habiletés techniques, (4) de quantifier la proportion de transfert entre les qualités travaillées à sec et l’amélioration des habiletés visées dans l’eau ainsi que la latence de cet évènement.

Les pratiques d’évaluation ayant en partie pour objectif de guider la préparation du sportif, les principaux résultats de ces travaux de thèse pourraient donc avoir un impact sur l’évolution des pratiques d’entraînement également.

Pour l'évolution des pratiques d'entraînement

Les travaux de cette thèse peuvent appuyer une approche à priori légèrement différente de la vision globale du transfert de force entre la préparation physique à sec et la nage. Cette vision globale, aussi appelée “approche générale”, consiste à aborder la performance comme un transfert direct entre la préparation physique générale et l'action spécifique [Bondarchuk, 2007].

Dans le cas de la natation, cette approche sépare donc l'entraînement du nageur en deux conditions distinctes : la préparation physique à sec et la nage. Plus spécifiquement, la préparation physique à sec est constituée essentiellement d'un travail en force maximale soutenu par certains auteurs comme le moyen nécessaire à l'amélioration de la puissance globale du nageur [Wirth et al., 2022]. Les mouvements traditionnels de développement de la force (le DC ou le Squat par exemple) seraient ainsi recommandés [Rodeo, 1984], invoquant qu'il est inutile de vouloir se rapprocher du mouvement spécifique de l'activité puisque les contraintes ne pourraient jamais correspondre entièrement à celles que l'on retrouve lors de la nage [Bryant, 1988]. Toutefois, le travail de puissance à sec réalisé avec des charges intermédiaires semble peu pertinent dans cette vision du transfert, car ces charges s'avèrent trop élevées pour favoriser efficacement le développement de la vitesse et trop faibles pour le développement de la force [Lyttle & Ostrowski, 1994; O'Shea & O'Shea, 1991]. Cette approche consiste donc à appréhender le transfert comme la translation du travail en force maximale directement vers la puissance telle que retrouvée dans les conditions spécifiques de nage en sprint (Figure 47)

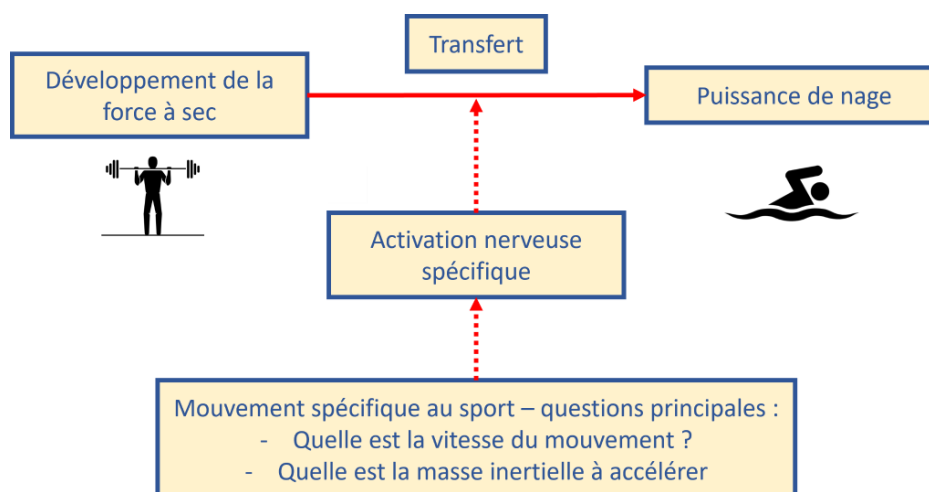


Figure 47 : Approche générale du transfert entre la préparation physique et la nage telle qu'illustrée dans la littérature (adapté de Wirth et al., 2022)

Cependant, les résultats des études n°1 et n°5 montrent que les pratiques en préparation physique à sec chez les nageurs de haut niveau intègrent le développement de toutes les qualités, de la force maximale à la vitesse maximale en passant par le développement de la puissance maximale.

Toutes ces qualités sont ensuite transférées dans l'eau, sous la forme d'un travail de nage contre résistance, de vitesse en sprint ou de survitesse (cf. Etude n°1, Figure 33).

Une nouvelle approche du transfert de force en natation consisterait donc à aborder la problématique sous la forme d'un double continuum. En effet, le spectre F-V pourrait ainsi être couplé à la continuité de la spécificité d'une tâche allant de la préparation générale à l'action spécifique réalisée compétition (Figure 48).

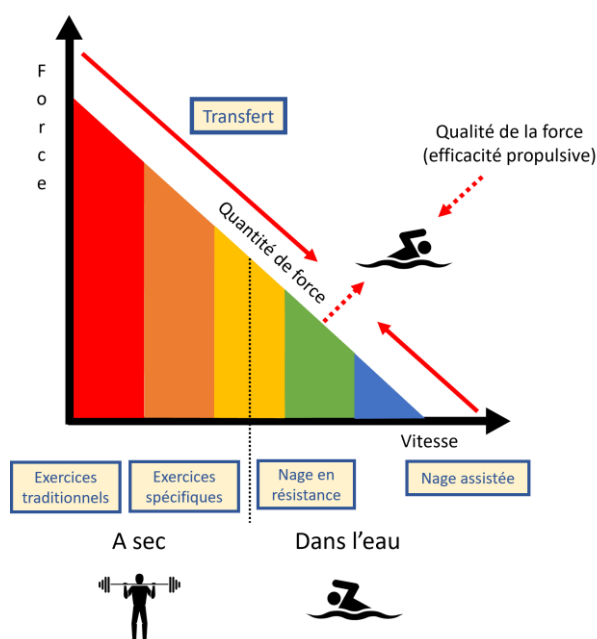


Figure 48 : Modèle proposé afin d'optimiser le transfert de force entre les différentes formes d'entraînement des nageurs

Le premier continuum, représenté par la relation F-V a été illustré tout au long de ce travail de thèse. Le second continuum est illustré dans certains ouvrages comme une pyramide constituée d'exercices d'entraînement [Bondarchuk, 2007]. La base de cette pyramide est la tâche de compétition. Nous retrouvons ensuite l'exercice de développement spécifique qui présente une variation par rapport à l'exercice de compétition afin de modifier le stimulus appliqué au développement de l'athlète. L'exercice de préparation spécifique intervient ensuite dans une condition éloignée de l'exercice de compétition (en préparation physique à sec par exemple), mais l'exercice doit, grâce à un certain nombre de paramètres tels que l'orientation ou l'amplitude d'expression de la force, rester en lien avec l'exercice de compétition. La pointe de cette pyramide est constituée de l'exercice de préparation générale, qui n'est pas nécessairement en lien avec l'exercice de compétition mais qui doit viser le développement d'une qualité physique nécessaire au développement de l'athlète. Les paramètres influençant la spécificité de l'exercice sont nombreux. L'amplitude et la direction du mouvement en référence à la partie du corps adjacente, la région d'application de la force, le régime de contraction

ainsi que le taux et le temps d'application de la force sont des facteurs sur lesquels il est possible de s'appuyer afin de faire correspondre un exercice de préparation à un exercice spécifique [Verkhoshansky & Siff, 2009]. Il semble toutefois important de garder à l'esprit que la correspondance entre les exercices de préparation et la tâche de compétition en natation diffère en fonction des individus, notamment à cause d'une variabilité inter-individuelle des activations musculaires principales élevée [Crowley, 2020].

La dynamique de l'exercice en tant que paramètre de spécificité nous intéresse particulièrement puisque c'est le paramètre qui permet de mettre en lien le continuum de spécificité avec la relation F-V. En effet la dynamique de l'effort est un paramètre en partie contraint par la résistance rencontrée sur le mouvement. Cette résistance va elle-même influencer les niveaux de force et de vitesse développés pour une résistance donnée, ce qui va placer le mouvement à la fois sur le continuum de spécificité et sur le spectre F-V. Cette approche est notamment fondée sur plusieurs résultats de ce travail de thèse qui viennent justifier l'utilisation d'une telle vision pour le transfert entre la préparation physique à sec et la nage. Les liens forts de la performance avec la force, et par-dessus tout avec la puissance mesurée sur des tâches non spécifiques (étude n°3 - [Cronin & Hansen, 2005]), ainsi que le lien faible entre la vitesse mesurée sur des tâches non spécifiques et la performance (étude n°3 - [Junge et al., 2021]), permettent d'envisager la scission du spectre F-V en deux, la condition d'entraînement en préparation physique à sec étant principalement axé autour du développement de la force et de la puissance. De même, des résultats indiquent que les adaptations en force et en puissance sont spécifiques à la vitesse travaillée (étude n°4 et 5 - [Behm & Sale, 1993]). Dès lors, le transfert entre le travail de force maximale à sec (correspondant à des vitesses faibles) et la situation de compétition de compétition (correspondant à des vitesses élevées) ne pourrait se faire qu'au travers des zones de vitesse intermédiaire. Ce principe explique notamment les résultats issus de plusieurs études (étude n°4 - [Amaro et al., 2017]) indiquant que les améliorations de force à basse vitesse développées à sec se retrouvent rapidement sur la force dans l'eau mais pas sur les capacités de vitesse maximale de nage. Ces faits, corroborés par de précédentes études, semblent donc présenter l'entraînement des extrémités du double continuum (l'entraînement en force maximale sur des mouvements généraux par exemple) comme les moyens optimaux de développer les zones intermédiaires du continuum (la puissance maximale à sec par exemple). L'entraînement de ces zones intermédiaires du double continuum représenterait donc les conditions fondamentales du transfert de la force vers la vitesse, et du général vers le spécifique.

Un autre aspect est en revanche à prendre en compte dans cette approche du transfert entre la préparation physique et la performance. Comme il a été souligné précédemment, l'amélioration de la performance suite à un travail en force n'est pas instantané [Amaro et al., 2017; Morais et al., 2018]. La vision proposée ci-dessus ne permet pas d'expliquer entièrement cette latence de transfert puisqu'il a été montré que le travail en force induit néanmoins des adaptations sur la nage en sprint. Il a

notamment été montré que le SR, qui représente la capacité du nageur à appliquer une force à une vitesse de déplacement de la main donnée, était amélioré suite à un travail de la force à sec [Kwok et al., 2021; Lopes et al., 2021]. Le travail d'une force à basse vitesse à sec est donc bien transféré vers la force à haute vitesse dans l'eau. Cependant, la vitesse de nage étant le produit de la fréquence de nage (SR) et de l'amplitude de nage (ou distance par cycle ; SL), l'amélioration de SR avec un travail à sec ne doit donc pas impacter négativement SL. Ainsi, pour que ce transfert de force se traduise par une amélioration de la performance (c'est-à-dire la vitesse de déplacement du corps entier), des paramètres tels que l'efficacité propulsive, elle-même liée à SL [Toussaint, 1990], doivent être pris en compte.

Pour résumer, cette approche propose de voir le transfert autrement que la simple translation d'un travail à sec vers la performance en apportant une continuité dans la spécificité du travail et en intégrant le transfert de la force à basse vitesse à sec vers la force spécifique à vitesse de course. Outre l'aspect quantitatif du niveau de force appliquée à la nage, l'aspect qualitatif de ce transfert, notamment représenté par l'efficacité propulsive, semble également entrer en jeu.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La préparation physique à sec s'est imposée comme un élément incontournable de la préparation des nageurs, en particulier pour les épreuves de sprint. Elle vise non seulement à améliorer la performance par le développement des qualités physiques spécifiques, mais aussi à réduire les risques de blessures. Cette thèse a exploré une problématique centrale qui concerne le transfert des gains obtenus par l'entraînement hors de l'eau vers la performance en natation. Pour fournir des éléments de réponse à cette problématique, une série d'études expérimentales a été menée en s'appuyant sur des outils méthodologiques tels que le profilage F-V à sec et le profil L-V en natation.

Les études de cette thèse ont confirmé l'existence de relations significatives entre certains paramètres à sec, tels que la force maximale et la puissance, et des variables de performance en natation. En particulier, les exercices ciblant les groupes musculaires du haut du corps, comme le tirage vertical, se sont révélés particulièrement pertinents pour évaluer indirectement les capacités de propulsion des nageurs. Ces résultats corroborent des études antérieures montrant que les capacités de force à sec peuvent jouer un rôle clé dans la performance en sprint.

L'une des contributions majeures de ce travail réside dans l'analyse des effets d'un programme de force maximale hors de l'eau sur les paramètres issus de profilage F-V à sec et L-V dans l'eau. Les résultats montrent que, bien que cet entraînement conduise à une augmentation significative de la force maximale et de la puissance hors de l'eau, ses effets à court terme sur la vitesse maximale en natation restent limités. Cette observation suggère que le transfert optimal des gains de force à sec nécessite un délai d'adaptation, pendant lequel les nageurs doivent assimiler ces nouvelles capacités dans l'environnement aquatique spécifique.

L'introduction de l'évaluation des forces de traînée active (D_a) et du coefficient de traînée (K_a), sur la base de la relation L-V dans l'eau et de la méthode de petites perturbations de vitesses (SPM), a permis d'explorer l'impact potentiel de l'entraînement en force sur les paramètres hydrodynamiques des nageurs. Alors que l'entraînement à sec a favorisé l'amélioration des capacités de propulsion, certaines variations des paramètres de traînée ont été observées, soulignant l'implication de paramètres concernant la technique de nage dans l'optimisation de l'utilisation des capacités physiques développées en vue de l'optimisation de la performance en natation.

Enfin, le suivi longitudinal des paramètres issus du profilage F-V à sec et L-V dans l'eau a mis en évidence des tendances intéressantes concernant les adaptations à l'entraînement en préparation physique et leur interaction avec les phases d'entraînements spécifiques en natation. Les profils L-V dans l'eau et F-V à sec se sont révélés être des outils particulièrement efficaces pour monitorer ces évolutions et ajuster les paramètres d'entraînement en fonction des résultats des évaluations.

Applications pratiques des résultats

Les résultats de cette thèse, combinés aux conclusions des études présentées lors de la revue de littérature, offrent des pistes concrètes pour les entraîneurs et préparateurs physiques. En particulier :

- Des nageurs produisant une performance semblable peuvent présenter des capacités de propulsion et des forces de traînée différentes. Ces différences de profils semblent dépendre de la distance de course évaluée.
- Concernant les profils charge-vitesse dans l'eau, une charge maximale élevée (représentant les qualités de force dans l'eau) mais une vitesse maximale faible dans l'eau pourrait représenter un transfert inefficace de la force à basse vitesse vers la force à haute vitesse ou bien une technique de nage produisant des forces de traînée trop importantes.
- L'ordre entre les séances d'entraînement en préparation physique et en natation, lorsqu'elles sont placées dans la même journée, semble avoir peu d'importance tant que le temps de récupération entre les deux séances est assez long ($> 2h$).
- La condition dans laquelle les adaptations visées sont prioritaires (gain de force en préparation physique par exemple) devrait être placée en premier si le temps de récupération entre les séances ne peut pas être allongé.
- La force maximale et la puissance maximale à sec semblent être les qualités à développer en priorité lors de l'entraînement en préparation physique à sec au vu de leur lien particulièrement fort avec la vitesse et la force de nage.
- De même, le tirage vertical ou les tractions, semblent être les mouvements les plus adaptés à l'amélioration des qualités de force à sec au vu de leur lien particulièrement fort avec les facteurs de performance aquatique.
- L'entraînement en préparation physique semble avoir un impact conséquent sur la zone de vitesse impliquée (les vitesses faibles pour l'entraînement en force maximale par exemple) mais un impact limité sur les zones de vitesses plus éloignées (les vitesses élevées pour l'entraînement en force maximale).
- Le développement de la force maximale à sec se retranscrit dans l'eau sous la forme d'une amélioration de la capacité à appliquer une force dans l'eau, généralement illustrée par une augmentation de la fréquence de nage. En revanche, l'amélioration de la vitesse semble se manifester avec un certain délai.
- Le développement de la force ne semble pas avoir d'impact négatif direct sur les résistances à l'avancement, néanmoins il pourrait freiner l'amélioration de la technique de nage notamment à cause d'interférence avec un volume de nage trop élevé.

RÉFÉRENCES

- Abbott, S., En Leong, W., Gwinn, T., Postiglione, G. L., Salter, J., & Cobley, S. (2022). The Longitudinal Mediating Influence of Maturation on the Relationship Between Strength and Performance in Male Youth Swimmers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 18(1), 61–68. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2022-0193>
- Abernethy, P., Wilson, G., & Logan, P. (1995). Strength and Power Assessment: Issues, Controversies and Challenges. *Sports Medicine*, 19(6), 401–417. <https://doi.org/10.2165/00007256-199519060-00004>
- Alcazar, J., Csapo, R., Ara, I., & Alegre, L. M. (2019). On the Shape of the Force-Velocity Relationship in Skeletal Muscles: The Linear, the Hyperbolic, and the Double-Hyperbolic. *Frontiers in Physiology*, 10, 769. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00769>
- Alexander, R. M. (1977). Swimming. In R. M. Alexander & G. Goldspink (Eds.), *Mechanics and Energetics of Animal Locomotion* (pp. 222–248). Chapman and Hall.
- Alonso-Aubin, D. A., Chulvi-Medrano, I., Cortell-Tormo, J. M., Picón-Martínez, M., Rial Rebullido, T., & Faigenbaum, A. D. (2021). Squat and Bench Press Force-Velocity Profiling in Male and Female Adolescent Rugby Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(1), S44–S50. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003336>
- Amara, S., Barbosa, T. M., Chortane, O. G., Hammami, R., Attia, A., Chortane, S. G., & van den Tillaar, R. (2022). Effect of Concurrent Resistance Training on Lower Body Strength, Leg Kick Swimming, and Sport-Specific Performance in Competitive Swimmers. *Biology*, 11(2), 299. <https://doi.org/10.3390/biology11020299>
- Amara, S., Barbosa, T. M., Negra, Y., Hammami, R., Khalifa, R., & Chortane, S. G. (2021). The Effect of Concurrent Resistance Training on Upper Body Strength, Sprint Swimming Performance and Kinematics in Competitive Adolescent Swimmers. A Randomized Controlled Trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(19), 10261. <https://doi.org/10.3390/ijerph181910261>
- Amara, S., Chortane, O. G., Negra, Y., Hammami, R., Khalifa, R., Chortane, S. G., & van den Tillaar,

- R. (2021). Relationship between Swimming Performance, Biomechanical Variables and the Calculated Predicted 1-RM Push-up in Competitive Swimmers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11395. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111395>
- Amara, S., Crowley, E., Sammoud, S., Negra, Y., Hammami, R., Chortane, O. G., Khalifa, R., Chortane, S. G., & van den Tillaar, R. (2021). What Is the Optimal Strength Training Load to Improve Swimming Performance? A Randomized Trial of Male Competitive Swimmers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(22), 11770. <https://doi.org/10.3390/ijerph182211770>
- Amara, S., Hammami, R., Zacca, R., Mota, J., Negra, Y., & Gaied Chortane, S. (2023). The effect of combining HIIT and dry-land training on strength, technique, and 100-m butterfly swimming performance in age-group swimmers: A randomized controlled trial. *Biology of Sport*, 40(1), 85–92. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2023.110747>
- Amaro, N. M., Marinho, D. A., Marques, M. C., Batalha, N. P., & Morouço, P. G. (2017). Effects of Dry-Land Strength and Conditioning Programs in Age Group Swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(9), 2447–2454. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001709>
- Amaro, N. M., Morouço, P. G., Marques, M. C., Batalha, N., Neiva, H., & Marinho, D. A. (2018). A systematic review on dry-land strength and conditioning training on swimming performance. *Science & Sports*, 34(1), e1–e14. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.07.003>
- Anderson, M. E., Hopkins, W. G., Roberts, A. D., & Pyne, D. B. (2006). Monitoring seasonal and long-term changes in test performance in elite swimmers. *European Journal of Sport Science*, 6(3), 145–154. <https://doi.org/10.1080/17461390500529574>
- Arellano, R., Brown, P., Cappaert, J., & Nelson, R. C. (1994). Analysis of 50-, 100-, and 200-m Freestyle Swimmers at the 1992 Olympic Games. *Journal of Applied Biomechanics*, 10(2), 189–199. <https://doi.org/10.1123/jab.10.2.189>
- Arsoniadis, G. G., Bogdanis, G. C., Terzis, G., & Toubekis, A. G. (2020). Acute Resistance Exercise: Physiological and Biomechanical Alterations During a Subsequent Swim Training Session.

International Journal of Sports Physiology and Performance, 15(1), 105–112.

<https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0897>

Arsoniadis, G. G., Botonis, P., Bogdanis, G. C., Terzis, G., & Toubekis, A. (2022). Acute and Long-Term Effects of Concurrent Resistance and Swimming Training on Swimming Performance.

Sports, 10(3), 29. <https://doi.org/10.3390/sports10030029>

Arsoniadis, G. G., Botonis, P. G., Bogdanis, G. C., Terzis, G., & Toubekis, A. G. (2024). Acute effects of dryland muscular endurance and maximum strength training on sprint swimming performance in young swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 42(10), 938–946. <https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2371580>

Asimakidis, N. D., Mukandi, I. N., Beato, M., Bishop, C., & Turner, A. N. (2024). Assessment of Strength and Power Capacities in Elite Male Soccer: A Systematic Review of Test Protocols Used in Practice and Research. *Sports Medicine*, 54(10), 2607–2644. <https://doi.org/10.1007/s40279-024-02071-8>

Askow, A. T., Stone, J. D., Arndts, D. J., King, A. C., Goto, S., Hannon, J. P., Garrison, J. C., Bothwell, J. M., Esposito, P. E., Jagim, A. R., Jones, M. T., Jennings, W., & Oliver, J. M. (2018). Validity and Reliability of a Commercially-Available Velocity and Power Testing Device. *Sports*, 6(4), 170. <https://doi.org/10.3390/sports6040170>

Aspenes, S. T., & Karlsen, T. (2012). Exercise-Training Intervention Studies in Competitive Swimming: *Sports Medicine*, 42(6), 527–543. <https://doi.org/10.2165/11630760-000000000-00000>

Aspenes, S. T., Kjendlie, P.-L., Hoff, J., & Helgerud, J. (2009). Combined strength and endurance training in competitive swimmers. *Journal of Sports Science & Medicine*, 8(3), 357–365.

Ayala, V., Martínez-Bebia, M., Latorre, J. A., Gimenez-Blasi, N., Jimenez-Casquet, M. J., Conde-Pipo, J., Bach-Faig, A., & Mariscal-Arcas, M. (2021). Influence of circadian rhythms on sports performance. *Chronobiology International*, 38(11), 1522–1536. <https://doi.org/10.1080/07420528.2021.1933003>

Baena-Raya, A., García-Mateo, P., García-Ramos, A., Rodríguez-Pérez, M. A., & Soriano-Maldonado, A. (2021). Delineating the potential of the vertical and horizontal force-velocity profile for

- optimizing sport performance: A systematic review. *Journal of Sports Sciences*, 40(3), 331–344. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1993641>
- Bailly, F., Ceglia, A., Michaud, B., Rouleau, D. M., & Begon, M. (2021). Real-Time and Dynamically Consistent Estimation of Muscle Forces Using a Moving Horizon EMG-Marker Tracking Algorithm—Application to Upper Limb Biomechanics. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 642742. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.642742>
- Balsalobre-Fernández, C., Glaister, M., & Lockey, R. A. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *Journal of Sports Sciences*, 33(15), 1574–1579. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.996184>
- Balsalobre-Fernández, C., Santos-Concejero, J., & Grivas, G. V. (2016). Effects of Strength Training on Running Economy in Highly Trained Runners: A Systematic Review With Meta-Analysis of Controlled Trials. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(8), 2361–2368. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001316>
- Bárány, M. (1967). ATPase Activity of Myosin Correlated with Speed of Muscle Shortening. *The Journal of General Physiology*, 50(6), 197–218. <https://doi.org/10.1085/jgp.50.6.197>
- Barbosa, T. M., Barbosa, A. C., Simbaña Escobar, D., Mullen, G. J., Cossor, J. M., Hodiérne, R., Arellano, R., & Mason, B. R. (2021). The role of the biomechanics analyst in swimming training and competition analysis. *Sports Biomechanics*, 1–18. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1960417>
- Barbosa, T. M., Bragada, J. A., Reis, V. M., Marinho, D. A., Carvalho, C., & Silva, A. J. (2010). Energetics and biomechanics as determining factors of swimming performance: Updating the state of the art. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2), 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.01.003>
- Barbosa, T. M., Costa, M. J., & Marinho, D. A. (2013). Proposal of a deterministic model to explain swimming performance. *International Journal of Swimming Kinetics*, 2(1), 1–54.
- Barbosa, T. M., Morais, J. E., Marques, M. C., Silva, A. J., Marinho, D. A., & Kee, Y. H. (2015). Hydrodynamic profile of young swimmers: Changes over a competitive season. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25(2). <https://doi.org/10.1111/sms.12281>

- Barnier, R. (2012). *The training of an Olympic champion*. FINA Swimming Coaches Golden Clinic, Moscow.
- Bar-Or, O. (1987). The Wingate Anaerobic Test: An Update on Methodology, Reliability and Validity. *Sports Medicine*, 4(6), 381–394. <https://doi.org/10.2165/00007256-198704060-00001>
- Barry, L., Lyons, M., McCreesh, K., Powell, C., & Comyns, T. (2022a). International survey of injury surveillance practices in competitive swimming. *Physical Therapy in Sport*, 57, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2022.07.001>
- Barry, L., Lyons, M., McCreesh, K., Powell, C., & Comyns, T. (2022b). International survey of training load monitoring practices in competitive swimming: How, what and why not? *Physical Therapy in Sport*, 53, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2021.11.005>
- Bartolomeu, R. F., Costa, M. J., & Barbosa, T. M. (2018). Contribution of limbs' actions to the four competitive swimming strokes: A nonlinear approach. *Journal of Sports Sciences*, 36(16), 1836–1845. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1423608>
- Bartolomeu, R. F., Rodrigues, P., Sokołowski, K., Strzała, M., Santos, C. C., Costa, M. J., & Barbosa, T. M. (2023). Nonlinear Analysis of the Hand and Foot Force-Time Profiles in the Four Competitive Swimming Strokes. *Journal of Human Kinetics*. <https://doi.org/10.5114/jhk/172616>
- Beattie, K., Kenny, I. C., Lyons, M., & Carson, B. P. (2014). The Effect of Strength Training on Performance in Endurance Athletes. *Sports Medicine*, 44(6), 845–865. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0157-y>
- Beelen, A., & Sargeant, A. J. (1991). Effect of fatigue on maximal power output at different contraction velocities in humans. *Journal of Applied Physiology*, 71(6), 2332–2337. <https://doi.org/10.1152/jappl.1991.71.6.2332>
- Behm, D. G., & Sale, D. G. (1993). Velocity Specificity of Resistance Training: *Sports Medicine*, 15(6), 374–388. <https://doi.org/10.2165/00007256-199315060-00003>
- Berg, A. (2018, November 12). *Michael Andrew explain his unique training system*. World Aquatics. <https://www.worldaquatics.com/news/1909002/michael-andrew-explains-his-unique-training-system->

- Berger, M. A. M. (1999). Determining propulsive force in front crawl swimming: A comparison of two methods. *Journal of Sports Sciences*, 17(2), 97–105. <https://doi.org/10.1080/026404199366190>
- Berger, M. A. M., Hollander, A. P., & De Groot, G. (1997). Technique and energy losses in front crawl swimming: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 29(11), 1491–1498. <https://doi.org/10.1097/00005768-199711000-00016>
- Bideau, B., Colobert, B., Nicolas, G., Guerroue, G., Multon, F., & Delamarche, P. (2003). *Development of an Active Drag Evaluation System (A.D.E.S.)*. 51–56.
- Bishop, C., Cree, J., Read, P., Chavda, S., Edwards, M., & Turner, A. (2013). Strength and Conditioning for Sprint Swimming. *Strength & Conditioning Journal*, 35(6), 1–6. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000019>
- Bishop, D., Burnett, A., Farrow, D., Gabbett, T., & Newton, R. (2006). Sports-Science Roundtable: Does Sports-Science Research Influence Practice? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(2), 161–168. <https://doi.org/10.1123/ijsp.1.2.161>
- Bishop, D. C., Smith, R. J., Smith, M. F., & Rigby, H. E. (2009). Effect of Plyometric Training on Swimming Block Start Performance in Adolescents. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(7), 2137–2143. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b866d0>
- Bissas, A., Paradisis, G. P., Nicholson, G., Walker, J., Hanley, B., Havenetidis, K., & Cooke, C. B. (2022). Development and Maintenance of Sprint Training Adaptations: An Uphill-Downhill Study. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(1), 90–98. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003409>
- Bixler, B., & Riewald, S. (2002). Analysis of a swimmer's hand and arm in steady flow conditions using computational fluid dynamics. *Journal of Biomechanics*, 35(5), 713–717. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(01\)00246-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(01)00246-9)
- Bobbert, M. F. (2012). Why is the force-velocity relationship in leg press tasks quasi-linear rather than hyperbolic? *Journal of Applied Physiology*, 112(12), 1975–1983. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00787.2011>
- Bobbert, M. F., & Van Soest, A. J. (1994). Effects of muscle strengthening on vertical jump height: A simulation study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 26(8), 1012–1020.

- Bollens, E., Annemans, L., Vaes, W., & Clarys, J. P. (1988). *Peripheral EMG comparison between fully tethered and free front crawl swimming* (B. E. Ungerechts, K. Wilke, & K. Reischle, Eds.; Vol. 18, pp. 173–182). Human Kinetics Books.
- Bondarchuk, A. P. (2007). *Transfer of Training in Sports*. Ultimate Athlete Concepts.
- Bosco, C., Luhtanen, P., & Komi, P. V. (1983). A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 50(2), 273–282. <https://doi.org/10.1007/BF00422166>
- Bosquet, L., Berryman, N., Dupuy, O., Mekary, S., Arvisais, D., Bherer, L., & Mujika, I. (2013). Effect of training cessation on muscular performance: A meta-analysis. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 23(3). <https://doi.org/10.1111/sms.12047>
- Bouvet, A., Pla, R., Delhay, E., Nicolas, G., & Bideau, N. (2023). Profiles of stroke regulations discriminate between finishing positions during international open water races. *Journal of Sports Sciences*, 41(13), 1309–1316. <https://doi.org/10.1080/02640414.2023.2268902>
- Bozzola, M., & Meazza, C. (2012). Growth Velocity Curves: What They Are and How to Use Them. In V. R. Preedy (Ed.), *Handbook of Growth and Growth Monitoring in Health and Disease* (pp. 2999–3011). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1795-9_180
- Bryant, C. (1988). *How to Develop Muscular Power*. Little Brown & Co.
- Bulgakova, N., & Vorontsov, A. (1978). *O prognozowanü sposobnostejw plawanü na osmowie longitudinalnych issledowani*. 7, 37–40.
- Burnley, M., & Jones, A. M. (2018). Power–duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *European Journal of Sport Science*, 18(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1249524>
- Cahill, M. J., Oliver, J. L., Cronin, J. B., Clark, K. P., Cross, M. R., & Lloyd, R. S. (2019). Influence of resisted sled-push training on the sprint force-velocity profile of male high school athletes. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 30(3), 442–449. <https://doi.org/10.1111/sms.13600>
- Calder, K. M., & Gabriel, D. A. (2007). Adaptations during familiarization to resistive exercise. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 17(3), 328–335.

<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2006.02.006>

- Capelli, C., Pendergast, D. R., & Termin, B. (1998). Energetics of swimming at maximal speeds in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 78(5), 385–393. <https://doi.org/10.1007/s004210050435>
- Carvalho, D. D., Monteiro, A. S., Fonseca, P., Silva, A. J., Vilas-Boas, J. P., Pyne, D. B., & Fernandes, R. J. (2023). Swimming sprint performance depends on upper/lower limbs strength and swimmers level. *Journal of Sports Sciences*, 1–11. <https://doi.org/10.1080/02640414.2023.2239610>
- Carvalho, D. D., Soares, S., Zacca, R., Marinho, D. A., Silva, A. J., Pyne, D. B., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2019). In-Water and On-Land Swimmers' Symmetry and Force Production. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24), 5018. <https://doi.org/10.3390/ijerph16245018>
- Cavagna, G. A., & Kaneko, M. (1977). Mechanical work and efficiency in level walking and running. *The Journal of Physiology*, 268(2), 467–481. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1977.sp011866>
- Cazorla, G. (1994). *Les facteurs de la performance en natation et leurs techniques d'évaluation*. 105–131.
- Chalkiadakis, I., Arsoniadis, G. G., & Toubekis, A. G. (2023). Dry-Land Force–Velocity, Power–Velocity, and Swimming-Specific Force Relation to Single and Repeated Sprint Swimming Performance. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 8(3), 120. <https://doi.org/10.3390/jfmk8030120>
- Chatard, J.-C., & Wilson, B. (2008). Effect of Fastskin Suits on Performance, Drag, and Energy Cost of Swimming. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(6), 1149–1154. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318169387b>
- Chollet, D., Delaplace, C., Pelayo, P., Tourny, C., & Sidney, M. (1997). Stroking Characteristic Variations in the 100-M Freestyle for Male Swimmers of Differing Skill. *Perceptual and Motor Skills*, 85(1), 167–177. <https://doi.org/10.2466/pms.1997.85.1.167>
- Clarys, J. P. (1988). *The Brussels swimming EMG project* (B. E. Ungerechts, K. Wilke, & K. Reischle, Eds.; Vol. 18, pp. 157–172). Human Kinetics Books.

- Coburn, J. W., & Malek, M. H. (2012). *NSCA's essentials of personal training* (National Strength & Conditioning Association (U.S.), Ed.; 2nd ed). Human Kinetics.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd Edition). Routledge.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780203771587/statistical-power-analysis-behavioral-sciences-jacob-cohen>
- Colyer, S. L., Stokes, K. A., Bilzon, J. L. J., Holdcroft, D., & Salo, A. I. T. (2018). Training-Related Changes in Force–Power Profiles: Implications for the Skeleton Start. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(4), 412–419. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0110>
- Cometti, G. (1989). *Les méthodes modernes de musculation*. Université de Dijon.
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2010). Adaptations in Athletic Performance after Ballistic Power versus Strength Training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(8), 1582–1598. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181d2013a>
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2011). Developing Maximal Neuromuscular Power: Part 1 – Biological Basis of Maximal Power Production. *Sports Medicine*, 41(1), 17–38. <https://doi.org/10.2165/11537690-000000000-00000>
- Cortesi, M., Gatta, G., Carmigniani, R., & Zamparo, P. (2024). Estimating Active Drag Based on Full and Semi-Tethered Swimming Tests. *Journal of Sports Science and Medicine*, 17–24. <https://doi.org/10.52082/jssm.2024.17>
- Cortesi, M., Gatta, G., Michielon, G., Di Michele, R., Bartolomei, S., & Scurati, R. (2020). Passive Drag in Young Swimmers: Effects of Body Composition, Morphology and Gliding Position. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6), 2002. <https://doi.org/10.3390/ijerph17062002>
- Costa, M. J., Santos, C. C., Ferreira, F., Arellano, R., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2023). Association between elite swimmers' force production and 100 m front crawl inter-lap pacing and kinematics. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1205800. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1205800>
- Costill, D., Kowaleski, J., Porter, D., Kirwan, J., Fielding, R., & King, D. (1985). Energy Expenditure During Front Crawl Swimming: Predicting Success in Middle-Distance Events. *International*

- Journal of Sports Medicine*, 06(05), 266–270. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025849>
- Counsilman, J. E. (1970). *The application of bernoulli's principle to human propulsion in water* (L. Lewillie & J. P. Clarys, Eds.; pp. 59–71). Université libre de Bruxelles Laboratoire de l'effort.
- Crago, P. E. (1992). Muscle input-output model: The static dependence of force on length, recruitment, and firing period. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 39(8), 871–874. <https://doi.org/10.1109/10.148397>
- Craig, A. B., Skehan, P. L., Pawelczyk, J. A., & Boomer, W. L. (1985). Velocity, stroke rate, and distance per stroke during elite swimming competition: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 17(6), 625–634. <https://doi.org/10.1249/00005768-198512000-00001>
- Crewther, B. T., Kilduff, L. P., Cunningham, D. J., Cook, C., Owen, N., & Yang, G.-Z. (2011). Validating Two Systems for Estimating Force and Power. *International Journal of Sports Medicine*, 32(04), 254–258. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1270487>
- Cronin, J. B., & Hansen, K. T. (2005). Strength and Power Predictors of Sports Speed. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(2), 349. <https://doi.org/10.1519/14323.1>
- Cross, M. R., Brughelli, M., Brown, S. R., Samozino, P., Gill, N. D., Cronin, J. B., & Morin, J.-B. (2015). Mechanical Properties of Sprinting in Elite Rugby Union and Rugby League. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(6), 695–702. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0151>
- Cross, M. R., Lahti, J., Brown, S. R., Chedati, M., Jimenez-Reyes, P., Samozino, P., Eriksrud, O., & Morin, J.-B. (2018). Training at maximal power in resisted sprinting: Optimal load determination methodology and pilot results in team sport athletes. *PLOS ONE*, 13(4), e0195477. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195477>
- Cross, M. R., Samozino, P., Brown, S. R., & Morin, J.-B. (2018). A comparison between the force–velocity relationships of unloaded and sled-resisted sprinting: Single vs. multiple trial methods. *European Journal of Applied Physiology*, 118(3), 563–571. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3796-5>
- Crowe, S. E., Babington, J. P., Tanner, D. A., & Stager, J. M. (1999). The relationship of strength to dryland power, swimming power, and swim performance. *Medicine & Science in Sports &*

Exercise, 31(Supplement), S255. <https://doi.org/10.1097/00005768-199905001-01227>

Crowley, E. (2020). *The Specificity of Dry-land Resistance Training Exercises to Swimming Performance* [University of Limerick]. doi: 10.13140/RG.2.2.27457.17760

Crowley, E., Harrison, A. J., & Lyons, M. (2017). The Impact of Resistance Training on Swimming Performance: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 47(11), 2285–2307. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0730-2>

Crowley, E., Harrison, A. J., & Lyons, M. (2018). Dry-Land Resistance Training Practices of Elite Swimming Strength and Conditioning Coaches. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(9), 2592–2600. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002599>

Cuenca-Fernández, F., Gay A., Ruiz-Navarro J.J., & Arellano R. (2020). The effect of different loads on semi-tethered swimming and its relationship with dry-land performance variables. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 20(1), 90–106. <https://doi.org/10.1080/24748668.2020.1714413>

Cuenca-Fernández, F., López-Contreras, G., & Arellano, R. (2015). Effect on Swimming Start Performance of Two Types of Activation Protocols: Lunge and YoYo Squat. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(3), 647–655. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000696>

Cuenca-Fernández, F., Ruiz-Teba, A., López-Contreras, G., & Arellano, R. (2020). Effects of 2 Types of Activation Protocols Based on Postactivation Potentiation on 50-m Freestyle Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(11), 3284–3292. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002698>

Cuk, I., Markovic, M., Nedeljkovic, A., Ugarkovic, D., Kukolj, M., & Jaric, S. (2014). Force–velocity relationship of leg extensors obtained from loaded and unloaded vertical jumps. *European Journal of Applied Physiology*, 114(8), 1703–1714. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-2901-2>

Cureton, T. K. Jr. (1975). Factors governing success in competitive swimming: A brief review of related studies. *American Sports Publishing Co*, 9–39.

Cureton, T. K. Jr., Collins, M. A., Hill, D. W., & Mcelhannon, F. M. (1988). Muscle hypertrophy in

- men and women: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 20(4), 338–344.
<https://doi.org/10.1249/00005768-198808000-00003>
- Damas, F., Phillips, S. M., Lixandrão, M. E., Vechin, F. C., Libardi, C. A., Roschel, H., Tricoli, V., & Ugrinowitsch, C. (2016). Early resistance training-induced increases in muscle cross-sectional area are concomitant with edema-induced muscle swelling. *European Journal of Applied Physiology*, 116(1), 49–56. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3243-4>
- Daniel, T. L. (1992). Efficiency in aquatic locomotion: Limitations from single cells to animals. In R. W. Blake (Ed.), *Efficiency and Economy in Animal Physiology* (pp. 83–96). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511565588.007>
- De Salles, B. F., Simão, R., Miranda, F., Da Silva Novaes, J., Lemos, A., & Willardson, J. M. (2009). Rest Interval between Sets in Strength Training: *Sports Medicine*, 39(9), 765–777. <https://doi.org/10.2165/11315230-000000000-00000>
- Dekerle, J., & Paterson, J. (2016). Muscle Fatigue When Swimming Intermittently Above and Below Critical Speed. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(5), 602–607. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0429>
- Dern, R. J., Levene, J. M., & Blair, H. A. (1947). Forces exerted at different velocities in human arm movements. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 151(2), 415–437. <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1947.151.2.415>
- Deschodt, V. J., Arsac, L. M., & Rouard, A. H. (1999). Relative contribution of arms and legs in humans to propulsion in 25-m sprint front-crawl swimming. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 80(3), 192–199. <https://doi.org/10.1007/s004210050581>
- Devismes, M., Aeles, J., Philips, J., & Vanwanseele, B. (2021). Sprint force-velocity profiles in soccer players: Impact of sex and playing level. *Sports Biomechanics*, 20(8), 947–957. <https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1618900>
- Di Prampero, P. E. (1986). The Energy Cost of Human Locomotion on Land and in Water. *International Journal of Sports Medicine*, 07(02), 55–72. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025736>
- Di Prampero, P. E. (2003). Factors limiting maximal performance in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 90(3–4), 420–429. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0926-z>

- Di Prampero, P. E., Pendergast, D., & Zamparo, P. (2011). Swimming economy (energy cost) and efficiency. *World Book of Swimming: From Science to Performance*, 297–312.
- Doma, K., Deakin, G. B., & Ness, K. F. (2013). Kinematic and electromyographic comparisons between chin-ups and lat-pull down exercises. *Sports Biomechanics*, 12(3), 302–313. <https://doi.org/10.1080/14763141.2012.760204>
- Dominguez-Castells, R. (2013). *Analysis of swimming power: Relationship with muscular power output, swimming technique and changes after training*. Universidad de Granada.
- Dominguez-Castells, R., & Arellano, R. (2012). Effect of Different Loads on Stroke and Coordination Parameters During Freestyle Semi-Tethered Swimming. *Journal of Human Kinetics*, 32(2012), 33–41. <https://doi.org/10.2478/v10078-012-0021-9>
- Dopsaj, M., Zuoziene, I. J., Milić, R., Cherepov, E., Erlikh, V., Masiulis, N., di Nino, A., & Vodičar, J. (2020). Body Composition in International Sprint Swimmers: Are There Any Relations with Performance? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 9464. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249464>
- Dos Santos, K., Pereira, G., Papoti, M., Bento, P. C., & Rodacki, A. (2013). Propulsive Force Asymmetry during Tethered-Swimming. *International Journal of Sports Medicine*, 34(07), 606–611. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1327575>
- Dos Santos, M. A. M., Henrique, R. S., Salvina, M., Silva, A. H. O., Junior, M. A. de V. C., Queiroz, D. R., Duncan, M. J., Maia, J. A. R., & Nevill, A. M. (2021). The influence of anthropometric variables, body composition, propulsive force and maturation on 50m freestyle swimming performance in junior swimmers: An allometric approach. *Journal of Sports Sciences*, 39(14), 1615–1620. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1891685>
- Douglas, J., Pearson, S., Ross, A., & McGuigan, M. (2017). Chronic Adaptations to Eccentric Training: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 47(5), 917–941. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0628-4>
- Dragunas, A. J., Dickey, J. P., & Nolte, V. W. (2012). The Effect of Drag Suit Training on 50-m Freestyle Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(4), 989–994. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31822d5404>

- Drenowatz, C., & Greier, K. (2019). Association of biological maturation with the development of motor competence in Austrian middle school students—A 3-year observational study. *Translational Pediatrics*, 8(5), 402–411. <https://doi.org/10.21037/tp.2019.09.03>
- Drey, M., Helmers, S., & Bauer, J. M. (2021). Measurement of Muscle Strength and Power. In A. J. Cruz-Jentoft & J. E. Morley (Eds.), *Sarcopenia* (1st ed., pp. 239–251). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119597896.ch18>
- Ebben, W. P., & Blackard, D. O. (2001). Strength and conditioning practices of National Football League strength and conditioning coaches. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(1), 48–58.
- Edman, K. A. (1988). Double-hyperbolic force-velocity relation in frog muscle fibres. *The Journal of Physiology*, 404(1), 301–321. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1988.sp017291>
- Edman, K. A., Mulieri, L. A., & Scubon-Mulieri, B. (1976). Non-Hyperbolic Force-Velocity Relationship in Single Muscle Fibres¹. *Acta Physiologica Scandinavica*, 98(2), 143–156. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1976.tb00234.x>
- Espada, M. C., Costa, M. J., Costa, A. M., Silva, A. J., Barbosa, T. M., & Pereira, A. F. (2016). Relationship Between Performance, Dry-land Power and Kinematics in Master Swimmers [PDF]. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*; 02/2016; ISSN 1509-409X. <https://doi.org/10.5277/ABB-00223-2014-02>
- Espada, M. C., Ferreira, C. C., Gamonales, J. M., Hernández-Beltrán, V., Massini, D. A., Macedo, A. G., Almeida, T. A. F., Castro, E. A., & Pessôa Filho, D. M. (2023). Body Composition Relationship to Performance, Cardiorespiratory Profile, and Tether Force in Youth Trained Swimmers. *Life*, 13(9), 1806. <https://doi.org/10.3390/life13091806>
- Eysenbach, G. (2004). Improving the Quality of Web Surveys: The Checklist for Reporting Results of Internet E-Surveys (CHERRIES). *Journal of Medical Internet Research*, 6(3), e34. <https://doi.org/10.2196/jmir.6.3.e34>
- Fédération Française de Natation. (2019a). *Projet de développement fédéral*.
- Fédération Française de Natation. (2019b, April). Au tour des filles de briller. *Natation Magazine*, 188, 52.

- Fédération Française de Natation. (2024). *Règlement Natation Course 2024*.
<https://www.ffnatation.fr/reglements-natation-course>
- Fitts, R. H., McDonald, K. S., & Schluter, J. M. (1991). The determinants of skeletal muscle force and power: Their adaptability with changes in activity pattern. *Journal of Biomechanics*, 24, 111–122. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(91\)90382-W](https://doi.org/10.1016/0021-9290(91)90382-W)
- Fone, L., & van den Tillaar, R. (2022). Effect of Different Types of Strength Training on Swimming Performance in Competitive Swimmers: A Systematic Review. *Sports Medicine - Open*, 8(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00410-5>
- Formosa, D. P., Toussaint, H. M., Mason, B. R., & Burkett, B. (2012). Comparative Analysis of Active Drag Using the MAD System and an Assisted Towing Method in Front Crawl Swimming. *Journal of Applied Biomechanics*, 28(6), 746–750. <https://doi.org/10.1123/jab.28.6.746>
- Foster, C., Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., Doleshal, P., & Dodge, C. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(1), 109–115.
- Fyfe, J. J., Bishop, D. J., & Stepto, N. K. (2014). Interference between Concurrent Resistance and Endurance Exercise: Molecular Bases and the Role of Individual Training Variables. *Sports Medicine*, 44(6), 743–762. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0162-1>
- García Ramos, A., Pérez Castilla, A., & Jaric, S. (2018). Optimisation of applied loads when using the two-point method for assessing the force-velocity relationship during vertical jumps. *Sports Biomechanics*, 20. <https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1545044>
- García-Ramos, A. (2023). The 2-Point Method: Theoretical Basis, Methodological Considerations, Experimental Support, and Its Application Under Field Conditions. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 18(10), 1092–1100. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2023-0127>
- García-Ramos, A., Jaric, S., Padial, P., & Feriche, B. (2016). Force–Velocity Relationship of Upper Body Muscles: Traditional Versus Ballistic Bench Press. *Journal of Applied Biomechanics*, 32(2), 178–185. <https://doi.org/10.1123/jab.2015-0162>
- García-Ramos, A., Tomazin, K., Feriche, B., Strojnik, V., de la Fuente, B., Argüelles-Cienfuegos, J.,

- Strumbelj, B., & Štirn, I. (2016). The Relationship Between the Lower-Body Muscular Profile and Swimming Start Performance. *Journal of Human Kinetics*, 50(1), 157–165. <https://doi.org/10.1515/hukin-2015-0152>
- Garrido, N., Marinho, D. A., Barbosa, T. M., Costa, A. M., Silva, A. J., Pérez Turpin, J. A., & Marques, M. C. (2010). Relationships between dry land strength, power variables and short sprint performance in young competitive swimmers. *Journal of Human Sport and Exercise*, 5(2), 240–249. <https://doi.org/10.4100/jhse.2010.52.12>
- Garrido, N., Marinho, D. A., Reis, V. M., van den Tillaar, R., Costa, A. M., Silva, A. J., & Marques, M. C. (2010). Does combined dry land strength and aerobic training inhibit performance of young competitive swimmers? *Journal of Sports Science & Medicine*, 9(2), 300–310.
- Gasser, H. S., & Hill, A. V. (1924). The dynamics of muscular contraction. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 96(678), 398–437. <https://doi.org/10.1098/rspb.1924.0035>
- Gastin, P. B. (2001). Energy System Interaction and Relative Contribution During Maximal Exercise: *Sports Medicine*, 31(10), 725–741. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131100-00003>
- Gatta, G., Cortesi, M., Swaine, I., & Zamparo, P. (2018). Mechanical power, thrust power and propelling efficiency: Relationships with elite sprint swimming performance. *Journal of Sports Sciences*, 36(5), 506–512. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1322214>
- Gatta, G., Cortesi, M., & Zamparo, P. (2016). The Relationship between Power Generated by Thrust and Power to Overcome Drag in Elite Short Distance Swimmers. *PLOS ONE*, 11(9), e0162387. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162387>
- Gatta, G., Leban, B., Paderi, M., Padulo, J., Migliaccio, G. M., & Pau, M. (2014). The development of swimming power. *Muscles, Ligaments and Tendons Journal*, 4(4), 438–445.
- Girold, S., Jalab, C., Bernard, O., Carette, P., Kemoun, G., & Dugué, B. (2012). Dry-Land Strength Training vs. Electrical Stimulation in Sprint Swimming Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(2), 497–505. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318220e6e4>
- Girold, S., Maurin, D., Dugué, B., Chatard, J.-C., & Millet, G. (2007). Effects of Dry-Land vs. Resisted- and Assisted-Sprint Exercises on Swimming Sprint Performances. *Journal of Strength and*

Conditioning Research, 21(2), 599. <https://doi.org/10.1519/R-19695.1>

- Giroux, C., Rabita, G., Chollet, D., & Guilhem, G. (2014). What is the Best Method for Assessing Lower Limb Force-Velocity Relationship? *International Journal of Sports Medicine*, 36(02), 143–149. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1385886>
- Giroux, C., Rabita, G., Chollet, D., & Guilhem, G. (2016). Optimal Balance Between Force and Velocity Differs Among World-Class Athletes. *Journal of Applied Biomechanics*, 32(1), 59–68. <https://doi.org/10.1123/jab.2015-0070>
- Gola, R., Urbanik, C., Iwańska, D., & Madej, A. (2014). Relationship between Muscle Strength and Front Crawl Swimming Velocity. *Human Movement*, 15(2). <https://doi.org/10.2478/humo-2014-0011>
- Gomes, D. T., & Henriques-Rodrigues, L. (2018). Swimming performance index based on extreme value theory. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 14(1), 51–62. <https://doi.org/10.1177/1747954118808068>
- Gonjo, T., Eriksrud, O., Papoutsis, F., & Olstad, B. H. (2020). Relationships between a Load-velocity Profile and Sprint Performance in Butterfly Swimming. *International Journal of Sports Medicine*, 41(07), 461–467. <https://doi.org/10.1055/a-1103-2114>
- Gonjo, T., Njøs, N., Eriksrud, O., & Olstad, B. H. (2021). The Relationship Between Selected Load-Velocity Profile Parameters and 50 m Front Crawl Swimming Performance. *Frontiers in Physiology*, 12, 625411. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.625411>
- Gonjo, T., & Olstad, B. H. (2020). Race Analysis in Competitive Swimming: A Narrative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(1), 69. <https://doi.org/10.3390/ijerph18010069>
- Gonjo, T., & Olstad, B. H. (2022). Reliability of the active drag assessment using an isotonic resisted sprint protocol in human swimming. *Scientific Reports*, 12(1), 13085. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17415-5>
- Gonjo, T., & Olstad, B. H. (2023). Differences between elite and sub-elite swimmers in a 100 m breaststroke: A new race analysis approach with time-series velocity data. *Sports Biomechanics*, 22(12), 1722–1733. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1954238>

- Gonjo, T., Vitazka, M., Ljødal, I., & Olstad, B. H. (2024). The Load-Velocity Slope Is an Indicator of the Active Drag in all Competitive Swimming Strokes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003551>
- Gourgoulis, V., Boli, A., Aggeloussis, N., Toubekis, A., Antoniou, P., Kasimatis, P., Vezos, N., Michalopoulou, M., Kambas, A., & Mavromatis, G. (2013). The effect of leg kick on sprint front crawl swimming. *Journal of Sports Sciences*, 32(3), 278–289. <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.823224>
- Guignabel, raphael, Eon, A., ducatoire, arnaud, Monnet, T., David, L., & Samson, M. (2023, May 15). *Vortices and mechanics around the swimmer*. Second direct in-person colloquium on vortex dominated flows (discover), Beckenridge (USA).
- Haff, G. G. (2010). Sport Science. *Strength & Conditioning Journal*, 32(2), 33–45. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e3181d59c74>
- Haff, G. G., & Nimphius, S. (2012). Training Principles for Power. *Strength & Conditioning Journal*, 34(6), 2–12. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e31826db467>
- Häkkinen, K., & Komi, P. V. (1983). Electromyographic changes during strength training and detraining. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 15(6), 455–460.
- Hanon, C. (Ed.). (2019). Produire de hauts niveaux de force et de puissance lors d’actions brèves à haute intensité. In *Sports à haute intensité: Mieux comprendre la performance pour mieux l’entraîner* (pp. 113–169). INSEP-Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.insep.4055>
- Hansen, T. E., & Lindhard, J. (1923). On the maximum work of human muscles especially the flexors of the elbow. *The Journal of Physiology*, 57(5), 287–300. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1923.sp002066>
- Harry, J. R., Hurwitz, J., Agnew, C., & Bishop, C. (2024). Statistical Tests for Sports Science Practitioners: Identifying Performance Gains in Individual Athletes. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 38(5), e264–e272. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004727>
- Haycraft, J., & Robertson, S. (2015). The effect of concurrent aerobic training and maximal strength, power and swim-specific dry-land training protocols on swimming performance: A review. *Journal of Australian Strength and Conditioning*, 91–99.

- Hedges, L. V. (1981). Distribution Theory for Glass's Estimator of Effect Size and Related Estimators. *Journal of Educational Statistics*, 6(2), 107. <https://doi.org/10.2307/1164588>
- Hellard, P., Avalos-Fernandes, M., Lefort, G., Pla, R., Mujika, I., Toussaint, J.-F., & Pyne, D. B. (2019). Elite Swimmers' Training Patterns in the 25 Weeks Prior to Their Season's Best Performances: Insights Into Periodization From a 20-Years Cohort. *Frontiers in Physiology*, 10, 363. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00363>
- Hellard, P., Dekerle, J., Avalos, M., Caudal, N., Knopp, M., & Hausswirth, C. (2008). Kinematic measures and stroke rate variability in elite female 200-m swimmers in the four swimming techniques: Athens 2004 Olympic semi-finalists and French National 2004 Championship semi-finalists. *Journal of Sports Sciences*, 26(1), 35–46. <https://doi.org/10.1080/02640410701332515>
- Helms, E. R., Kwan, K., Sousa, C. A., Cronin, J. B., Storey, A. G., & Zourdos, M. C. (2020). Methods for Regulating and Monitoring Resistance Training. *Journal of Human Kinetics*, 74(1), 23–42. <https://doi.org/10.2478/hukin-2020-0011>
- Hermosilla, F., Sanders, R., González-Mohino, F., Yustres, I., & González-Rave, J. M. (2021). Effects of Dry-Land Training Programs on Swimming Turn Performance: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17), 9340. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179340>
- Hill, A. V. (1922). The maximum work and mechanical efficiency of human muscles, and their most economical speed. *The Journal of Physiology*, 56(1–2), 19–41. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1922.sp001989>
- Hill, A. V. (1938). The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B - Biological Sciences*, 126(843), 136–195. <https://doi.org/10.1098/rspb.1938.0050>
- Hill, A. V. (1950). Mechanics of the Contractile Element of Muscle. *Nature*, 166(4219), 415–419. <https://doi.org/10.1038/166415a0>
- Hintzy, F., Tordi, N., Predine, E., Rouillon, J.-D., & Belli, A. (2003). Force–velocity characteristics of upper limb extension during maximal wheelchair sprinting performed by healthy able-bodied

- females. *Journal of Sports Sciences*, 21(11), 921–926.
<https://doi.org/10.1080/0264041031000140392>
- Hoff, J., Gran, A., & Helgerud, J. (2002). Maximal strength training improves aerobic endurance performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 12(5), 288–295.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2002.01140.x>
- Hollander, A. P. (1988). *Contribution of the legs to propulsion in frontcrawl swimming* (B. E. Ungerechts, K. Wilke, & K. Reischle, Eds.; Vol. 18, pp. 39–43). Human Kinetics Books.
- Hollander, A. P., De Groot, G., Van Ingen Schenau, G. J., Toussaint, H. M., De Best, H., Peeters, W., Meulemans, A., & Schreurs, A. W. (1986). Measurement of active drag during crawl arm stroke swimming. *Journal of Sports Sciences*, 4(1), 21–30.
<https://doi.org/10.1080/02640418608732094>
- Holloszy, J. O., & Coyle, E. F. (1984). Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *Journal of Applied Physiology*, 56(4), 831–838.
<https://doi.org/10.1152/jappl.1984.56.4.831>
- Holmér, I. (1974). Energy cost of arm stroke, leg kick, and the whole stroke in competitive swimming styles. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 33(2), 105–118.
<https://doi.org/10.1007/BF00449512>
- Hopkins, W. G. (2004). *How to Interpret Changes in an Athletic Performance Test*. Sportscience.
<https://www.sportsci.org/jour/04/wghtests.htm>
- Hopkins, W. G., Hawley, J. A., & Burke, L. M. (1999). Design and analysis of research on sport performance enhancement. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 31(3), 472.
- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive Statistics for Studies in Sports Medicine and Exercise Science. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(1), 3–12. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31818cb278>
- Hug, F., Hodges, P. W., & Tucker, K. (2015). Muscle Force Cannot Be Directly Inferred From Muscle Activation: Illustrated by the Proposed Imbalance of Force Between the Vastus Medialis and Vastus Lateralis in People With Patellofemoral Pain. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 45(5), 360–365. <https://doi.org/10.2519/jospt.2015.5905>

- Hughes, D. C., Ellefsen, S., & Baar, K. (2018). Adaptations to Endurance and Strength Training. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 8(6), a029769. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a029769>
- Huot-Marchand, F., Nesi, X., Sidney, M., Alberty, M., & Pelayo, P. (2005). Swimming: Variations of stroking parameters associated with 200 m competitive performance improvement in top-standard front crawl swimmers. *Sports Biomechanics*, 4(1), 89–100. <https://doi.org/10.1080/14763140508522854>
- Ikai, M., Ishii, K., & Miyashita, M. (1964). AN ELECTROMYOGRAPHIC STUDY OF SWIMMING. *Taiikugaku Kenkyu (Japan Journal of Physical Education, Health and Sport Sciences)*, 7(4), 47–54. <https://doi.org/10.5432/jjpehss.KJ00003393757>
- Janicijevic, D., Knezevic, O. M., Mirkov, D. M., Pérez-Castilla, A., Petrovic, M., Samozino, P., & Garcia-Ramos, A. (2020). Assessment of the force-velocity relationship during vertical jumps: Influence of the starting position, analysis procedures and number of loads. *European Journal of Sport Science*, 20(5), 614–623. <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1645886>
- Jaric, S. (2015). Force-velocity Relationship of Muscles Performing Multi-joint Maximum Performance Tasks. *International Journal of Sports Medicine*, 36(09), 699–704. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1547283>
- Jaric, S. (2016). Two-Load Method for Distinguishing Between Muscle Force, Velocity, and Power-Producing Capacities. *Sports Medicine*, 46(11), 1585–1589. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0531-z>
- Jiménez-Reyes, P., Cross, M., Ross, A., Samozino, P., Brughelli, M., Gill, N., & Morin, J.-B. (2018). Changes in mechanical properties of sprinting during repeated sprint in elite rugby sevens athletes. *European Journal of Sport Science*, 19(5), 585–594. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1542032>
- Jiménez-Reyes, P., Garcia-Ramos, A., Párraga-Montilla, J. A., Morcillo-Losa, J. A., Cuadrado-Peñañiel, V., Castaño-Zambudio, A., Samozino, P., & Morin, J.-B. (2022). Seasonal Changes in the Sprint Acceleration Force-Velocity Profile of Elite Male Soccer Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(1), 70–74.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003513>

- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Brughelli, M., & Morin, J.-B. (2017). Effectiveness of an Individualized Training Based on Force-Velocity Profiling during Jumping. *Frontiers in Physiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00677>
- Jin, G., Jin, Y., Zhang, H., Fu, X., Yang, Y., & Lin, S.-C. (2024). The methodology of resistance training is crucial for improving short-medium distance front crawl performance in competitive swimmers: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Physiology*, 15, 1406518. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1406518>
- Johnson, R., Sharp, R., & Hedrick, C. (1993). Relationship of swimming power and dryland power to sprint freestyle performance: A multiple regression approach. *Journal of Swimming Research*, 9, 10–14.
- Jovanovic, M., & Jukic, I. (2020). Within-Unit Reliability and Between-Units Agreement of the Commercially Available Linear Position Transducer and Barbell-Mounted Inertial Sensor to Measure Movement Velocity. *Journal of Strength and Conditioning Research, Publish Ahead of Print*. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003776>
- Junge, N., Lundsgaard, A., Hansen, M. F., Samozino, P., Morin, J.-B., Aagaard, P., Contreras, B., & Nybo, L. (2021). Force-velocity-power profiling of maximal effort sprinting, jumping and hip thrusting: Exploring the importance of force orientation specificity for assessing neuromuscular function. *Journal of Sports Sciences*, 39(18), 2115–2122. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1920128>
- Junge, N., Morin, J.-B., & Nybo, L. (2020). Leg extension force-velocity imbalance has negative impact on sprint performance in ball-game players. *Sports Biomechanics*, 22(8), 1027–1040. <https://doi.org/10.1080/14763141.2020.1775877>
- Karpovich, P. V. (1933). Water Resistance in Swimming. *Research Quarterly. American Physical Education Association*, 4(3), 21–28. <https://doi.org/10.1080/23267402.1933.10626627>
- Keiner, M., Wirth, K., Fuhrmann, S., Kunz, M., Hartmann, H., & Haff, G. G. (2019). The Influence of Upper- and Lower-Body Maximum Strength on Swim Block Start, Turn, and Overall Swim Performance in Sprint Swimming. *Journal of Strength and Conditioning Research, Publish*

Ahead of Print. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003229>

- Keiner, M., Yaghobi, D., Sander, A., Wirth, K., & Hartmann, H. (2015). The influence of maximal strength performance of upper and lower extremities and trunk muscles on different sprint swim performances in adolescent swimmers. *Science & Sports*, 30(6), e147–e154. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2015.05.001>
- Keller, S., Olstad, B. H., & Wahl, P. (2024). Lower and upper extremity contributions to propulsion and resistance during semi-tethered load-velocity profiling in front crawl swimming. *Journal of Sports Sciences*, 1–7. <https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2326347>
- Keskinen, K. L., Tilli, L. J., & Komi, P. V. (1989). Maximum velocity swimming interrelationships of stroking characteristics force production and anthropometric variables. *Scandinavian Journal of Sports Sciences*, 11(2), 87–92.
- Kevles, D. J. (2023, September 14). *Yale Men's Swimming and Diving History*. Yale Men's Swimming and Diving History. <https://yalebulldogs.com/sports/2019/7/19/yale-mens-swimming-and-diving-history.aspx>
- Kibler, W. B., Press, J., & Sciascia, A. (2006). The Role of Core Stability in Athletic Function: *Sports Medicine*, 36(3), 189–198. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636030-00001>
- Kilduff, L. P., Cunningham, D. J., Owen, N. J., West, D. J., Bracken, R. M., & Cook, C. J. (2011). Effect of Postactivation Potentiation on Swimming Starts in International Sprint Swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(9), 2418–2423. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318201bf7a>
- Knudson, D. V. (2009). Correcting the Use of the Term “Power” in the Strength and Conditioning Literature. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(6), 1902–1908. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b7f5e5>
- Knuttgen, H. G. (2007). Strength Training and Aerobic Exercise: Comparison and Contrast. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), 973. <https://doi.org/10.1519/R-505011.1>
- Knuttgen, H. G., & Kraemer, W. J. (1987). Terminology and Measurement in Exercise Performance: *Journal of Strength and Conditioning Research*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.1519/00124278-184>

- Koga, D., Tsunokawa, T., Sengoku, Y., Homoto, K., Nakazono, Y., & Takagi, H. (2022). Relationship Between Hand Kinematics, Hand Hydrodynamic Pressure Distribution and Hand Propulsive Force in Sprint Front Crawl Swimming. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4, 786459. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.786459>
- Kojima, K., Brammer, C. L., Sossong, T. D., Abe, T., & Stager, J. M. (2018). In-Water Resisted Swim Training for Age-Group Swimmers: An Evaluation of Training Effects. *Pediatric Exercise Science*, 30(1), 124–131. <https://doi.org/10.1123/pes.2016-0230>
- Kolmogorov, S. V. (2023). Development of the technology to measure active drag of swimmers by the method of small perturbations. *Journal of Biomechanics*, 149, 111486. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111486>
- Kolmogorov, S. V., & Duplishcheva, O. A. (1992). Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. *Journal of Biomechanics*, 25(3), 311–318. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(92\)90028-Y](https://doi.org/10.1016/0021-9290(92)90028-Y)
- Kolmogorov, S. V., Rumyantseva, O. A., Gordon, B. J., & Cappaert, J. M. (1997). Hydrodynamic Characteristics of Competitive Swimmers of Different Genders and Performance Levels. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(1), 88–97. <https://doi.org/10.1123/jab.13.1.88>
- Konstantaki, M., Winter, E., & Swaine, I. (2008). Effects of Arms-Only Swimming Training on Performance, Movement Economy, and Aerobic Power. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 3(3), 294–304. <https://doi.org/10.1123/ijsp.3.3.294>
- Krabak, B. J., Hancock, K. J., & Drake, S. (2013). Comparison of Dry-Land Training Programs Between Age Groups of Swimmers. *PM&R*, 5(4), 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2012.11.003>
- Kraemer, W. J., Patton, J. F., Gordon, S. E., Harman, E. A., Deschenes, M. R., Reynolds, K., Newton, R. U., Triplett, N. T., & Dziados, J. E. (1995). Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations. *Journal of Applied Physiology*, 78(3), 976–989. <https://doi.org/10.1152/jappl.1995.78.3.976>
- Kraemer, W., Ratamess, N., Fry, A., French, D., Maud, P., & Foster, C. (1995). *Strength training:*

<https://www.semanticscholar.org/paper/Strength-training%3A-Development-and-evaluation-of-Kraemer-Ratamess/25884468f89e520b546ee25988c182ca82790240>

- Kuthe, C. D., Uddanwadiker, R. V., & Ramteke, A. A. (2018). Surface electromyography based method for computing muscle strength and fatigue of biceps brachii muscle and its clinical implementation. *Informatics in Medicine Unlocked*, 12, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2018.06.004>
- Kwok, W. Y., So, B. C. L., Tse, D. H. T., & Ng, S. S. M. (2021). A Systematic Review and Meta-Analysis: Biomechanical Evaluation of the Effectiveness of Strength and Conditioning Training Programs on Front Crawl Swimming Performance. *Journal of Sports Science and Medicine*, 564–585. <https://doi.org/10.52082/jssm.2021.564>
- Lacio, M., Vieira, J. G., Trybulski, R., Campos, Y., Santana, D., Filho, J. E., Novaes, J., Vianna, J., & Wilk, M. (2021). Effects of Resistance Training Performed with Different Loads in Untrained and Trained Male Adult Individuals on Maximal Strength and Muscle Hypertrophy: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11237. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111237>
- Lahti, J., Jiménez-Reyes, P., Cross, M. R., Samozino, P., Chassaing, P., Simond-Cote, B., Ahtiainen, J. P., & Morin, J.-B. (2020). Individual Sprint Force-Velocity Profile Adaptations to In-Season Assisted and Resisted Velocity-Based Training in Professional Rugby. *Sports*, 8(5), 74. <https://doi.org/10.3390/sports8050074>
- Lauder, M. A., & Dabnichki, P. (2005). Estimating propulsive forces—Sink or swim? *Journal of Biomechanics*, 38(10), 1984–1990. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.05.026>
- Lauer, J., Figueiredo, P., Vilas-Boas, J. P., Fernandes, R. J., & Rouard, A. H. (2013). Phase-dependence of elbow muscle coactivation in front crawl swimming. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23(4), 820–825. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2013.02.004>
- Lewillie, L. (1973). Muscular Activity in Swimming. In S. Cerquiglini, A. Venerando, & J. Wartenweiler (Eds.), *Medicine and Sport Science* (Vol. 8, pp. 440–445). S. Karger AG. <https://doi.org/10.1159/000393787>

- Lima-Borges, D. S., Portilho, N. O., Araújo, D. S., Ravagnani, C. F. C., & Almeida, J. A. (2022). Anthropometry and physical performance in swimmers of different styles. *Science & Sports*, 37(7), 542–551. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2021.07.007>
- Lindberg, K., Solberg, P., Bjørnsen, T., Helland, C., Rønnestad, B., Thorsen Frank, M., Haugen, T., Østerås, S., Kristoffersen, M., Midttun, M., Sæland, F., & Paulsen, G. (2021). Force-velocity profiling in athletes: Reliability and agreement across methods. *PLOS ONE*, 16(2), e0245791. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245791>
- Liu, H., & Wang, J. (2023). The Effects of Incorporating Dry-land Short Intervals to Long Aerobic-dominant In-Water Swimming Training on Physiological Parameters, Hormonal Factors, and Performance: A Randomized-Controlled Intervention Study. *Journal of Sports Science and Medicine*, 329–337. <https://doi.org/10.52082/jssm.2023.329>
- Lopes, T. J., Neiva, H. P., Gonçalves, C. A., Nunes, C., & Marinho, D. A. (2021). The effects of dry-land strength training on competitive sprinter swimmers. *Journal of Exercise Science & Fitness*, 19(1), 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2020.06.005>
- Loturco, I., Barbosa, A., Nocentini, R., Pereira, L., Kobal, R., Kitamura, K., Abad, C., Figueiredo, P., & Nakamura, F. (2015). A Correlational Analysis of Tethered Swimming, Swim Sprint Performance and Dry-land Power Assessments. *International Journal of Sports Medicine*, 37(03), 211–218. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1559694>
- Loturco, I., Suchomel, T., Bishop, C., Kobal, R., Pereira, L. A., & McGuigan, M. (2019). One-Repetition-Maximum Measures or Maximum Bar-Power Output: Which Is More Related to Sport Performance? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(1), 33–37. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0255>
- Lum, D., & Barbosa, T. M. (2019). Brief Review: Effects of Isometric Strength Training on Strength and Dynamic Performance. *International Journal of Sports Medicine*, 40(06), 363–375. <https://doi.org/10.1055/a-0863-4539>
- Lupton, H. (1922). The relation between the external work produced and the time occupied in a single muscular contraction in man. *The Journal of Physiology*, 57(1–2), 68–75. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1922.sp002043>

- Lutula, A. (2019). *Resisted Sprint Training in Swimming*. THE SWEDISH SCHOOL OF SPORT AND HEALTH SCIENCES.
- Lyttle, A., & Benjanuvatra, N. (2005). *Start Right? A Biomechanical Review of Dive Start Performance*. <http://www.coachesinfo.com/category/swimming/321/>
- Lyttle, A., & Ostrowski, K. (1994). The principles of power development for freestyle sprints. *Strength Conditioning Coach*, 2, 23–25.
- Macaluso, A., & De Vito, G. (2003). Comparison between young and older women in explosive power output and its determinants during a single leg-press action after optimisation of load. *European Journal of Applied Physiology*, 90(5–6), 458–463. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0866-7>
- MacDougall, J. D., Elder, G. C. B., Sale, D. G., Moroz, J. R., & Sutton, J. R. (1980). Effects of strength training and immobilization on human muscle fibres. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 43(1), 25–34. <https://doi.org/10.1007/BF00421352>
- Maffiuletti, N. A., Aagaard, P., Blazevich, A. J., Folland, J., Tillin, N., & Duchateau, J. (2016). Rate of force development: Physiological and methodological considerations. *European Journal of Applied Physiology*, 116(6), 1091–1116. <https://doi.org/10.1007/s00421-016-3346-6>
- Magel, J. R. (1970). Propelling Force Measured during Tethered Swimming in the Four Competitive Swimming Styles. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 41(1), 68–74. <https://doi.org/10.1080/10671188.1970.10614948>
- Maglischo, C. W., Maglischo, E. W., Sharp, R. L., Zier, D. J., & Katz, A. (1984). *Tethered and nontethered crawl swimming* (J. Terauds, K. Barthels, E. Kreighbaum, R. Mann, & J. Crakes, Eds.). International Society of Biomechanics in Sports (ISBS). <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/1416>
- Mallett, A., Bellinger, P., Derave, W., Osborne, M., & Minahan, C. (2021). The age, height, and body mass of Olympic swimmers: A 50-year review and update. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 16(1), 210–223. <https://doi.org/10.1177/1747954120971797>
- Manske, R. C., Lewis, S., Wolff, S., & Smith, B. (2015). Effects of a dry-land strengthening program in competitive adolescent swimmers. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 10(6), 858–867.

- Margaret Thompson, I., Warner, M., Hudson, D., Banks, J., & Logan, O. (2022). Coaching practices to develop underwater fly kick performance in swimming training. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 174795412211015. <https://doi.org/10.1177/17479541221101598>
- Martens, J., Figueiredo, P., & Daly, D. (2015). Electromyography in the four competitive swimming strokes: A systematic review. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 25(2), 273–291. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2014.12.003>
- Martin, R. B., Yeater, R. A., & White, M. K. (1981). A simple analytical model for the crawl stroke. *Journal of Biomechanics*, 14(8), 539–548. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(81\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0021-9290(81)90003-8)
- Matsuuchi, K., Miwa, T., Nomura, T., Sakakibara, J., Shintani, H., & Ungerechts, B. E. (2009). Unsteady flow field around a human hand and propulsive force in swimming. *Journal of Biomechanics*, 42(1), 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.10.009>
- Mcbride, J. M., Triplett-Mcbride, T., Davie, A., & Newton, R. U. (1999). A Comparison of Strength and Power Characteristics Between Power Lifters, Olympic Lifters, and Sprinters. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 13(1), 58.
- McGowan, C., Rattray, B., Thompson, K., Pyne, D., & Raglin, J. (2014). Current warm-up practices and the contemporary issues faced by elite swimming coaches. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18, e82. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.11.333>
- McGuigan, M. R., Cormack, S. J., & Gill, N. D. (2013). Strength and Power Profiling of Athletes: Selecting Tests and How to Use the Information for Program Design. *Strength & Conditioning Journal*, 35(6), 7–14. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000011>
- McMahon, T. A. (2020). *Muscles, Reflexes, and Locomotion*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv173flsp>
- McMaster, D. T., Gill, N., Cronin, J., & McGuigan, M. (2014). A Brief Review of Strength and Ballistic Assessment Methodologies in Sport. *Sports Medicine*, 44(5), 603–623. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0145-2>
- Mezzaroba, P. V., & Machado, F. A. (2014). Effect of Age, Anthropometry, and Distance in Stroke Parameters of Young Swimmers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(4), 702–706. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0278>

- Mike, J., Kerksick, C. M., & Kravitz, L. (2015). How to Incorporate Eccentric Training Into a Resistance Training Program. *Strength & Conditioning Journal*, 37(1), 5–17. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000114>
- Miras-Moreno, S., López-Belmonte, Ó., García-Ramos, A., Arellano, R., & Ruiz-Navarro, J. J. (2024). Which Strength Manifestation Is More Related to Regional Swimmers' Performance and In-Water Forces? Maximal Neuromuscular Capacities Versus Maximal Mechanical Maintenance Capacity. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1–12. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2023-0475>
- Mooney, R., Corley, G., Godfrey, A., Osborough, C., Newell, J., Quinlan, L. R., & ÓLaighin, G. (2016). Analysis of swimming performance: Perceptions and practices of US-based swimming coaches. *Journal of Sports Sciences*, 34(11), 997–1005. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1085074>
- Morais, J. E., Marques, M. C., Rodríguez-Rosell, D., Barbosa, T. M., & Marinho, D. A. (2020). Relationship between thrust, anthropometrics, and dry-land strength in a national junior swimming team. *The Physician and Sportsmedicine*, 48(3), 304–311. <https://doi.org/10.1080/00913847.2019.1693240>
- Morais, J. E., Silva, A. J., Garrido, N. D., Marinho, D. A., & Barbosa, T. M. (2018). The transfer of strength and power into the stroke biomechanics of young swimmers over a 34-week period. *European Journal of Sport Science*, 18(6), 787–795. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1453869>
- Morin, J.-B., & Samozino, P. (2016). Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for Individualized and Specific Training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(2), 267–272. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0638>
- Morouço, P. G., Keskinen, K. L., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2011). Relationship Between Tethered Forces and the Four Swimming Techniques Performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 27(2), 161–169. <https://doi.org/10.1123/jab.27.2.161>
- Morouço, P. G., Marinho, D. A., Izquierdo, M., Neiva, H., & Marques, M. C. (2015). Relative Contribution of Arms and Legs in 30 s Fully Tethered Front Crawl Swimming. *BioMed*

Research International, 2015, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2015/563206>

- Morouço, P. G., Marinho, D. A., Keskinen, K. L., Badillo, J. J., & Marques, M. C. (2014). Tethered Swimming Can Be Used to Evaluate Force Contribution for Short-Distance Swimming Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(11), 3093–3099. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000509>
- Morouço, P. G., Neiva, H., González-Badillo, J., Garrido, N., Marinho, D., & Marques, M. (2011). Associations Between Dry Land Strength and Power Measurements with Swimming Performance in Elite Athletes: A Pilot Study. *Journal of Human Kinetics*, 29A(Special-Issue), 105–112. <https://doi.org/10.2478/v10078-011-0065-2>
- Morouço, P. G., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2012). Evaluation of Adolescent Swimmers Through a 30-s Tethered Test. *Pediatric Exercise Science*, 24(2), 312–321. <https://doi.org/10.1123/pes.24.2.312>
- Muniz-Pardos, B., Gomez-Bruton, A., Matute-Llorente, A., Gonzalez-Aguero, A., Gomez-Cabello, A., Gonzalo-Skok, O., Casajus, J. A., & Vicente-Rodriguez, G. (2019). Swim-Specific Resistance Training: A Systematic Review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(10), 2875–2881. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003256>
- Narita, K., Nakashima, M., & Takagi, H. (2017). Developing a methodology for estimating the drag in front-crawl swimming at various velocities. *Journal of Biomechanics*, 54, 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.01.037>
- Nefesoğlu, İ., & Bas, O. (2021). The Effect of the Kinanthropometric Profile on Leg Strength and Hand Grip Strength in Young Female Swimmers. *Türkiye Spor Bilimleri Dergisi*, 5(1), 18–32. <https://doi.org/10.32706/tusbid.899573>
- Neiva, H. P., Marques, M. C., Barbosa, T. M., Izquierdo, M., & Marinho, D. A. (2014). Warm-Up and Performance in Competitive Swimming. *Sports Medicine*, 44(3), 319–330. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0117-y>
- Newton, R. U., Jones, J., Kraemer, W. J., & Wardle, H. (2002). Strength and Power Training of Australian Olympic Swimmers: *Strength and Conditioning Journal*, 24(3), 7–15. <https://doi.org/10.1519/00126548-200206000-00001>

- Nicol, E., Pearson, S., Saxby, D., Minahan, C., & Tor, E. (2022). Stroke Kinematics, Temporal Patterns, Neuromuscular Activity, Pacing and Kinetics in Elite Breaststroke Swimming: A Systematic Review. *Sports Medicine - Open*, 8(1), 75. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00467-2>
- Nicolas, G., Bideau, B., Colobert, B., & Berton, E. (2007). How are Strouhal number, drag, and efficiency adjusted in high level underwater monofin-swimming? *Human Movement Science*, 26(3), 426–442. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.03.002>
- Nikolaidis, P. (2012). Age- and Sex-Related Differences in Force-Velocity Characteristics of Upper and Lower Limbs of Competitive Adolescent Swimmers. *Journal of Human Kinetics*, 32(2012), 87–95. <https://doi.org/10.2478/v10078-012-0026-4>
- Norberto, M. S., Kalva-Filho, C. A., Schneider, G. N., Campos, E. Z., & Papoti, M. (2023). Two Different Approaches to Dry-land Training Do Not Improve the Water Performance of Swimmers. *International Journal of Exercise Science*, 16(6), 770–790.
- Nuber, G. W., Jobe, F. W., Perry, J., Moynes, D. R., & Antonelli, D. (1986). Fine wire electromyography analysis of muscles of the shoulder during swimming. *The American Journal of Sports Medicine*, 14(1), 7–11. <https://doi.org/10.1177/036354658601400102>
- Nugent, F. J., Comyns, T. M., & Warrington, G. D. (2017). Quality Versus Quantity Debate in Swimming: Perceptions and Training Practices of Expert Swimming Coaches. *Journal of Human Kinetics*, 57(1), 147–158. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0056>
- Nyati, L. H., Pettifor, J. M., Ong, K. K., & Norris, S. A. (2023). The association between the timing, intensity and magnitude of adolescent growth and body composition in early adulthood. *European Journal of Clinical Nutrition*. <https://doi.org/10.1038/s41430-023-01293-9>
- Olstad, B. H., Bjørlykke, V., & Olstad, D. (2019). Maximal Heart Rate for Swimmers. *Sports*, 7(11), 235. <https://doi.org/10.3390/sports7110235>
- Olstad, B. H., Gonjo, T., Njøs, N., Abächerli, K., & Eriksrud, O. (2020). Reliability of Load-Velocity Profiling in Front Crawl Swimming. *Frontiers in Physiology*, 11, 574306. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.574306>
- Olstad, B. H., Hunger, L., Ljødal, I., Ringhof, S., & Gonjo, T. (2024). The relationship between load-velocity profiles and 50 m breaststroke performance in national-level male swimmers. *Journal*

- of Sports Sciences*, 42(16), 1512–1518. <https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2397234>
- Orange, S. T., Metcalfe, J. W., Marshall, P., Vince, R. V., Madden, L. A., & Liefieith, A. (2020). Test-Retest Reliability of a Commercial Linear Position Transducer (GymAware PowerTool) to Measure Velocity and Power in the Back Squat and Bench Press. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(3), 728–737. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002715>
- O’Shea, P., & O’Shea, K. (1991). The 50-meter freestyle sprint. *National Strength and Conditioning Association Journal*, 13(5), 6–11.
- Pallarés, J. G., Sánchez-Medina, L., Pérez, C. E., De La Cruz-Sánchez, E., & Mora-Rodriguez, R. (2014). Imposing a pause between the eccentric and concentric phases increases the reliability of isoinertial strength assessments. *Journal of Sports Sciences*, 32(12), 1165–1175. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.889844>
- Panissa, V. L. G., Greco, C. C., Ribeiro, N., Julio, U. F., Tricoli, V., & Franchini, E. (2022). Concurrent Training and the Acute Interference Effect on Strength: Reviewing the Relevant Variables. *Strength & Conditioning Journal*, 44(3), 46–57. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000668>
- Pendergast, D., Mollendorf, J., Zamparo, P., Termin, A., Bushnell, D., & Paschke, D. (2005). The influence of drag on human locomotion in water. *Undersea & Hyperbaric Medicine: Journal of the Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc.*, 32(1), 45–57.
- Pereira, L. A., Freitas, T. T., Pivetti, B., Alcaraz, P. E., Jeffreys, I., & Loturco, I. (2020). Short-Term Detraining Does Not Impair Strength, Speed, and Power Performance in Elite Young Soccer Players. *Sports*, 8(11), 141. <https://doi.org/10.3390/sports8110141>
- Pérez-Castilla, A., Piepoli, A., Delgado-García, G., Garrido-Blanca, G., & García-Ramos, A. (2019). Reliability and Concurrent Validity of Seven Commercially Available Devices for the Assessment of Movement Velocity at Different Intensities During the Bench Press. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(5), 1258–1265. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003118>
- Pérez-Olea, J. I., Valenzuela, P. L., Aponte, C., & Izquierdo, M. (2018). Relationship Between Dryland Strength and Swimming Performance: Pull-Up Mechanics as a Predictor of Swimming Speed.

Journal of Strength and Conditioning Research, 32(6), 1637–1642.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002037>

Pessoa Filho, D. M., Greco, C. C., & Denadai, B. S. (2014). Potência atada na máxima fase estável de lactato e índices do desempenho aeróbio de nado. *Revista Brasileira de Medicina Do Esporte*, 20(5), 359–365. <https://doi.org/10.1590/1517-86922014200500714>

Peterson Silveira, R., De Souza Castro, F. A., Figueiredo, P., Vilas-Boas, J. P., & Zamparo, P. (2017). The Effects of Leg Kick on Swimming Speed and Arm-Stroke Efficiency in the Front Crawl. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(6), 728–735. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0232>

Peterson Silveira, R., Raineteau, Y., Pla, R., Bideau, B., Nicolas, G., & Bideau, N. (2023). *The interplay between active drag, arm stroke efficiency and propulsive power as determinants of front crawl sprint performance*. 523.

Peterson Silveira, R., Soares, S. M., Zacca, R., Alves, F. B., Fernandes, R. J., De Souza Castro, F. A., & Vilas-Boas, J. P. (2019). A Biophysical Analysis on the Arm Stroke Efficiency in Front Crawl Swimming: Comparing Methods and Determining the Main Performance Predictors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23), 4715. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234715>

Piazzesi, G., Reconditi, M., Linari, M., Lucii, L., Bianco, P., Brunello, E., Decostre, V., Stewart, A., Gore, D. B., Irving, T. C., Irving, M., & Lombardi, V. (2007). Skeletal Muscle Performance Determined by Modulation of Number of Myosin Motors Rather Than Motor Force or Stroke Size. *Cell*, 131(4), 784–795. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.09.045>

Pink, M., Jobe, F. W., Perry, J., Kerrigan, J., Browne, A., & Scovazzo, M. L. (1992). The Normal Shoulder During the Backstroke: An EMG and Cinematographic Analysis of 12 Muscles. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 2(1), 6–12. <https://doi.org/10.1097/00042752-199201000-00002>

Pink, M., Jobe, F. W., Perry, J., Kerrigan, J., Browne, A., & Scovazzo, M. L. (1993). The normal shoulder during the butterfly swim stroke. An electromyographic and cinematographic analysis of twelve muscles. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 288, 48–59.

- Pink, M., Perry, J., Browne, A., Scovazzo, M. L., & Kerrigan, J. (1991). The normal shoulder during freestyle swimming: An electromyographic and cinematographic analysis of twelve muscles. *The American Journal of Sports Medicine*, 19(6), 569–576. <https://doi.org/10.1177/036354659101900603>
- Pla, R., Poszalczyk, G., Souaïssia, C., Joulia, F., & Guimard, A. (2021). Underwater and Surface Swimming Parameters Reflect Performance Level in Elite Swimmers. *Frontiers in Physiology*, 12, 712652. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.712652>
- Platzer, H., Raschner, C., & Patterson, C. (2009). Relationship between Physical Fitness and Freestyle Swimming Performance. *Deutsche Zeitschrift Fur Sportmedizin*, 60, 321–326.
- Pleša, J., Kozinc, Ž., & Šarabon, N. (2022). A Brief Review of Selected Biomechanical Variables for Sport Performance Monitoring and Training Optimization. *Applied Mechanics*, 3(1), 144–159. <https://doi.org/10.3390/applmech3010011>
- Pollock, S., Gaoua, N., Johnston, M. J., Cooke, K., Girard, O., & Mileva, K. N. (2019). Training Regimes and Recovery Monitoring Practices of Elite British Swimmers. *Journal of Sports Science & Medicine*, 18(3), 577–585.
- Potdevin, F. J., Alberty, M. E., Chevutschi, A., Pelayo, P., & Sidney, M. C. (2011). Effects of a 6-Week Plyometric Training Program on Performances in Pubescent Swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(1), 80–86. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181fef720>
- Pouliquen, C. (2017). *Evaluation de l'asymétrie articulaire et musculaire au cours d'exercices exhaustif en cyclisme: Apports de l'approche expérimentale et de la modélisation musculosquelettique* [These de doctorat, Rennes 2]. <https://theses.fr/2017REN20064>
- Pradet, M., & Hubiche, J.-L. (1996). *La préparation physique*. INSEP publ.
- Psycharakis, S. G. (2011). A Longitudinal Analysis on the Validity and Reliability of Ratings of Perceived Exertion for Elite Swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(2), 420–426. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181bff58c>
- Raglin, J. S., Koceja, D. M., Stager, J. M., & Harms, C. A. (1996). Mood, neuromuscular function, and performance during training in female swimmers: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 28(3), 372–377. <https://doi.org/10.1097/00005768-199603000-00013>

- Rahmani, A., Samozino, P., Morin, J.-B., & Morel, B. (2018). A Simple Method for Assessing Upper-Limb Force–Velocity Profile in Bench Press. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(2), 200–207. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0814>
- Rahmani, A., Viale, F., Dalleau, G., & Lacour, J.-R. (2001). Force/velocity and power/velocity relationships in squat exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 84(3), 227–232. <https://doi.org/10.1007/PL00007956>
- Raineteau, Y., Nicolas, G., Bideau, B., Bideau, N., & Pla, R. (2023). Associations between load-velocity profiling and race parameters of elite swimmers in the 100 and 200m freestyle events. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1326106. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1326106>
- Raineteau, Y., Nicolas, G., Duchateau, C., Démoncourt, E., Peterson Silveira, R., Bideau, B., Bideau, N., & Pla, R. (2023). *The relationships between dry-land force-velocity profiles and front crawl load-velocity profiles in elite swimmers*. 421.
- Raineteau, Y., Pla, R., Bideau, B., Bideau, N., & Nicolas, G. (2024). From dry-land to the water: Training and testing practices of strength and conditioning coaches in high level French sprint swimmers. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5, 1338856. <https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1338856>
- Rakovic, E., Paulsen, G., Helland, C., Haugen, T., & Eriksrud, O. (2020). Validity and reliability of a motorized sprint resistance device. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, Online ahead of print.
- Ralston, H. J., Polissar, M. J., Inman, V. T., Close, J. R., & Feinstein, B. (1949). Dynamic Features of Human Isolated Voluntary Muscle in Isometric and Free Contractions. *Journal of Applied Physiology*, 1(7), 526–533. <https://doi.org/10.1152/jappl.1949.1.7.526>
- Rejman, M., Tyc, Ł., Kociuba, M., Bornikowska, A., Rudnik, D., & Kozieł, S. (2018). Anthropometric predispositions for swimming from the perspective of biomechanics. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 20(4), 151–159.
- Ritchie, J. M. (1954). The relation between force and velocity of shortening in rat muscle. *The Journal of Physiology*, 123(3), 633–639. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1954.sp005075>
- Rivière, J. R., Peyrot, N., Cross, M. R., MESSONNIER, L. A., & Samozino, P. (2020). Strength-Endurance:

- Interaction Between Force-Velocity Condition and Power Output. *Frontiers in Physiology*, 11, 576725. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.576725>
- Roberts, A. J., Termin, B., Reilly, M. F., & Pendergast, D. (1991). Effectiveness of Biokinetic Training on Swimming. *J. Swim Res*, 7, 5–10.
- Robineau, J., Babault, N., Piscione, J., Lacome, M., & Bigard, A. X. (2016). Specific Training Effects of Concurrent Aerobic and Strength Exercises Depend on Recovery Duration. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(3), 672–683. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000798>
- Rodeo, S. (1984). Sports Performance Series: Swimming the breaststroke—A kinesiological analysis and considerations for strength training. *Strength & Conditioning Journal*, 6(4), 4.
- Rodríguez, F. A., & Mader, A. (2011). Energy systems in swimming. In L. Seifert, D. Chollet, & I. Mujika (Eds.), *World Book of Swimming: From Science to Performance* (p. 550). Nova Science Publishers, Inc. <http://rgdoi.net/10.13140/2.1.3260.5128>
- Rodríguez González, L., Melguizo-Ibáñez, E., Martín-Moya, R., & González-Valero, G. (2022). Study of strength training on swimming performance. A systematic review. *Science & Sports*, S0765159722001976. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2022.09.002>
- Ross, S. A., & Wakeling, J. M. (2016). Muscle shortening velocity depends on tissue inertia and level of activation during submaximal contractions. *Biology Letters*, 12(6), 20151041. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.1041>
- Rouard, A. H., & Billat, R. (1990). Influences of Sex and Level of Performance on Freestyle Stroke: An Electromyography and Kinematic Study. *International Journal of Sports Medicine*, 11(02), 150–155. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1024781>
- Rouard, A. H., & Clarys, J. P. (1995). Cocontraction in the elbow and shoulder muscles during rapid cyclic movements in an aquatic environment. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 5(3), 177–183. [https://doi.org/10.1016/1050-6411\(95\)00008-N](https://doi.org/10.1016/1050-6411(95)00008-N)
- Rouard, A.-H., Schleihau, R. E., & Troup, J. P. (1994). Forces de la main et niveau de performance du nageur de crawl. *STAPS*, 15(33), 31–41. <https://doi.org/10.3406/staps.1994.963>
- Rouboa, A., Silva, A., Leal, L., Rocha, J., & Alves, F. (2006). The effect of swimmer's hand/forearm

- acceleration on propulsive forces generation using computational fluid dynamics. *Journal of Biomechanics*, 39(7), 1239–1248. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.03.012>
- Rovere, G. D., & Nichols, A. W. (1985). Frequency, associated factors, and treatment of breaststroker's knee in competitive swimmers. *The American Journal of Sports Medicine*, 13(2), 99–104. <https://doi.org/10.1177/036354658501300204>
- Ruiz-Navarro, J. J., Gay, A., Cuenca-Fernández, F., López-Belmonte, Ó., Morales-Ortiz, E., López-Contreras, G., & Arellano, R. (2022). The relationship between tethered swimming, anaerobic critical velocity, dry-land strength, and swimming performance. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 22(3), 407–421. <https://doi.org/10.1080/24748668.2022.2072561>
- Ruiz-Navarro, J. J., López-Belmonte, Ó., Gay, A., Cuenca-Fernández, F., & Arellano, R. (2023). A new model of performance classification to standardize the research results in swimming. *European Journal of Sport Science*, 23(4), 478–488. <https://doi.org/10.1080/17461391.2022.2046174>
- Rumyantsev, V. A. (1982). Biodynamic Principles of Propulsion in Swimming. *Central State Institute of Physical Culture*.
- Rutherford, O. M., & Jones, D. A. (1986). The role of learning and coordination in strength training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 55(1), 100–105. <https://doi.org/10.1007/BF00422902>
- Sacilotto, G., Sanders, R., Gonjo, T., Marinho, D., Mason, B., Naemi, R., Vilas-Boas, J. P., & Papic, C. (2023). “Selecting the right tool for the job” a narrative overview of experimental methods used to measure or estimate active and passive drag in competitive swimming. *Sports Biomechanics*, 22(12), 1572–1589. <https://doi.org/10.1080/14763141.2023.2197858>
- Sadowski, J., Mastalerz, A., & Gromisz, W. (2020). Transfer of Dry-Land Resistance Training Modalities to Swimming Performance. *Journal of Human Kinetics*, 74(1), 195–203. <https://doi.org/10.2478/hukin-2020-0025>
- Sadowski, J., Mastalerz, A., Gromisz, W., & Niżnikowski, T. (2012). Effectiveness of the Power Dry-Land Training Programmes in Youth Swimmers. *Journal of Human Kinetics*, 32(2012), 77–86. <https://doi.org/10.2478/v10078-012-0025-5>

- Sale, D. G. (1988). Neural adaptation to resistance training: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 20(Sup 1), S135–S145. <https://doi.org/10.1249/00005768-198810001-00009>
- Samozino, P., Edouard, P., Sangnier, S., Brughelli, M., Gimenez, P., & Morin, J.-B. (2013). Force-Velocity Profile: Imbalance Determination and Effect on Lower Limb Ballistic Performance. *International Journal of Sports Medicine*, 35(06), 505–510. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1354382>
- Samozino, P., Morin, J.-B., Hintzy, F., & Belli, A. (2008). A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. *Journal of Biomechanics*, 41(14), 2940–2945. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.07.028>
- Samozino, P., Peyrot, N., Edouard, P., Nagahara, R., Jimenez-Reyes, P., Vanwanseele, B., & Morin, J. (2022). Optimal mechanical force-velocity profile for sprint acceleration performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 32(3), 559–575. <https://doi.org/10.1111/sms.14097>
- Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez De Villarreal, E., & Morin, J. -B. (2016). A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(6), 648–658. <https://doi.org/10.1111/sms.12490>
- Samozino, P., Rejc, E., Di Prampero, P. E., Belli, A., & Morin, J.-B. (2012). Optimal Force–Velocity Profile in Ballistic Movements—Altius: Citius or Fortius? *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(2), 313–322. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31822d757a>
- Samson, M., Bernard, A., Monnet, T., Lacouture, P., & David, L. (2017). Unsteady computational fluid dynamics in front crawl swimming. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 20(7), 783–793. <https://doi.org/10.1080/10255842.2017.1302434>
- Samson, M., Monnet, T., Bernard, A., Lacouture, P., & David, L. (2018). Comparative study between fully tethered and free swimming at different paces of swimming in front crawl. *Sports Biomechanics*, 18(6), 571–586. <https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1443492>
- Sánchez-Medina, L., González-Badillo, J., Pérez, C., & Pallarés, J. (2013). Velocity- and Power-Load Relationships of the Bench Pull vs. Bench Press Exercises. *International Journal of Sports*

Medicine, 35(03), 209–216. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1351252>

Sanders, R. (1998, May 19). *Lift or Drag? Let's Get Skeptical About Freestyle Propulsion*. Sportsci.Org. <https://sportsci.org/news/biomech/skeptic.html>

Santos, C. C., Barbosa, T. M., Marinho, D. A., & Costa, M. J. (2022). Association between the dry-land strength & power and the kick start kinetics in elite male and female swimmers. *Sports Biomechanics*, 1–11. <https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2158921>

Santos, K. B., Bento, P. C. B., Pereira, G., & Rodacki, A. L. F. (2016). The Relationship Between Propulsive Force in Tethered Swimming and 200-m Front Crawl Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(9), 2500–2507. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000410>

Sarramian, V. G., Turner, A. N., & Greenhalgh, A. K. (2015). Effect of Postactivation Potentiation on Fifty-Meter Freestyle in National Swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(4), 1003–1009. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000708>

Schleihauf, R. E. (1979). *A hydrodynamic analysis of swimming propulsion* (J. Terauds & E. W. Bedingfield, Eds.; pp. 70–109). Baltimore University Park Press.

Schnitzler, C., Seifert, L., Alberty, M., & Chollet, D. (2010). Hip Velocity and Arm Coordination in Front Crawl Swimming. *International Journal of Sports Medicine*, 31(12), 875–881. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1265149>

Schoenfeld, B. J., Grgic, J., Ogborn, D., & Krieger, J. W. (2017). Strength and Hypertrophy Adaptations Between Low- vs. High-Load Resistance Training: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(12), 3508–3523. <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000002200>

Schumann, M., Notbohm, H., Bäcker, S., Klocke, J., Fuhrmann, S., & Clephas, C. (2020). Strength-Training Periodization: No Effect on Swimming Performance in Well-Trained Adolescent Swimmers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(9), 1272–1280. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0715>

Seifert, L., Chollet, D., & Chatard, J. C. (2007). Kinematic Changes during a 100-m Front Crawl: Effects of Performance Level and Gender. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(10), 200

1784–1793. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3180f62f38>

- Selvamoorthy, R., Macgregor, L. J., Donald, N., & Hunter, A. M. (2024). Dryland Performance Tests Are Not Good Predictors of World Aquatics Points in Elite Male and Female Swimmers. *Sports*, 12(4), 104. <https://doi.org/10.3390/sports12040104>
- Sengoku, Y., Shinno, A., Kim, J., Homoto, K., Nakazono, Y., Tsunokawa, T., Hirai, N., Nobue, A., & Ishikawa, M. (2024). The relationship between maximal lactate accumulation rate and sprint performance parameters in male competitive swimmers. *Frontiers in Sports and Active Living*, 6, 1483659. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1483659>
- Sharp, R. L., & Costill, D. L. (1989). Influence of body hair removal on physiological responses during breaststroke swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 21(5), 576–580.
- Sharp, R. L., Troup, J. P., & Costill, D. L. (1982). Relationship between power and sprint freestyle swimming: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(1), 53–56. <https://doi.org/10.1249/00005768-198201000-00010>
- Sheppard, J. M., Agar-Newman, D., & Gabbett, T. J. (2021). Performance Diagnostics. In I. Jeffreys & J. Moody (Eds.), *Strength and Conditioning for Sports Performance* (2nd ed., pp. 208–221). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429330988-15>
- Shimano, T., Kraemer, W. J., Spiering, B. A., Volek, J. S., Hatfield, D. L., Silvestre, R., Vingren, J. L., Fragala, M. S., Maresh, C. M., Fleck, S. J., Newton, R. U., Spreuwenberg, L. P. B., & Häkkinen, K. (2006). Relationship Between the Number of Repetitions and Selected Percentages of One Repetition Maximum in Free Weight Exercises in Trained and Untrained Men. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(4), 819. <https://doi.org/10.1519/R-18195.1>
- Siders, W. A., Lukaski, H. C., & Bolonchuk, W. W. (1993). Relationships among swimming performance, body composition and somatotype in competitive collegiate swimmers. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 33(2), 166–171.
- Siff, M. C. (2000). Biomechanical Foundations of Strength and Power Training. In V. M. Zatsiorsky (Ed.), *Biomechanics in sport: Performance enhancement and injury prevention* (1st ed., pp. 103–139). Blackwell Science. <https://doi.org/10.1002/9780470693797.ch6>
- Simenz, C. J., Dugan, C. A., & Ebben, W. P. (2005). Strength and Conditioning Practices of National

- Basketball Association Strength and Conditioning Coaches. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(3), 495. <https://doi.org/10.1519/15264.1>
- Singh, U., Ramachandran, A. K., Baxter, B. A., & Allen, S. J. (2021). The correlation of force-velocity-power relationship of a whole-body movement with 20 m and 60 m sprint performance. *Sports Biomechanics*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1951344>
- Škarabot, J., Brownstein, C. G., Casolo, A., Del Vecchio, A., & Ansdell, P. (2021). The knowns and unknowns of neural adaptations to resistance training. *European Journal of Applied Physiology*, 121(3), 675–685. <https://doi.org/10.1007/s00421-020-04567-3>
- Sorgente, V., Agudo-Ortega, A., Lopez-Hernandez, A., Santos del Cerro, J., Minciocchi, D., & González Ravé, J. M. (2023). Relationship between Maximum Force–Velocity Exertion and Swimming Performances among Four Strokes over Medium and Short Distances: The Stronger on Dry Land, the Faster in Water? *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 8(1), 20. <https://doi.org/10.3390/jfmk8010020>
- Stone, M. H., Moir, G., Glaister, M., & Sanders, R. (2002). How much strength is necessary? *Physical Therapy in Sport*, 3(2), 88–96. <https://doi.org/10.1054/ptsp.2001.0102>
- Stone, M. H., Sands, W. A., & Stone, M. E. (2004). The Downfall of Sports Science in the United States. *Strength & Conditioning Journal*, 26(2), 72.
- Strass, D. (1988). *Effects of maximal strength training on sprint performance of competitive swimmers*. 18, 149–156.
- Strzała, M., Stanula, A., Krężałek, P., Ostrowski, A., Kaca, M., & Głąb, G. (2019). Influence of Morphology and Strength on Front Crawl Swimming Speed in Junior and Youth Age-Group Swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(10), 2836–2845. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002084>
- Strzała, M., Stanula, A., Krężałek, P., Rejdych, W., Karpiński, J., Maciejczyk, M., & Radecki-Pawlik, A. (2021). Specific and Holistic Predictors of Sprint Front Crawl Swimming Performance. *Journal of Human Kinetics*, 78(1), 197–207. <https://doi.org/10.2478/hukin-2021-0058>
- Strzała, M., Stanula, A., Krężałek, P., Sadowski, W., Wilk, R., Pałka, T., Sokołowski, K., & Radecki-Pawlik, A. (2020). Body composition and specific and general strength indices as predictors of

- 100-m front crawl performance. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 22(4), 51–60.
- Suchomel, T. J., Nimphius, S., Bellon, C. R., & Stone, M. H. (2018). The Importance of Muscular Strength: Training Considerations. *Sports Medicine*, 48(4), 765–785. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0862-z>
- Suchomel, T. J., Nimphius, S., & Stone, M. H. (2016). The Importance of Muscular Strength in Athletic Performance. *Sports Medicine*, 46(10), 1419–1449. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0486-0>
- Suprak, D. N., Dawes, J., & Stephenson, M. D. (2011). The Effect of Position on the Percentage of Body Mass Supported During Traditional and Modified Push-up Variants. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(2), 497–503. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181bde2cf>
- Szczepan, S., Wróblewska, Z., Klich, S., Michalik, K., Gonjo, T., Olstad, B. H., & Rejman, M. (2023). Reliability of a semi-tethered front crawl sprint performance test in adolescent swimmers. *Frontiers in Physiology*, 14, 1260346. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1260346>
- Takagi, H., Nakashima, M., Ozaki, T., & Matsuuchi, K. (2014). Unsteady hydrodynamic forces acting on a robotic arm and its flow field: Application to the crawl stroke. *Journal of Biomechanics*, 47(6), 1401–1408. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.01.046>
- Takagi, H., Nakashima, M., Sengoku, Y., Tsunokawa, T., Koga, D., Narita, K., Kudo, S., Sanders, R., & Gonjo, T. (2023). How do swimmers control their front crawl swimming velocity? Current knowledge and gaps from hydrodynamic perspectives. *Sports Biomechanics*, 22(12), 1552–1571. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1959946>
- Takagi, H., Shimizu, Y., & Kodan, N. (1999). A Hydrodynamic Study of Active Drag in Swimming. *JSME International Journal Series B*, 42(2), 171–177. <https://doi.org/10.1299/jsmeb.42.171>
- Tanaka, H., Costill, D. L., Thomas, R., Fink, W. J., & Widrick, J. J. (1993). Dry-land resistance training for competitive swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25(8), 952–959.
- Tate, A., Harrington, S., Bunes, M., Murray, S., Trout, C., & Meisel, C. (2015). Investigation of In-Water and Dry-Land Training Programs for Competitive Swimmers in the United States. *Journal of Sport Rehabilitation*, 24(4), 353–362. <https://doi.org/10.1123/jsr.2014-0205>
- Tate, A., Turner, G. N., Knab, S. E., Jorgensen, C., Strittmatter, A., & Michener, L. A. (2012). Risk

- Factors Associated With Shoulder Pain and Disability Across the Lifespan of Competitive Swimmers. *Journal of Athletic Training*, 47(2), 149–158. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-47.2.149>
- Thng, S., Pearson, S., & Keogh, J. W. L. (2019). Relationships Between Dry-land Resistance Training and Swim Start Performance and Effects of Such Training on the Swim Start: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 49(12), 1957–1973. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01174-x>
- Thng, S., Pearson, S., Rathbone, E., & Keogh, J. W. L. (2020). The prediction of swim start performance based on squat jump force-time characteristics. *PeerJ*, 8, e9208. <https://doi.org/10.7717/peerj.9208>
- Thorstensson, A., Grimby, G., & Karlsson, J. (1976). Force-velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles. *Journal of Applied Physiology*, 40(1), 12–16. <https://doi.org/10.1152/jappl.1976.40.1.12>
- Torres-Ronda, L., & Curtis, R. M. (2024). Building the Foundations for Information Communication in Sports Science and Its Use in Decision Making. *Strength & Conditioning Journal*, 46(1), 74–81. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000811>
- Toussaint, H. M. (1990). Differences in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22(3), 409–415.
- Toussaint, H. M. (2002). Biomechanics of propulsion and drag in front crawl swimming. *ISBS - Conference Proceedings Archive*. <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/613>
- Toussaint, H. M., & Beek, P. J. (1992). Biomechanics of Competitive Front Crawl Swimming: *Sports Medicine*, 13(1), 8–24. <https://doi.org/10.2165/00007256-199213010-00002>
- Toussaint, H. M., Beelen, A., Rodenburg, A., Sargeant, A. J., De Groot, G., Hollander, A. P., & Van Ingen Schenau, G. J. (1988). Propelling efficiency of front-crawl swimming. *Journal of Applied Physiology*, 65(6), 2506–2512. <https://doi.org/10.1152/jappl.1988.65.6.2506>
- Toussaint, H. M., & Hollander, A. P. (1994). Energetics of Competitive Swimming: Implications for Training Programmes. *Sports Medicine*, 18(6), 384–405. <https://doi.org/10.2165/00007256-199418060-00004>
- Toussaint, H. M., Hollander, P., Berg, C., & Vorontsov, A. (2000). Biomechanics of swimming.

Exercise and Sport Science, 639–660.

- Toussaint, H. M., Roos, P. E., & Kolmogorov, S. (2004). The determination of drag in front crawl swimming. *Journal of Biomechanics*, 37(11), 1655–1663.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.02.020>
- Toussaint, H. M., & Vervoorn, K. (1990). Effects of Specific High Resistance Training in the Water on Competitive Swimmers. *International Journal of Sports Medicine*, 11(03), 228–233.
<https://doi.org/10.1055/s-2007-1024797>
- Tovin, B. J. (2006). Prevention and Treatment of Swimmer's Shoulder. *North American Journal of Sports Physical Therapy: NAJSPT*, 1(4), 166–175.
- Uebel, R. (1987). SWIMMING: Weight training for swimmers-- a practical approach. *Strength & Conditioning Journal*, 9(3), 38.
- Van Den Tillaar, R. (2019). Comparison of Kinematics and Muscle Activation between Push-up and Bench Press. *Sports Medicine International Open*, 03(03), E74–E81. <https://doi.org/10.1055/a-1001-2526>
- Van Manen, J. D., & Van Oossanen, P. (1988). Resistance. In *Principles of naval architecture* (Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 2, pp. 1–126). SNAME Jersey City, NJ.
<https://scholar.google.com/scholar?cluster=11741471329546178230&hl=en&oi=scholar>
- Vandewalle, H., Peres, G., Heller, J., Panel, J., & Monod, H. (1987). Force-velocity relationship and maximal power on a cycle ergometer: Correlation with the height of a vertical jump. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 56(6), 650–656.
<https://doi.org/10.1007/BF00424805>
- Vantorre, J., Chollet, D., & Seifert, L. (2014). Biomechanical analysis of the swim-start: A review. *Journal of Sports Science & Medicine*, 13(2), 223–231.
- Vechin, F. C., Conceição, M. S., Telles, G. D., Libardi, C. A., & Ugrinowitsch, C. (2021). Interference Phenomenon with Concurrent Strength and High-Intensity Interval Training-Based Aerobic Training: An Updated Model. *Sports Medicine*, 51(4), 599–605.
<https://doi.org/10.1007/s40279-020-01421-6>
- Veiga, S., Cala, A., G. Frutos, P., & Navarro, E. (2014). Comparison of starts and turns of national and

- regional level swimmers by individualized-distance measurements. *Sports Biomechanics*, 13(3), 285–295. <https://doi.org/10.1080/14763141.2014.910265>
- Veiga, S., & Roig, A. (2016). Underwater and surface strategies of 200 m world level swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 34(8), 766–771. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1069382>
- Veiga, S., Roig, A., & Gómez-Ruano, M. A. (2016). Do faster swimmers spend longer underwater than slower swimmers at World Championships? *European Journal of Sport Science*, 16(8), 919–926. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1153727>
- Vennell, R., Pease, D., & Wilson, B. (2006). Wave drag on human swimmers. *Journal of Biomechanics*, 39(4), 664–671. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.01.023>
- Verkhoshansky, Y., & Siff, M. (2009). *Supertraining* (M. Yessis, Trans.; 6e édition). Verkhoshansky.
- Vigotsky, A. D., Contreras, B., & Beardsley, C. (2015). Biomechanical implications of skeletal muscle hypertrophy and atrophy: A musculoskeletal model. *PeerJ*, 3, e1462. <https://doi.org/10.7717/peerj.1462>
- Vorontsov, A. (2010). Strength and power training in swimming. In L. Seifert, D. Chollet, & I. Mujika (Eds.), *World Book of Swimming: From Science to Performance*. Nova Science Publishers, Inc.
- Vorontsov, A. R. (2002). Multi-year training of young athlete as potential modifier of growth and development (Analysis of some biological concepts). *Proceedings of The FINA World Sport Medicine Congress “Sport Medicine in Aquatic Sports – the XXI Century”*, 58–60.
- Vorontsov, A. R., & Rumyantsev, V. A. (2000). Propulsive Forces in Swimming. In V. M. Zatsiorsky (Ed.), *Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention* (1st ed., pp. 205–231). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470693797.ch10>
- Wanivenhaus, F., Fox, A. J. S., Chaudhury, S., & Rodeo, S. A. (2012). Epidemiology of Injuries and Prevention Strategies in Competitive Swimmers. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 4(3), 246–251. <https://doi.org/10.1177/1941738112442132>
- Wei, C., Hu, Q., Shi, X., & Zeng, Y. (2022). A comparison for hydrodynamic performance of undulating fin propulsion on numerical self-propulsion and tethered models. *Ocean Engineering*, 265, 112471. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112471>
- Weldon, A., Duncan, M. J., Turner, A., Lockie, R. G., & Loturco, I. (2022). Practices of strength and

- conditioning coaches in professional sports: A systematic review. *Biology of Sport*.
<https://doi.org/10.5114/biolsport.2022.107480>
- Weldon, A., Duncan, M. J., Turner, A., Sampaio, J., Noon, M., Wong, D., & Lai, V. W. (2021). Contemporary practices of strength and conditioning coaches in professional soccer. *Biology of Sport*, 38(3), 377–390. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2021.99328>
- West, D. J., Owen, N. J., Cunningham, D. J., Cook, C. J., & Kilduff, L. P. (2011). Strength and Power Predictors of Swimming Starts in International Sprint Swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(4), 950–955. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181c8656f>
- Widrick, J. J., Trappe, S. W., Costill, D. L., & Fitts, R. H. (1996). Force-velocity and force-power properties of single muscle fibers from elite master runners and sedentary men. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 271(2), C676–C683. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.1996.271.2.C676>
- Wilkie, D. R. (1949). The relation between force and velocity in human muscle. *The Journal of Physiology*, 110(3–4), 249–280. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1949.sp004437>
- Wilson, J. M., Marin, P. J., Rhea, M. R., Wilson, S. M. C., Loenneke, J. P., & Anderson, J. C. (2012). Concurrent Training: A Meta-Analysis Examining Interference of Aerobic and Resistance Exercises. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(8), 2293–2307. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31823a3e2d>
- Wirth, K., Keiner, M., Fuhrmann, S., Nimmerichter, A., & Haff, G. G. (2022). Strength Training in Swimming. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5369. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095369>
- Witvrouw, E., Mahieu, N., Danneels, L., & McNair, P. (2004). Stretching and Injury Prevention: An Obscure Relationship. *Sports Medicine*, 34(7), 443–449. <https://doi.org/10.2165/00007256-200434070-00003>
- Włodarczyk, M., Adamus, P., Zieliński, J., & Kantanista, A. (2021). Effects of Velocity-Based Training on Strength and Power in Elite Athletes—A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10), 5257. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105257>

- World Aquatics. (2024a, July 1). *Competition regulations*.
<https://www.worldaquatics.com/rules/competition-regulations>
- World Aquatics. (2024b, September 18). *Swimming Points*. World Aquatics.
<https://www.worldaquatics.com/swimming/www.worldaquatics.com/swimming/points>
- Yamauchi, J., Mishima, C., Fujiwara, M., Nakayama, S., & Ishii, N. (2007). Steady-state force–velocity relation in human multi-joint movement determined with force clamp analysis. *Journal of Biomechanics*, 40(7), 1433–1442. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2006.06.010>
- Yeater, R. A., Martin, R. B., White, M. K., & Gilson, K. H. (1981). Tethered swimming forces in the crawl, breast and back strokes and their relationship to competitive performance. *Journal of Biomechanics*, 14(8), 527–537. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(81\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0021-9290(81)90002-6)
- Zamparo, P. (2006). Effects of age and gender on the propelling efficiency of the arm stroke. *European Journal of Applied Physiology*, 97(1), 52–58. <https://doi.org/10.1007/s00421-006-0133-9>
- Zamparo, P., Antonutto, G., Capelli, C., Francescato, M. P., Girardis, M., Sangoi, R., Soule, R. G., & Pendergast, D. R. (1996). Effects of body size, body density, gender and growth on underwater torque. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 6(5), 273–280. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.1996.tb00470.x>
- Zamparo, P., Capelli, C., & Pendergast, D. (2011). Energetics of swimming: A historical perspective. *European Journal of Applied Physiology*, 111(3), 367–378. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1433-7>
- Zamparo, P., Pendergast, D. R., Mollendorf, J., Termin, A., & Minetti, A. E. (2005). An energy balance of front crawl. *European Journal of Applied Physiology*, 94(1–2), 134–144. <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1281-4>
- Zamparo, P., Pendergast, D. R., Termin, A., & Minetti, A. E. (2006). Economy and efficiency of swimming at the surface with fins of different size and stiffness. *European Journal of Applied Physiology*, 96(4), 459–470. <https://doi.org/10.1007/s00421-005-0075-7>
- Zamparo, P., Pendergast, D. R., Termin, B., & Minetti, A. E. (2002). How fins affect the economy and efficiency of human swimming. *Journal of Experimental Biology*, 205(17), 2665–2676. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.17.2665>

- Zera, J. N., Nagle, E. F., Connell, E., Curtin, E., Marget, W., Simonson, A. P., Nagai, T., Abt, J., & Lephart, S. (2022). Gender Differences and the Influence of Body Composition on Land and Pool-Based Assessments of Anaerobic Power and Capacity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 7902. <https://doi.org/10.3390/ijerph19137902>
- Zouita, A., Darragi, M., Bousselmi, M., Sghaeir, Z., Clark, C. C. T., Hackney, A. C., Granacher, U., & Zouhal, H. (2023). The Effects of Resistance Training on Muscular Fitness, Muscle Morphology, and Body Composition in Elite Female Athletes: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 53(9), 1709–1735. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01859-4>

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparaison des différents paramètres énergétiques, dynamiques et spatio-temporels entre deux groupes. Les valeurs ont été normalisées pour que la production d'énergie métabolique soit équivalente (1000 W) entre les deux groupes (adapté à partir de [Toussaint, 1990]).

Tableau 2 : Effets des différentes méthodes d'entraînement en résistance sur les adaptations en hypertrophie, en force et en puissance (na : conclusions limitées) [Suchomel et al., 2018].

Tableau 3 : Impact des différentes méthodes d'entraînement non-spécifiques à sec sur la performance en natation [Fone & van den Tillar, 2022].

Tableau 4 : Impact des différentes méthodes d'entraînement spécifiques à sec et dans l'eau sur la performance en natation [Fone & van den Tillar, 2022].

Tableau 5 : Caractéristiques des participants.

Tableau 6 : Résultats des profilages charge-vitesse et des paramètres de course.

Tableau 7 : Données descriptives des paramètres évalués à sec et dans l'eau, présentées pour la population générale ainsi qu'en fonction du sexe.

Tableau 8 : Coefficients de corrélation de Spearman entre les paramètres charge-vitesse en natation et les paramètres force-vitesse à sec. * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$.

Tableau 9 : Caractéristiques des 18 participants des groupes contrôle et expérimental.

Tableau 10 : Evolutions entre les mesures pré- et post-intervention des différents paramètres évalués sur les deux groupes.

Tableau 11 : Différences entre le groupe expérimental (GE) et le groupe contrôle (GC) des évolutions entre les mesures pré- et post-intervention.

Tableau 12 : Caractéristiques des participants à l'étude, (WA = World Aquatics).

Tableau 13 : Périodisation du travail à sec et de l'entraînement dans l'eau au cours de la saison entre la première et la troisième session de test.

Tableau 14 : Évolutions des paramètres issus des profilages force-vitesse réalisés sur les exercices de préparation physique à sec. SWC : Smallest Worthwhile Change, * : évolutions supérieures au SWC pour les évolutions positives ou inférieures au SWC pour les évolutions négatives.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Nomenclature proposée par Ruiz-Navarro et al. en 2023.

Figure 2 : Modélisation des contributions aérobie et anaérobie à la production énergétique totale en fonction de la distance de course. Les valeurs cibles représentées par des symboles correspondent aux épreuves de 50, 100, 200, 400, 800 et 1500 m nage libre homme respectivement [Rodriguez & Mader, 2011].

Figure 3 : Représentation schématique de la cascade énergétique appliquée à la locomotion aquatique humaine (adaptée de [Zamparo et al., 2011]).

Tableau 1 : Comparaison des différents paramètres énergétiques, dynamiques et spatio-temporels entre deux groupes. Les valeurs ont été normalisées pour que la production d'énergie métabolique soit équivalente (1000 W) entre les deux groupes (adapté à partir de [Toussaint, 1990]).

Figure 4 : Bilan des forces régissant la position et le déplacement du nageur.

Figure 5 : Le nombre de Froude et le système de vague évoluant avec une vitesse de nage croissante. L : longueur caractéristique du système (ici le nageur); l : longueur de l'onde. A. [Vennell et al., 2006].

Figure 6 : Les différentes composantes de la force propulsive en natation (adaptée de [Toussaint et al., 2000]).

Figure 7 : A. Force propulsive au cours d'un cycle obtenue par Computational Fluid Dynamics en comparaison à une étude expérimentale. B. Trajectoire de la main associée [Samson et al., 2017].

Figure 8 : Signal d'activation musculaire issu de mesures EMG représenté au cours des différentes phases du cycle de mouvement de bras en crawl : la phase propulsive (« pull-through ») et la phase aérienne (« recovery ») [Pink et al., 1991].

Figure 9 : Morphotype et surface des coupes frontales des nageurs de haut-niveau d'après l'étude précurseur de Bulgakova & Vorontsov (1978) [Cazorla, 1994].

Figure 10 : Chronologie des adaptations survenant avec l'entraînement en force [Hughes et al., 2018].

Figure 11 : « swim bench » utilisé lors de l'entraînement à sec afin d'imposer une résistance tout en imitant le mouvement de nage [Lutula, 2019].

Figure 12 : Équipements permettant l'application de résistances externes à l'avancement du nageur (A. : poids en fonte ; B. : seau d'eau ; C. : élastique [Girolid et al., 2007]).

Figure 13 : Équipements permettant l'augmentation des masses d'eau à déplacer par le nageur pour se propulser (A. : plaquettes ; B. : parachute ; C. « drag suit »).

Figure 14 : Tailles d'effets des différents types d'entraînement (force, endurance, combinaison des deux) sur les paramètres associés à la force (hypertrophie, force, puissance des membres inférieurs) et à l'endurance (consommation maximale d'oxygène, taux de masse grasse) [Wilson et al., 2012].

Figure 15 : Relations force-vitesse linéaire et hyperbolique issues des travaux de Hill en 1922 (a.) et 1938 (b.) [Alcazar et al., 2019].

Figure 16 : Modèle hyperbolique avec correction linéaire présenté dans les résultats de Abbott & Wilkie en 1953 (a.) et modèle en double hyperbole présenté dans les résultats de Edman en 1988 (b.) [Alcazar et al., 2019].

Figure 17 : Profils force-vitesse et puissance-vitesse tels que évalués sur un mouvement poly-articulaire [Jaric, 2015].

Figure 18 : Placement d'un encodeur linéaire (Gymaware) destiné à mesurer la vitesse de la barre sur différents mouvements.

Figure 19 : Système d'évaluation de la force propulsive grâce au protocole de nage attachée (1 : Jauge de déformation, 2 : appareil d'acquisition des données, 3 : ordinateur) [Morouço et al., 2014].

Figure 20 : Illustration schématique du MAD-System [Toussaint et al., 2000].

Figure 21 : Production de force dans les différentes conditions de nage (libre, attachée, semi-attachée). Adaptée de [Cortesi et al., 2024].

Figure 22 : Méthode SPM des petites perturbations de vitesse : a) corps hydrodynamique engendrant une traînée additionnelle pour le nageur ; b) positionnement du corps hydrodynamique par rapport au nageur [Kolmogorov & Duplishcheva 1992].

Figure 23 : Descriptif de fonctionnement du système ADES [Bideau et al., 2003; Nicolas et al., 2007].

Figure 24 : Le 1080 Sprint, encodeur linéaire incluant également une résistance motorisée.

Figure 25 : Comparaison des modèles linéaire et “résiduel” utilisés pour l’estimation de D_a et F_{prop} . F_A : mesure réalisée en nage entièrement attachée, F_{SA} : mesures réalisées en nage semi-attachée (adapté de Cortesi et al., 2024).

Figure 26 : Relations force-vitesse et puissance-vitesse ainsi que les zones associées aux différentes qualités mesurées [Hanon, 2019].

Figure 27 : Vue d’ensemble de l’organisation des études réalisées dans le cadre de cette thèse

Figure 28 : Principales qualités physiques les plus ciblées par les préparateurs physiques interrogés.

Figure 29 : Principaux exercices prescrits par les préparateurs physiques interrogés.

Figure 30 : Utilisation, pratiques et justifications de l’entraînement cardiovasculaire complémentaire tels que reportés par les préparateurs physiques.

Figure 31 : Utilisation, pratiques et justifications de l’entraînement complémentaire de la mobilité telles que reportées par les préparateurs physiques.

Figure 32 : Perceptions des préparateurs physiques à propos des entraînements prescrits. Chaque participant a été invité à classer de 1 à 4 les raisons qui justifient son intervention sur le terrain.

Figure 33 : Modalités appliquées au transfert de l’entraînement à sec vers la nage.

Figure 34 : Résumé des principaux paramètres suivis et contrôlés durant les périodes d’entraînement tels que reportés par les préparateurs physiques interrogés.

Figure 35 : Installation du système de résistance motorisé et détermination de la vitesse horizontale

Figure 36 : Modèle de la roue à aube, illustrée par [Zamparo et al., 2005], inspiré de [Martin et al., 1981].

Figure 37 : Résultats individuels des régressions linéaires charge-vitesse, présentant également la moyenne interindividuelle et l’écart-type des résultats de groupe.

Figure 38 : (A) Coefficient de corrélation r de Pearson entre les paramètres de course sur 100 m et les paramètres issus du profilage L-V. (B) Coefficient de corrélation R de Pearson entre les paramètres de course sur 200 m et les paramètres issus du profilage L-V.

Figure 39 : Représentation globale des profils des nageurs, en tenant compte de la variable de vitesse lors de l’épreuve du 100 m nage libre et d’autres variables issues de la session de tests. Chaque ligne représente un nageur.

Figure 40 : Illustration des exercices évalués. De gauche à droite : tirage vertical, développé couché, et tirage allongé.

Figure 41 : Coefficients de corrélation partiels et leur intervalle de confiance (95 %) entre les capacités maximales de vitesse et de force à sec avec les résultats des profils charge-vitesse en natation. Les échantillons ont suivi la méthode bootstrap afin d'obtenir les intervalles de confiance.

Figure 42 : Coefficients de corrélation partiels et leur intervalle de confiance (95 %) entre les valeurs de force à sec des trois exercices à sec avec les résultats des profils charge-vitesse en natation. Les échantillons ont suivi la méthode bootstrap afin d'obtenir les intervalles de confiance.

Figure 43 : Vue d'ensemble du protocole expérimental.

Figure 44 : Illustration de la position de départ et de la position de décollage / réception du squat jump lors du protocole de mesure.

Figure 45 : Évolutions des paramètres issus du profilage charge-vitesse dans l'eau entre T1 et T3 (intervalles de confiance à 95% et SWC fixé à $0,2 \times CV$).

Figure 46 : Coefficient de corrélation Rho de Spearman entre les évolutions de F_{max} (A. & B.) et de P_{max} (C. & D.) sur les quatre exercices de préparation physique et les évolutions des paramètres dans l'eau de T1 à T2 (A. & C.) et de T2 à T3 (B. & D.).

Figure 47 : Approche générale du transfert entre la préparation physique et la nage telle qu'illustrée dans la littérature (adapté de Wirth et al., 2022)

Figure 48 : Modèle proposé afin d'optimiser le transfert de force entre les différentes formes d'entraînement des nageurs

ANNEXES

Annexe A : Exemple de rapports fournis aux entraîneurs dans le cadre d'un suivi des qualités aquatiques (Fiche n°1) et à sec (Fiche n°2)

Fiche n°1



COMPTE-RENDU TESTS À SEC

DATE DES TESTS : 04/04/2024
NAGEUSE : XXX



RAPPEL CONCERNANT LES DONNÉES

- Données de vitesse, force et puissance maximales pour chaque mouvement et comparaison avec la moyenne de la population élite que nous avons pu tester. Sur le squat jump, la comparaison est à prendre avec du recul puisque peu de sujets ont été testés.
- Equilibre Force / Vitesse sur le DC et les tirages : comparaison des profils avec le profil moyen de la population élite testée. Un déficit négatif signifie qu'il y a un déficit de force et un déficit positif signifie qu'il y a un déficit de vitesse.
- Equilibre Force / Vitesse sur le Squat Jump : l'indicateur utilisé est celui de JB Morin qui définit un profil optimal pour différents angles de poussée. J'ai pris comme référence l'angle à 30° qui se rapproche de l'angle de la poussée lors d'un départ plongé. Un pourcentage négatif représente également un déficit de force et un pourcentage positif un déficit de vitesse pour cet indicateur.



PROFIL FORCE-VITESSE À SEC

		29/03/23	29/08/2023	02/11/2023	04/04/2024	Moyenne Population Femme testée
Développé couché	Vmax (en m/s)	1,82	1,72	1,82	1,81	1,8
	Fmax (en N)	704	649	623	671	533
	Pmax (en W)	320	280	284	303	240
	équilibre force-vitesse	21%	16%	8%	12%	n=31
Tirage banc	Vmax	2,14	2,06	2,06	2,05	1,87
	Fmax	892	798	747	832	722
	Pmax	478	411	385	426	337
	équilibre force-vitesse	4%	11%	-3%	3%	n=14
Tirage poulie	Vmax	2,30	2,18	2,20	2,16	2,32
	Fmax	1127	1069	1039	1116	738
	Pmax	649	583	571	603	386
	équilibre force-vitesse	38%	27%	24%	30%	n=31
Squat Jump	Vmax		2,44	2,41	2,68	2,23
	Fmax		2006	1984	1869	1666
	Pmax		1225	1197	1250	931
	équilibre force-vitesse (à partir du profil optimal)		54%	64%	32%	n=7

- Amélioration significative de la puissance sur tous les mouvements, en comparaison des tests du mois d'août et de novembre.
- Ce sont des améliorations qui se sont effectuées via une amélioration des niveaux de force principalement, sauf sur le Squat Jump.
- La diminution du niveau de force maximale sur le squat jump ne semble pas être défavorable à la performance puisque le profil s'est équilibré en faveur d'une amélioration de la vitesse et de la puissance maximale (profil plus proche du profil optimal)



Fiche n°2



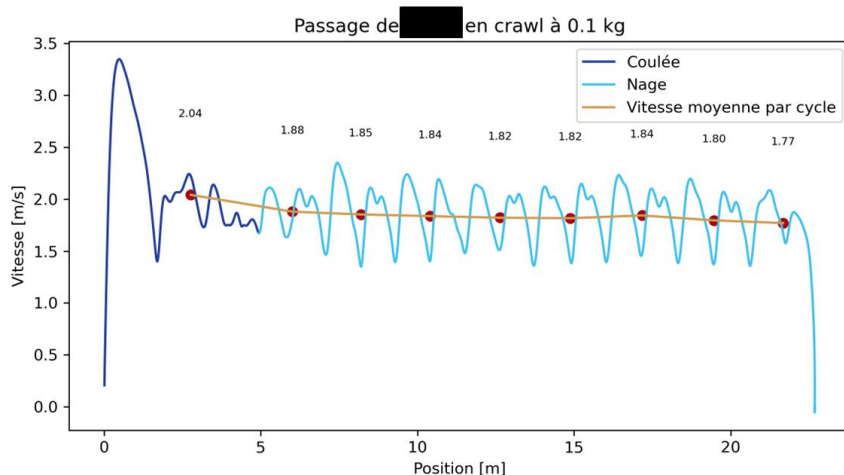
COMPTE-RENDU TESTS I 080

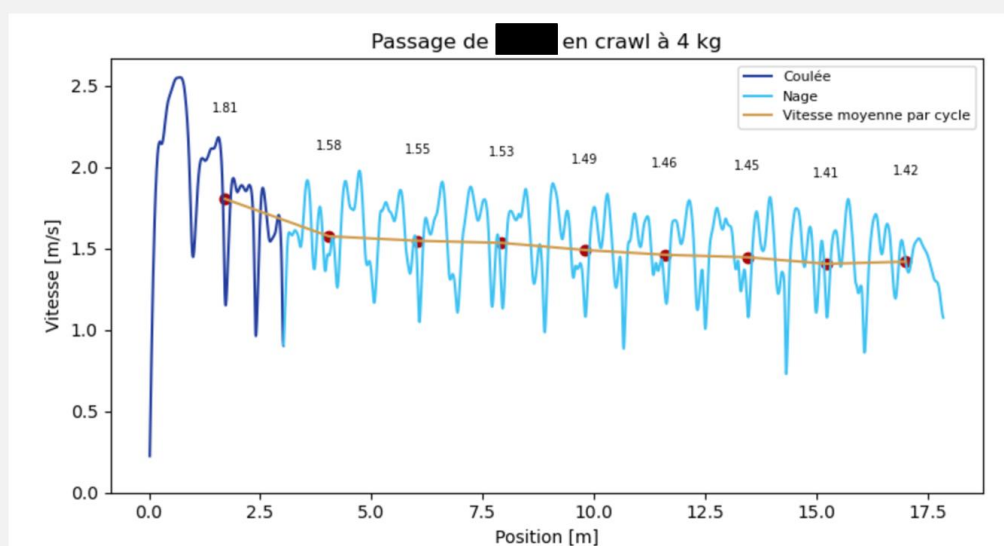
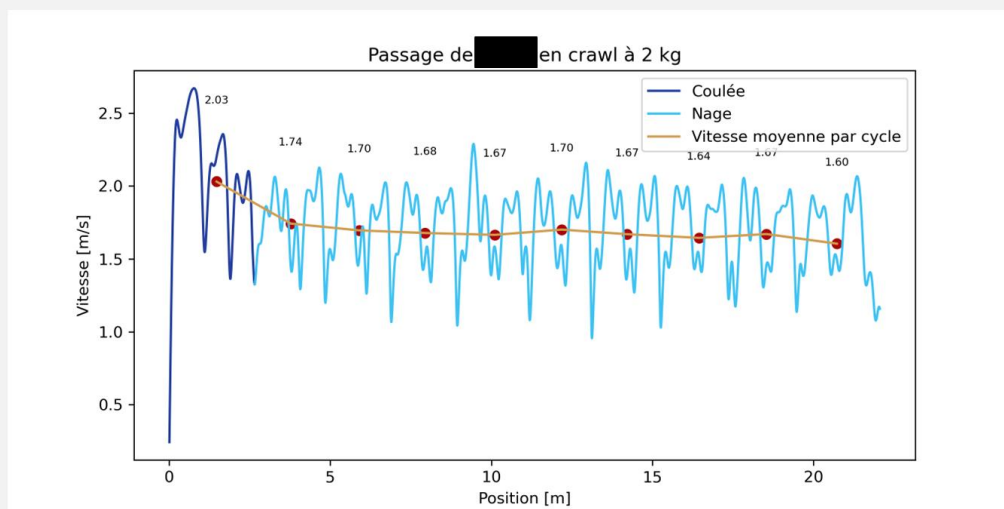
DATE DES TESTS : 04/04/2024
NAGEUR : XXX

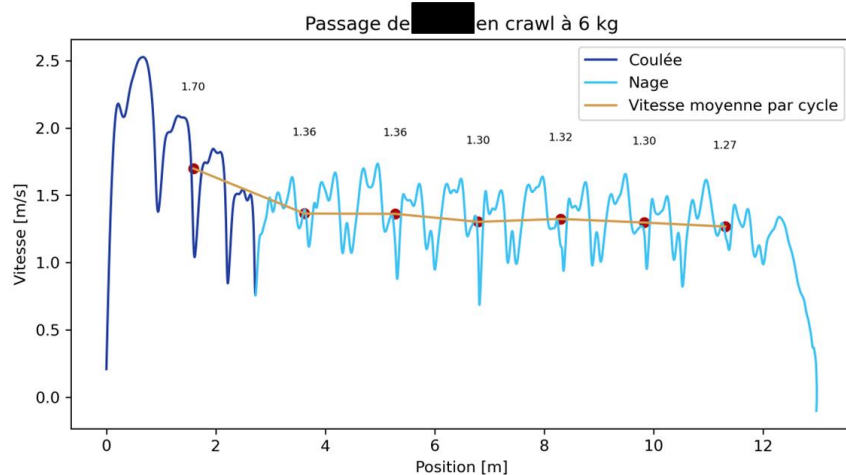


RAPPEL CONCERNANT LES DONNÉES

- Les données de vitesse maximale théorique correspondent à la vitesse estimée du nageur si aucune charge ne lui était appliquée. C'est une vitesse de nage qui ne tient pas compte de l'élan provoqué par la poussée au mur et la coulée.
- La charge maximale correspond à la charge à partir de laquelle le nageur ne pourrait plus avancer. Ce paramètre représente les capacités d'application de la force du nageur dans l'eau.
- La puissance propulsive est le produit de la vitesse maximale théorique et de la force propulsive du nageur calculée.
- Les résistances à l'avancement sont représentées par un coefficient exprimé indépendamment de la vitesse, il peut donc représenter deux choses : les résistances liées à la morphologie du nageur (surface frontale et forme du corps) et celles liées à sa technique (placement).



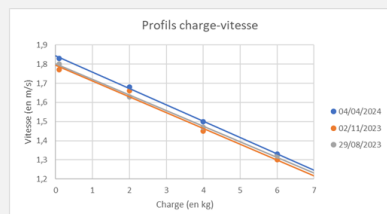




PROFIL CHARGE-VITESSE CRAWL

Charge (kg)	Vitesses (m/s)				
	19/05/2022	30/03/2023	29/08/2023	02/11/2023	04/04/2024
0,1	1,83	1,77	1,8	1,77	1,83
2	1,69	1,62	1,63	1,66	1,68
4	1,56	1,41	1,47	1,45	1,5
6	1,42	1,29	1,32	1,3	1,33
Charge (kg)	Vitesses (en % de la vitesse maximale)				
	19/05/2022	30/03/2023	29/08/2023	02/11/2023	04/04/2024
0,1	100%	100%	100%	99%	99%
2	92%	91%	91%	92%	91%
4	85%	79%	82%	81%	81%
6	77%	73%	73%	72%	72%

Amélioration de la vitesse maximale essentiellement due à une diminution des résistances à l'avancement. L'amélioration des niveaux de force (charge maximale) et de puissance propulsive pourrait encore constituer un axe d'amélioration en vue de l'optimisation des performances



Crawl	19/05/2022	30/03/2023	30/08/2023	02/11/2023	04/04/2024	Moyenne Elite homme (n=46)
Vitesse maximale théorique (m/s)	1,83	1,78	1,8	1,8	1,84	1,88
Charge maximale théorique (en kg)	26,6	21,0	22,1	21,6	21,6	28,7
Puissance propulsive (en Watt)	202	172	184	178	185	229
Résistances à l'avancement (en kg/m)	33	31	31	31	29	34



Annexe B : Questionnaire distribués aux préparateurs physiques et entraîneurs concernés
par l'étude n°1



Partie A: Informations personnelles

A1. Votre Nom et votre Prénom :

A2. Êtes-vous :

Entraîneur et préparateur physique ☐

Préparateur physique uniquement ☐

A3. Depuis combien de temps exercez-vous des actions de préparateur physique en natation ?

A4. Quelle(s) formation(s) avez-vous suivi pour exercer votre métier ?

A5. Exercez-vous ou avez-vous exercé en tant que préparateur physique dans d'autres activités que la natation ?

Oui ☐

Non ☐

A6. Si oui la / lesquelles ?

A7. Dans quelle structure occupez-vous le rôle de préparateur physique (PP) et/ou d'entraîneur en natation ?

A8. Sur quel(s) groupe(s) encadrez-vous des séances de PP ?

Groupe Jeunes ☐

CAF ☐



Groupe Elite ☐

Autre ☐

Autre

A9. Votre groupe est-il plutôt constitué de :

Sprinters ☐

Demi-fondeurs / fondeurs ☐

Groupe mixte ☐

Pas de spécificité ☐

A10. Quel est le niveau des nageurs que vous encadrez en PP ?

Régional ☐

National jeunes / juniors ☐

National TC (N1/N2) ☐

Sélections internationales jeunes (CEJ / CMJ / COMEN) ☐

Sélections internationales TC ☐

Partie B: Description du travail à sec

B1. Combien d'entraînements à sec (hors échauffement à sec) vos nageurs ont-ils par semaine ?

1 ☐

2 ☐

3 ☐

4 ☐

> 4 ☐



B2. Combien de temps y consacrent-ils par semaine ?

< 1h ☐

2-3h ☐

3-4h ☐

5-6h ☐

> 6h ☐

B3. Lors de ces séances, quel type de travail effectuez-vous principalement ? (concentrique / excentrique etc... - avec charges / poids de corps)

B4. Quelles qualités physiques faites-vous principalement travailler aux nageurs ?

Souplesse ☐

Posture (gainage / équilibre) ☐

Coordination (dissociation intra / inter musculaire) ☐

Endurance de force ☐

Force ☐

Vitesse (fréquence / vitesse) ☐

Puissance (combinaison force x vitesse) ☐

B5. Concernant la force maximale, sous quelle(s) forme(s) la faites-vous travailler ?

Concentrique ☐

Excentrique ☐

Isométrique ☐

Stato-dynamique ☐

Mes nageurs ne travaillent pas la force maximale ☐



Autre

☐

Autre

B6. Concernant le travail de la force maximale, en règle générale quel est :

Le nombre de séries

Le nombre de répétitions par série

Le temps de récupération entre les séries

La charge relative imposée

B7. Concernant la puissance maximale, sous quelle(s) forme(s) la faites-vous travailler ?

Concentrique

☐

Pliométrique

☐

Mes nageurs ne travaillent pas la puissance maximale

☐

Autre

☐

Autre

B8. Concernant le travail de la puissance maximale, en règle générale quel est :

Le nombre de séries

Le nombre de répétitions par série

Le temps de récupération entre les séries

La charge relative imposée

B9. Quels mouvements faites-vous le plus travailler aux nageurs (au moins 1 fois par semaine) ?

Développé-couché

☐

Dips

☐



Tirage allongé ☐

Tirage horizontal ☐

Tirage vertical ☐

Tractions ☐

Squat ☐

Hip-Thrust ☐

Epaulé jeté ☐

Arraché ☐

Soulevé de terre ☐

Gainage ☐

Biceps curl ☐

Autre ☐

Autre

B10. Adaptez-vous certains mouvements aux spécificités d'une / plusieurs nage(s)

B11. Quel ratio travail des membres supérieurs / travail des membres inférieurs respectez-vous ?

Autant de travail des membres inférieurs que des membres supérieurs ☐

Moins de travail des membres inférieurs que des membres supérieurs ☐

Plus de travail des membres inférieurs que des membres supérieurs ☐

Je ne fais pas travailler les membres inférieurs ☐

Je ne fais pas travailler les membres supérieurs ☐



B12. Concernant les membres SUPERIEURS, quelles qualités faites-vous travailler à vos nageurs (cochez les cases) et à quelle période de la saison (ex : durée avant compétition cible / reprise de saison etc...) ?

Hypertrophie ☐

Commentaire

Force maximale ☐

Commentaire

Puissance maximale ☐

Commentaire

Vitesse maximale ☐

Commentaire

Endurance de force ☐

Commentaire

Endurance de puissance ☐

Commentaire

B13. Concernant les membres INFERIEURS, quelles qualités faites vous travailler à vos nageurs (cochez les cases) et à quelle période de la saison (ex : durée avant compétition cible / reprise de saison etc...) ?

Hypertrophie ☐

Commentaire



Force maximale

Commentaire

Puissance maximale

Commentaire

Vitesse maximale

Commentaire

Endurance de force

Commentaire

Endurance de puissance

Commentaire

B14. Différenciez-vous les qualités musculaires travaillées sur les membres supérieurs et celles travaillées sur les membres inférieurs ?

Si oui pourquoi et comment ?

Oui

Non

B15. Est-ce que vous mettez en place un travail cardiovasculaire complémentaire à la nage ? (course / vélo / autre) ?

Oui

Non



B16. Si oui, le(s)quel(s) et pour quelles raisons ?

B17. Mettez-vous en place un travail de mobilité également ?

Oui ☐

Non ☐

B18. Si oui sous quelles formes (statique / dynamique) et pour quelles raisons ?

B19. Si oui, à quel moment placez-vous ce travail ?

Lors de séances dédiées ☐

Routine avant entraînement ☐

Routine après entraînement ☐

Partie C: Réflexion sur votre intervention en tant que préparateur physique

C1. Quelles sont les principales sources d'informations sur lesquelles vous basez votre travail ? (classez-les : 1 = la plus importante, 4= la moins importante)

L'expérience ☐

La littérature ☐

Les discussions avec les pairs ☐

La formation théorique ☐

C2. Quel degré d'importance accordez-vous à chaque objectif de la préparation physique ? (1 = le plus important / 4 = le moins important)

Améliorer des performances ☐

Prévenir les blessures ☐

"Construire" un sportif polyvalent ☐

Préparer le nageur à mieux tolérer à la charge d'entraînement ☐



C3. A partir de quels critères établissez-vous le degré d'importance des mouvements travaillés (classez les, 1= le plus important ; 4 = le moins important) ?

La ressemblance avec la nage / la spécificité ☐

Le groupe musculaire engagé ☐

Les effets sur la performance ☐

La discussion avec les pairs ☐

C4. Pour vous, quelle est la part de la préparation physique dans la construction de la performance aquatique finale (1= peu importante / 10 très importante) ?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Partie D: Transfert du travail à sec vers la nage

D1. Comment collaborez-vous avec l'entraîneur ?

D2. Etes-vous en accord avec l'entraîneur sur l'importance de votre rôle ?

D3.

Dans une semaine "classique" (hors période d'affutage / reprise), à quelle fréquence vos nageurs s'entraînent-ils en préparation physique à sec ET dans l'eau dans la même journée (ces deux séances peuvent ne pas s'enchaîner).

(Si cette fréquence est trop variable vous pouvez

sélectionner deux réponses)

Jamais ☐

Une fois par semaine ☐

Deux fois ☐



- Trois fois ☐
- Quatre fois ☐
- Cinq fois ☐
- Six fois ☐
- Sept fois ☐

D4. Lorsque une séance à sec et une séance dans l'eau sont placées dans la même journée, en moyenne combien de fois par semaine ces séances s'enchainent-elles ?

- Jamais ☐
- Une fois par semaine ☐
- Deux fois ☐
- Trois fois ☐
- Quatre fois ☐
- Cinq fois ☐
- Six fois ☐
- Sept fois ☐

D5. Dans ces cas où les deux types d'entrainements s'enchainent, quel est généralement l'ordre entre les entrainements ?

- Entrainement dans l'eau puis entrainement à sec ☐
- Entrainement à sec puis entrainement dans l'eau ☐
- Les deux de manière équivalente ☐

D6. Cet ordre est-il dû :

- A votre choix ☐
- A des contraintes horaires ☐
- A des contraintes matérielles ☐
- Autre ☐

Autre



D7. Comment optimisez-vous le transfert entre la préparation physique et la nage ?

Planification des entraînements à sec et dans l'eau

☐

Commentaire

Place des séances à sec avant ou après séance

☐

Commentaire

Priorités dans la programmation fixées avec le staff

☐

Commentaire

Autre

☐

Autre

D8. Quel travail est mis en place dans l'eau dans ce but ? (résistance / survitesse / technique etc...)

D9. Utilisez-vous le travail intégré (enchaînement entre séries à sec et dans l'eau) ?

Oui

☐

Non

☐



D10. Si oui, quelle est la forme principale du travail dans l'eau (intensité / volume / qualité travaillée etc...)

D11. Si oui, quelle est alors la forme principale des séries à sec (mode de contraction / qualité travaillée / Charge etc ...) ?

D12. Associez-vous les progrès constatés à sec avec les progrès dans l'eau ?

Oui ☐

Non ☐

D13. Si oui, grâce à quels indicateurs ?

Partie E: Protocoles de mesure et de suivi des qualités physiques

E1. Un suivi de la charge d'entraînement (sur les entraînements à sec ou dans l'eau) est-il réalisé sur les nageurs que vous encadrez ?

Oui ☐

Non ☐

E2. Si oui, quels indicateurs de monitoring utilisez-vous ?

Volume (en minute ou heure) ☐

Volume (en mètre ou kilomètre) ☐

Fréquence Cardiaque ☐

Variabilité de la Fréquence Cardiaque ☐

RPE (difficulté perçue de l'effort) ☐



Autre



Autre

E3. Si vous avez construit personnellement un protocole de contrôle de la charge, merci de le détailler ci-dessous :

E4. Contrôlez-vous d'autres facteurs de performance / forme ?

Le sommeil ☐

La nutrition ☐

L'hydratation ☐

Aucun ☐

Autre ☐

Autre

E5. Comment évaluez-vous les nageurs sur les mouvements travaillés à sec ?

Progression chiffrée de la charge (1RM ou % de la 1 RM) ☐

Perception de l'effort ☐

Progression chiffrée de la force ☐

Progression chiffrée de la vitesse ☐

Progression chiffrée de la puissance ☐

Progression de la charge sur + de 15RM (Endurance de force) ☐

Je ne réalise pas d'évaluation sur les séances de PP ☐



Autre



Autre

E6. Si vous évaluez la force / puissance / vitesse à sec, avec quel outil ?

SkiErg ☐

Wattbike (ou autres ergomètres) ☐

Applications mobiles ☐

Beast ☐

Gymaware ☐

Vitruve fit ☐

VMaxPro ☐

Myotest ☐

Autre ☐



Autre

E7. Sous quelle forme exactement (détaillez le protocole) ?

E8. A quelle fréquence réalisez-vous ces évaluations ?

Titre : Apport du profilage force-vitesse pour l'évaluation du transfert de la préparation physique à sec vers la performance en natation sprint de haut niveau

Mots clés : biomécanique, préparation physique, profilage force-vitesse, efficacité propulsive, résistance à l'avancement, optimisation de la performance

Résumé : La préparation physique à sec constitue un élément essentiel de l'entraînement moderne en natation, visant notamment l'amélioration de la condition physique et de la performance des sportifs. Cette thèse explore la problématique cruciale du transfert entre la préparation physique à sec et la performance en sprint, dans le but d'optimiser ce processus pour les nageurs de haut niveau. Ce travail a débuté par la diffusion d'un questionnaire qui a permis de recueillir les pratiques de terrain auprès des préparateurs physiques des structures de haut niveau en France et de les confronter aux recommandations scientifiques. Différentes phases expérimentales ont ensuite permis de répondre à plusieurs objectifs. Les méthodologies de mesure se sont appuyées sur l'utilisation du profilage force-vitesse à sec ainsi que du profilage charge-vitesse et de l'estimation des

paramètres de résistance à l'avancement dans l'eau. Ainsi, nous avons pu identifier le lien entre les paramètres issus du profilage charge-vitesse en crawl avec la performance en compétition ainsi qu'avec les paramètres issus du profilage force-vitesse réalisé sur différents exercices de préparation physique à sec. Nous avons également pu analyser les effets d'un entraînement en force maximale à sec sur les paramètres mentionnés ci-dessus. Enfin la dernière étape consistait à suivre les évolutions parallèles de ces différents paramètres au cours d'une saison. Les résultats de cette thèse visent à fournir des outils d'aide à la décision pour l'optimisation de la performance des nageurs de haut niveau et à apporter une contribution scientifique à l'amélioration des méthodes de monitoring en natation.

Title: Contribution of the force-velocity profiling to the evaluation of transfer from dry-land strength and conditioning to performance in high-level sprint swimming

Keywords : biomechanics, strength & conditioning, force-velocity profiling, propulsive efficiency, active drag, performance optimization

Abstract: Dry-land strength and conditioning (S&C) is a key component of modern swim training, aimed at improving physical condition and performance of athletes. This thesis examines the critical issue of the transfer between dry-land S&C and sprint performance, with the goal of optimizing this process for elite swimmers. This work began with the distribution of a questionnaire to collect field practices from S&C coaches in high-level training centers across France and to compare them to scientific recommendations. Various experimental phases were then carried out to achieve several objectives. Measurement methods relied on dry-land force-velocity profiling, swimming load-velocity profiles, and the estimation of in-water

drag parameters. Therefore, we identified the relationship between parameters derived from front crawl load-velocity profiling and competition performance, and with parameters from force-velocity profiling conducted on different dry-land exercises. Then we analyzed the effects of dry-land maximal strength training on the aforementioned parameters. Finally, the last part of the research monitored the parallel evolutions of these parameters over a season. The results of this thesis aim to provide decision-support tools to optimize the performance of elite swimmers and contribute scientifically to the improvement of monitoring methods in swimming.