

Université Paris Descartes

Ecole doctorale : sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain

Laboratoire « Sport, Expertise et Performance »

Laboratoire « Institut de Recherche bio-Médicale et d'Epidémiologie du Sport »

Les limites de la performance en natation :

*Entre facteurs innés et influences des
stratégies d'entraînement*

Par Robin Pla

Thèse de doctorat en vue de l'obtention du grade de docteur en
Sciences du sport

Dirigée par Jean-François Toussaint

Présentée et soutenue publiquement le 27 novembre 2018

Devant un jury composé de :

Yannick Guezennec	(Rapporteur)	Professeur	Centre Hospitalier de Perpignan
Laurent Messonnier	(Rapporteur)	PU	Université Savoie Mont-Blanc
François Cottin	(Examinateur)	PU	Université Paris Sud
Estelle Pujos	(Examinatrice)	Chercheure	INRA, Clermont-Ferrand
Ferran Rodriguez	(Examinateur)	Professeur	INEFC, Université de Barcelone
Jean-François Toussaint	(Directeur)	PU-PH	IRMES, AP-HP, Paris Descartes
Philippe Hellard	(Co-encadrant)	Chercheur	Fédération Française de Natation
Yann Le Meur	(Co-encadrant)	Chercheur	AS Monaco Football Club

It's been a hard day's night

REMERCIEMENTS

L'ensemble de ces travaux de thèse ont été menés au sein du laboratoire de recherche « **Sport, Expertise et Performance** » et de l'**Institut de Recherche bio-Médicale et d'Epidémiologie du Sport**, situés à l'**Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance**, associés à l'**Université Paris Descartes**, de septembre 2014 à novembre 2018. Ces études ont été soutenues par une collaboration étroite avec la **Fédération Française de Natation** et son département « **optimisation de la performance** ». A ce titre, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué au bon déroulement de cette thèse et permis de mener à bien ce projet personnel et professionnel.

D'abord, un immense remerciement à **Jean-François Toussaint**, pour m'avoir conduit du Master vers la thèse, avec le goût de l'analyse de la performance dans tous ses aspects. Cette vision du monde, du sport et de la science m'ont permis de me construire en tant que chercheur. Un immense remerciement également à **Philippe Hellard** de m'avoir proposé de réaliser ce projet, et de m'avoir tant accompagné sur la rédaction de tous ces articles. Cette connaissance de la natation a été une vraie source d'inspiration. Un grand merci à **Christophe Hausswirth** de m'avoir accepté au sein du laboratoire SEP à l'INSEP, où les chercheurs en physiologie étaient déjà très nombreux au début de ma thèse. Un immense merci à **Yann Le Meur**, pour m'avoir fait confiance du début jusqu'à la fin. Chaque échange entre nous était limpide, de la mise en place du protocole jusqu'à la rédaction du manuscrit. Cela a été une grande fierté et un immense honneur de pouvoir être accompagné par vous tous.

Les rapporteurs **Yannick Guezennec** et **Laurent Messonnier** et les examinateurs **Estelle Pujos-Guillot**, **François Cottin** et **Ferran Rodriguez** pour avoir accepté de juger mon travail, c'est un immense honneur de pouvoir compter sur vos conseils et remarques.

A tous mes formateurs récents et anciens, qui m'ont enseigné tout un tas d'aspects essentiels liés à la performance sportive.

La **Fédération Française de Natation** et ses **dirigeants**, pour m'avoir permis d'intégrer cette association en février 2013, et puis de m'avoir toujours soutenu dans mes différents projets professionnels et notamment pour la faisabilité de ce projet de thèse. Je remercie particulièrement **Louis-Frédéric Doyez**, **Lionel Horter**, **Francis Luyce**, **Jacques Favre**, **Julien Issoulié**, **Gilles Sezionale**, **Rémi Duhautois**, **Laurent Ciubini** qui m'ont permis de conduire mes travaux de recherche en toute sérénité.

L’Institut National du Sport, de l’Expertise et de la Performance, pour m’avoir d’abord intégré au sein du Master 2 « Sport, Expertise et Performance de Haut-Niveau », puis de m’avoir accueilli au sein de ses laboratoires SEP et IRMES. Un grand merci aux génies des statistiques, **Adrien Sedeaud, Arthur Leroy** et les autres chercheurs de l’IRMES pour leur grande aide sur les analyses des résultats et leur façon de rendre tout ça compréhensible. Les outils du laboratoire, les échanges avec tous les doctorants, et la proximité avec les athlètes de l’INSEP, m’ont permis de construire une expertise significative en tant que *sport scientist*. Un immense merci à **Jean-François Robin** qui a toujours su me donner de précieux conseils, cette bienveillance m’a permis de donner du sens à mon travail. Merci également à **Ayind Mahamba**, qui a réussi à être un très bon coach pendant le début de ma thèse.

L’Institut National de Recherche en Agronomie (INRA) de Clermont-Ferrand. Un grand merci pour m’avoir ouvert les portes de cet institut de recherche, et de pouvoir explorer le métabolisme humain avec des techniques de très hautes performances. Merci à toute l’équipe : **Stéphanie Durand, Marion Brandolini, Delphine Centeno et Mélanie Petera**.

L’unité statistique du laboratoire de Santé Publique de la Timone. Merci à **Noémie Resseguier** et **Guillaume Gaubert** pour leur grande aide sur l’analyse des résultats et leurs précieux conseils sur le traitement des données.

L’encadrement du pôle INSEP natation, qui m’a permis d’appliquer mes connaissances acquises durant la thèse, au service du bassin. Ces quatre saisons au service des nageurs de haut niveau ont été formidables. Merci particulièrement à **Eric Braize**, qui m’a fait confiance et a toujours su me guider dans mes choix et aux membres de la dream team **Eric Rebourg et Cyril Vieu**. Merci aux autres collègues : **Jean-Lionel Rey, Odile Petit et Magali Rathier**.

Magali Merino, qui m’a permis de m’associer pleinement au projet d’un sportif de très haut niveau. Notre rencontre est arrivée à un moment où nous ne pensions pas travailler ensemble, pour finalement 6 mois plus tard, fêter le titre de champion du monde d’**Axel**.

L’équipe de France eau libre, avec qui j’ai énormément travaillé durant cette dernière année de thèse. Un très grand merci à **Stéphane Lecat**, pour m’avoir permis de participer au projet de performance de la meilleure équipe mondiale de cette discipline. Merci également aux autres membres du staff pour toutes les réflexions partagées autour de l’entraînement : **Fred, Fabienne, Patrick, Steven, Benjamin, Mique, Bertrand, les Fabien, Damien, Jean-Loup** et évidemment **Eric Boissière**, qui a participé à ce début de travail de thèse, je ne peux l’oublier, tant ses compétences étaient nombreuses et sources de réflexions.

Anaël Aubry, qui a été mon plus proche conseiller, notamment durant la dernière année. Ton soutien, tes conseils m'ont donné beaucoup de confiance et de motivation pour devenir un accompagnateur scientifique au service de la performance. Nul doute que nous pourrons continuer à travailler ensemble et partager nos réflexions sur le sport de haut niveau.

Tous les participants aux différentes études. Un grand merci à **Karim Bousalem, Yves Thomassin et Morgan Dufour** pour avoir accepté d'inclure leur groupe de nageurs pendant plus de 20 semaines sur une étude lourde en logistique. Merci également à **Mehdi Rhaïem**, qui avec son dynamisme légendaire, m'a permis d'utiliser des nouvelles technologies, et de pouvoir innover de nouvelles pratiques de recherche.

Le club de l'Union Sportive de Saint-Egrève, lieu où j'ai grandi et me suis construits en tant que sportif mais également en tant que personne. Merci à mes entraîneurs, **Joseph, Patrice, Lionel, Johnny** pour m'avoir donné le goût de l'entraînement. C'est sans doute cette deuxième famille qui m'a mené jusqu'ici.

Ma petite Margounette qui a du beaucoup me supporter durant cette dernière année. Mais les plus belles sont devant nous. Ma deuxième famille est désormais la tienne, merci à tous tes proches qui ont su me dire les bons mots aux bons moments.

Ma famille, à qui je dois absolument tout. **Papa, Maman, Coline**, je vous remercie pour tout ce que vous m'avez appris, pour m'avoir toujours soutenu et pour m'avoir donné goût à toutes les bonnes choses de la vie. C'est grâce à vous si je me sens si bien aujourd'hui, je vous aime.

DIFFUSION DES RESULTATS

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 :

- **PLA R**, LE MEUR Y, AUBRY A, TOUSSAINT JF, HELLARD P. Effects of a 6-week period of polarized or threshold training on performance and fatigue in elite swimmers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. **Publiée.**
- HELLARD P, **PLA R**, RODRIGUEZ FA, SIMBANA D, PYNE DB. Dynamics of the Metabolic Response During a Competitive 100-M Freestyle in Elite Male Swimmers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. **Publiée.**
- AVALOS M, HELLARD P, LEFORT G, **PLA R**, MUJICA I, TOUSSAINT JF, PYNE DB. Training profiles in elite swimming : insight into periodization from a 20-year cohort. *Frontiers*. **Soumise.**
- **PLA R**, AUBRY A, MERINO M, RESSEGUIER N, TOUSSAINT JF, HELLARD P. Training organization, physiologic profile and HRV changes of an open water world champion. *International Journal of Sports Medicine*. **En révision.**
- **PLA R**, PUJOS E, DURAND S, BRANDOLINI M, CENTENO D, TOUSSAINT JF, HELLARD P. Non-targeted metabolomics analyses by mass spectrometry to explore metabolic stress after six training weeks in elite swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. **En cours de rédaction.**
- **PLA R**, LE MEUR Y, AUBRY A, TOUSSAINT JF, HELLARD P. Heart rate variability changes before and after a competition in elite swimmers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. **Soumise.**

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

- **PLA R, LEROY A, MASSAL R, BELLAMI M, KAILLANI F, HELLARD P, TOUSSAINT JF, SEDEAUD A.** Bayesian approach to quantify morphological impact on performance in international elite swimming. *Journal of Science and Medicine in Sport*. Soumise.
- **PLA R, AUBRY A, RHAIE M, TOUSSAINT JF, HELLARD P.** How technology can assess swimming performance ? *PLOS One*. En cours de rédaction

Congrès internationaux avec actes :

- **PLA R.** Does Polarized Training Improve Performance In Competitive Swimmers ? *European Congress of Sport Science*. Essen, Allemagne, Juillet 2017.
- **PLA R, AUBRY A, MERINO M, HELLARD P.** Training organization and physiological profile of a 25 km open water world champion. *XIIIth International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming*. Tsukuba, Japon, Septembre 2018.

Conférences :

- **PLA R.** Régulation de la charge d'entraînement au moyen de tests de variabilité de la fréquence cardiaque. *Stratégies et planification en eau libre et natation course, les mardis de la FFN*, Fédération Française de Natation, Pantin, France, 10 octobre 2017.
- **PLA R, MERINO M.** Individualisation de la charge d'entraînement : l'intérêt de la variabilité de la fréquence cardiaque. *A la recherche de la performance*. INSEP, Paris, France, 13 février 2018.
- **PLA R, HELLARD P.** Périodisation annuelle, pluriannuelle, polarisation de l'entraînement en natation. Mieux comprendre les effets quantitatifs. Articulation d'une méthodologie expérimentale et d'une méthodologie observationnelle. *Journée de valorisation de la recherche*, INSEP, Paris, France, 22 mars 2017.

GLOSSAIRE

ATP : adenosine triphosphate

CE : coût énergétique

La : concentration de lactate sanguin

La_{max} : concentration de lactate sanguin après un effort maximal

FC : fréquence cardiaque

FFN : Fédération Française de Natation

HIT : haute intensité

HVT : haut volume d'entraînement

IMC : Indice de Masse Corporelle

INRA : Institut National de Recherche en Agronomie

INSEP : Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance

IRMES : Institut de Recherche en bio-Epidémiologie du Sport

RPE : Qualité de l'effort perçu

SEP : Sport, Expertise et Performance

SNA : Système Nerveux Autonome

SNC : Système Nerveux Central

VFC : Variabilité de Fréquence Cardiaque

$\dot{V}O_{2max}$: consommation maximale d'oxygène

$\dot{V}O_{2pic}$: pic de consommation d'oxygène après un effort maximal

V4 : Vitesse associée à une lactatémie de $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	3
DIFFUSION DES RESULTATS	6
GLOSSAIRE.....	8
SOMMAIRE.....	9
INTRODUCTION GENERALE	13
CADRE THEORIQUE	16
Introduction	17
1. Caractéristiques des meilleurs nageurs mondiaux	18
1.1 Morphologie des meilleurs nageurs mondiaux	18
1.2 Age des meilleurs nageurs mondiaux.....	22
1.3 Génétique	24
1.4 Paramètres psychologiques et socio-culturels	26
2. Caractéristiques métaboliques et énergétiques des différentes épreuves en natation	27
2.1 Processus énergétiques mobilisés au cours des différentes courses en natation	27
2.2 Coût énergétique, rendement et performance en natation	35
2.3 Facteurs physiologiques sous-maximaux lors de test incrémentaux	42
3. Les différents modèles d'entraînement en natation	46
3.1 Les différents cycles d'entraînement	47
3.2 L'intensité d'entraînement	51
3.3 Le volume d'entraînement	59
3.4 La fréquence d'entraînement	61
3.5 La période d'affûtage.....	62
3.6 Individualisation de l'entraînement	63
4. Les différents modèles d'entraînement dans les autres disciplines.....	64
4.1 Le modèle pyramidal	65
4.2 Le modèle polarisé.....	66
4.3 Le modèle à haut volume	68
4.4 Le modèle au seuil	69
4.5 Apports et limites de l'entraînement polarisé pour la natation.....	70
5. Les réponses à l'entraînement : entre fatigue et adaptations biologiques	72

5.1	Mécanismes généraux de l'adaptation	72
5.2	Adaptation et fatigue du système neuromusculaire	74
5.3	Adaptation et fatigue du système nerveux autonome	76
5.4	Adaptation et réponses hématologiques	80
5.5	Adaptation et défenses immunitaires	81
5.6	Adaptation et régulation hormonale.....	83
6.	Les outils (marqueurs/indices) de l'adaptation du nageur à l'entraînement : quelles solutions pour évaluer l'efficacité de l'entraînement ?	85
6.1	Indices des adaptations physiologiques.	85
6.2	Indices de la régulation autonome	86
6.3	Indices de la fatigue perçue et du sommeil.....	87
6.4	Indices globaux des adaptations biologiques	88
	HYPOTHESES DE TRAVAIL ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	91
	MATERIELS ET OUTILS UTILISES LORS DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX	94
1.	Variables métaboliques	95
1.1	Recueil des échanges gazeux et respiratoires	95
1.2	Mesure de la lactatémie	96
1.3	Mesure de la fréquence cardiaque.....	96
1.4	Mesure de la variabilité de la fréquence cardiaque	97
1.5	Mesures métabolomiques.....	98
2.	Variables cinématiques	99
2.1	Mesure de la vitesse en natation	99
2.2	Mesure du rapport fréquence amplitude en natation	99
3.	Recueil des variables perceptuelles.....	100
3.1	Questionnaires de l'état fatigue et des états de l'humeur.....	100
3.2	Questionnaires de l'état du sommeil	100
3.3	Questionnaire de symptômes respiratoires	101
	PRESENTATION DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX.....	102
	Etude n°1 : La distribution de l'intensité d'entraînement chez les meilleurs nageurs français...103	
	Résumé	103
	Introduction	104
	Méthodes.....	105
	Résultats	105

Discussion	106
Conclusion	107
Etude n°2 : Les réponses métaboliques au cours d'un 100 m nage libre chez des nageurs masculins de haut niveau	108
Résumé	108
Introduction	109
Méthodes.....	110
Résultats	111
Discussion	114
Conclusion	116
Etude n°3 : Distribution de l'intensité à l'entraînement en natation : comparaison d'un modèle au seuil avec un modèle polarisé	118
Résumé	118
Introduction	119
Méthodes.....	120
Résultats	122
Discussion	124
Conclusion	126
Etude n°4 : Exploration des perturbations biologiques chez des nageurs de haut niveau selon le type d'entraînement et l'état de fatigue	127
Résumé	127
Introduction	128
Méthodes.....	129
Résultats	130
Discussion	132
Conclusion	133
Etude n°5 : Etude de cas : influence de la charge d'entraînement sur la régulation du système nerveux autonome chez un nageur champion du monde d'eau libre.....	134
Résumé	134
Introduction	135
Méthodes.....	137
Résultats	139
Discussion	145
Conclusion	149

Etude n°6 : Changements des indices VFC avant et après une période de compétition chez des nageurs internationaux	150
Résumé	150
Introduction	151
Méthodes.....	152
Résultats	154
Discussion	155
Conclusion	157
DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES.....	158
1. Apports épistémiques.....	160
1.1 Quantifier la charge d'entraînement en natation	160
1.2 Le développement de chaque système énergétique : une nécessité ?	161
1.3 Optimiser la distribution de l'intensité à l'entraînement.....	162
1.4 Comprendre les mécanismes de fatigue associés aux différentes intensités d'entraînement.....	164
2 Apports méthodologiques	165
2.1 L'approche métabolomique non ciblée.....	165
2.2 Le suivi quotidien de la variabilité de la fréquence cardiaque	165
2.3 L'apport des statistiques qualitatives.....	166
CONCLUSION GENERALE	167
REFERENCES	170
ANNEXES	204

INTRODUCTION GENERALE

« SWIM AGAIN »

La performance en natation repose sur une multitude de facteurs sur les plans physiologiques, physiques, biomécaniques, psychologiques. Elle se caractérise par la réalisation d'une activité dans un environnement qui engendre de nombreuses contraintes, qui se distinguent de l'activité physique terrestre. Le nageur doit s'y adapter pour atteindre sa performance maximale. Dernièrement, le contexte concurrentiel de la natation internationale montre une forte densité des résultats au plus haut niveau, avec des écarts de plus en plus étroits entre les meilleurs du monde.

Lors des derniers Jeux Olympiques de Rio en 2016, seuls deux nageurs ont réussi à conserver leur titre acquis lors de l'édition précédente à Londres en 2012 : Michael Phelps (200 mètres quatre nages) et Katie Ledecky (800 mètres nage libre). Au cours de cet événement, nous avons pu observer de très faibles écarts entre les vainqueurs et les vice-champions. C'est par exemple le cas du nageur Florent Manaudou, qui a échoué à un centième de la première place de l'épreuve du 50 mètres nage libre. Chez les filles, Mireia Belmonte a remporté le 200 mètres papillon avec trois centièmes d'avance sur sa dauphine.

Ce constat a déjà été présenté dans la littérature scientifique, avec un ralentissement de la progression depuis plusieurs années (Berthelot et al., 2015) seulement contrebalancé par les 2^{ème} et 3^{ème} générations de combinaison (Berthelot et al., 2010) et une densification des performances au plus haut niveau. Il démontre que l'homme atteint ses limites. Dans le but d'améliorer les performances en natation, il est nécessaire de connaître quels sont les moyens susceptibles de dépasser ces limites.

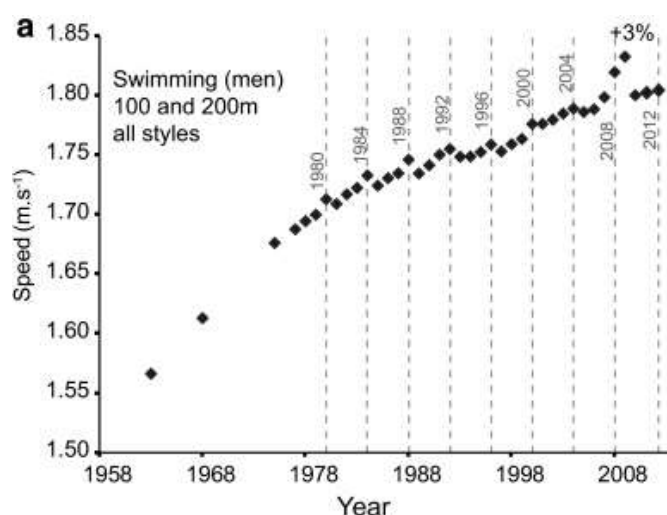


Figure 1. Performances moyennes des 80 meilleurs nageurs mondiaux chez les messieurs pour chaque année depuis 1958 (pour les 100 et 200 mètres en nage libre, de papillon, de dos et de brasse) (D'après Berthelot et al., 2015). Cette figure montre le ralentissement de l'amélioration des performances en natation.

Aujourd'hui, la natation se mondialise et se professionnalise de plus en plus rapidement. L'essor des technologies, la médiatisation, la reconnaissance du statut de nageur professionnel dans certains pays ont permis de développer ce sport et voir apparaître de nouvelles méthodes d'entraînement distinctes, avec pourtant des résultats très similaires. La charge d'entraînement est un des leviers sur lesquels les entraîneurs s'appuient pour maximiser les adaptations physiologiques. Toutefois, le volume de travail atteint ses propres limites et c'est la qualité d'entraînement qui doit s'améliorer.

A ce jour, peu d'études ont mis en évidence les différentes stratégies d'entraînement conduisant à la performance en natation. Ces changements sont permis par des adaptations physiologiques et techniques qui sont dépendantes de la distribution de l'intensité à l'entraînement. Les entraîneurs doivent se doter d'outils pour optimiser cette qualité d'entraînement, sans perte de temps.

Nous émettrons l'hypothèse que les performances en natation se rapprochent de leurs limites. Pour affronter la concurrence internationale, les nageurs ne doivent pas laisser place à la perte de temps lors des entraînements. Pour optimiser les performances, nous supposons qu'il existe des voies possibles d'amélioration sur la qualité d'entraînement, en interaction avec les facteurs innés de la performance

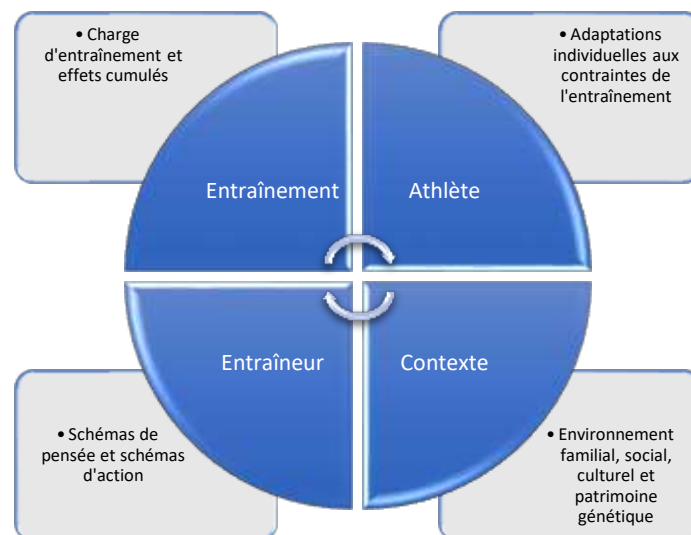


Figure 2 : *Modèle du système de performance du nageur. Le rôle du scientifique tient sa place dans chaque partie de ce schéma. Il interviendra auprès du nageur, pour comprendre son caractère individuel et s'adapter à ses caractéristiques propres.*

CADRE THEORIQUE

**LES DETERMINANTS DE LA PERFORMANCE EN NATATION, INFLUENCE DES
FACTEURS INNÉS ET PHYSIOLOGIQUES**

DESCRIPTION ET COMPREHENSION

L'ensemble des recherches présentées dans cette thèse s'inscrit dans une démarche personnelle et professionnelle. De manière générale, ce travail vise à comprendre les éléments qui conduisent à la production de hautes performances sportives, en collaboration avec les unités de recherche de l'Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance (INSEP). Sur un plan plus spécifique, les résultats de ces travaux devront alimenter les connaissances et compétences du service « optimisation de la performance » de la Fédération Française de Natation (FFN). Son principal but est d'assurer un accompagnement scientifique de haut niveau auprès des nageurs et de leurs entraîneurs, afin de décrocher des médailles aux Jeux Olympiques et sur les principales compétitions internationales.

Cette thèse a pour but de trouver les moyens qui permettront de dépasser les limites de la performance en natation. Dans un contexte de densification des performances, les stratégies d'entraînement doivent être optimales. L'augmentation de la charge d'entraînement observée ces dernières années ne suffit plus, elle impose d'améliorer la qualité d'entraînement. Les outils de suivi de l'entraînement sont à développer. Enfin, la performance doit s'envisager sur une interaction entre l'entraînement et ses facteurs environnementaux.

Dans un premier chapitre introductif, une présentation des caractéristiques des meilleurs nageurs internationaux sera réalisée. Avant d'investiguer les effets induits par l'entraînement, il sera intéressant de voir en quoi des facteurs comme la morphologie ou l'âge ont une incidence sur la performance.

Le deuxième chapitre se concentrera sur l'analyse des facteurs physiologiques, déterminants de la performance en natation. Elle présentera les réponses métaboliques observées au cours des différentes épreuves de natation. Une description des principales variables physiologiques sera réalisée.

Ensuite, une large partie détaillera les adaptations physiologiques liées aux différents modes d'entraînement en natation ainsi que dans les autres disciplines. Il sera important de mettre en relation les rapports d'entraîneurs et les études scientifiques.

Cette partie sera suivie par la description de l'incidence de cette charge d'entraînement sur l'équilibre du système nerveux autonome, le système hormonal et la composition sanguine. Enfin, plusieurs moyens de contrôle de l'entraînement seront présentés dans le dernier chapitre.

1. Caractéristiques des meilleurs nageurs mondiaux

Les principales recherches sur la natation se concentrent principalement sur les aspects physiologiques et biomécaniques du nageur. Ce sont des facteurs déterminants pour la performance de haut niveau qui se concrétisent grâce à un entraînement adéquat, en vue d'adapter l'organisme à la réalisation d'un mouvement idéal dans une contrainte de temps donnée, dont l'objectif ultime reste l'optimisation du rendement (transformation de l'énergie chimique en énergie mécanique). Toutefois, avant de développer ces capacités par l'entraînement, d'autres facteurs entrent en jeu dans la performance. La plupart de ces facteurs sont innés et ne sont que très peu liés avec les conditions de réalisation de l'entraînement. Il est intéressant de voir en quoi ces facteurs innés s'inscrivent dans l'optimisation de la performance et quelles sont leurs relations avec les autres paramètres physiologiques et biomécaniques.

1.1 Morphologie des meilleurs nageurs mondiaux

Plusieurs études ont mis en évidence un lien fort entre le coût énergétique et la morphologie (Capelli et al., 1995 ; Pendergast et al., 1977 ; Zamparo et al., 1996a et 1996b ; Zamparo et al., 2000 ; Zamparo et al., 2008). Hormis les rares études qui présentent les caractéristiques morphologiques des nageurs à titre informatif pour des travaux expérimentaux ou observationnels, peu de recherches se sont focalisées sur le lien entre morphologie et performance. Une étude de Pyne et al. (2006) a quantifié des changements de masse durant une saison de compétition entre la période de reprise et la période d'affûtage, sans établir de lien avec la performance.

A ce jour, malgré les conclusions récentes de Costa et al. (2015), qui indiquent que les recherches sur la natation ne devraient pas seulement se tourner vers le statut énergétique et biomécanique des nageurs, en intégrant d'autres aspects comme la morphologie, la croissance, la génétique. Seules deux études ont intégré la morphologie comme indicateur de performance en natation. Khosla (1984) a été le premier auteur à présenter la taille et le poids des meilleurs nageurs mondiaux. Cet auteur a révélé que les nageuses finalistes Olympiques à Montréal en 1976 étaient plus grandes (+ 3,5 cm) et plus lourdes (+ 2,8 kg) que les non-finalistes. Plus récemment, Charles et Bejan (2009) ont montré que les améliorations du record du monde du 100 mètres nage libre s'expliquaient par une augmentation de la taille et du poids des nageurs. Hormis ces deux études, il n'existe pas de travaux ayant mis en évidence des morphotypes idéaux pour chaque épreuve en natation.

Une résistance à l'avancement spécifique

Historiquement, les recherches se sont tournées vers l'analyse de l'impact de la morphologie sur les résistances hydrodynamiques (Benjanuvatra et al., 2001). Ces résistances sont influencées par la forme, la posture et l'alignement du corps (Naemi et al., 2010). Plusieurs études ont investigué l'impact des caractéristiques morphologiques sur le coefficient de traînée (Chatard 1990, Taïar 2005), les mouvements ondulatoires (Connaboy et al., 2009 ; Arellano et al., 2002), le coût énergétique, l'économie de nage (Chatard et al., 1990 ; Chatard et al., 1991 ; Kjendle et al., 2004 ; Chatard et al., 1990) et la technique de nage (Naemi et al., 2010 ; Lyttle et al., 2000 ; Naemi et Sanders, 2008). Ces études ont confirmé que des différences morphologiques entraînent des différences de qualité de nage

Dans une étude de 2010, Bejan et al. (2010) ont montré que sur les épreuves de sprint, tant en athlétisme qu'en natation, les records du monde étaient battus en fonction des gabarits. Une autre étude (Jagomägi et al., 2005) avait déjà montré que les paramètres anthropométriques pouvaient influencer la performance chez des brasseuses de haut niveau. Ces deux groupes d'auteurs ont resitué la place de la morphologie dans la performance et entrouvert une nouvelle voie sur l'interprétation des performances en natation, où les gabarits peuvent être optimisés. Il sera possible d'observer des morphotypes idéaux en fonction des spécificités de chaque épreuve.

Les différences selon le sexe

Une étude de Dufour et al. (1988) a comparé les différences de vitesse de nage sur un 25 mètres crawl entre la taille de 30 garçons et celle de 20 filles. Il a démontré que la différence de temps final était davantage liée au dimorphisme de genre plutôt qu'à la technique de nage. Selon l'auteur, la différence de performance concerne essentiellement les différences de taille entre les deux sexes, plutôt qu'une qualité de nage différente.

Les différences selon l'âge

De nombreuses études anthropométriques se sont penchées sur les caractéristiques morphologiques des jeunes nageurs (Lätt et al., 2010 ; Lätt et al., 2009 ; Geladas et al., 2005 ; Duché et al., 1993 ; Zuniga et al., 2011 ; Avlonitou, 1994 ; Salazar-Lioggiodice et al., 2006). Ces études ont montré l'influence importante de la croissance sur la performance en natation. Lätt et al. (2010) ont examiné l'influence des paramètres anthropométriques, physiologiques et biomécaniques sur la performance du 100 mètres nage libre chez des adolescents. Les paramètres biomécaniques apparaissaient comme les plus déterminants de la performance. Mais

la morphologie était à un niveau équivalent à la physiologie. Ces résultats ont souligné l'importance de la morphologie en natation, notamment chez les jeunes nageurs.

Paramètre	Garçons	Filles
Taille	-0,61**	-0,31**
Poids	-0,65**	-0,12
% Masse grasse	-0,11	-0,10
Taille de l'avant-bras	-0,64**	-0,23*
Taille de la main	-0,57**	-0,30**
Taille du pied	-0,49**	-0,16
Circonférence de la poitrine	-0,64**	-0,09
Largeur des épaules	-0,61**	-0,16
Largeur des hanches	-0,46**	-0,09
Souplesse de la cheville	-0,09	-0,08
Souplesse de l'épaule	0,08	-0,22*

Tableau 1. Coefficients de corrélation entre les paramètres anthropométriques, les capacités physiques et la performance sur 100 mètres nage libre chez des jeunes nageurs. (D'après Geladas et al., 2005). La taille des segments propulsifs est un facteur de la performance. (Un signe négatif montre une amélioration de la performance). Ces résultats montrent également des différences entre hommes et femmes mais ces résultats n'ont pas été expliqués par les auteurs.

Morphologie et coût énergétique

Le coût énergétique ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}$) (qui sera plus largement discuté dans une partie ultérieure) peut se définir comme le rapport entre la dépense d'énergie totale fournie (kJ) divisée par la distance (m) de déplacement. En natation, de nombreux facteurs viennent influencer ce coût énergétique : les résistances de vague (Pendergast et al., 1977 ; Capelli et al., 1995, Zamparo et al., 1996), la flottabilité (Montpetit et al., 1983 ; Chatard et al., 1985, 1990b), la technique de nage (Holmer, 1972 ; Alves et Gomes-Pereira, 1997).

Toutefois, ces résistances à l'avancement, qui altèrent l'efficacité de nage (Toussaint et Hollander, 1994), sont généralement influencées par la taille des segments morphologiques des nageurs (Zamparo, 1996a et 1996b). Zamparo a ainsi indiqué que les enfants, avec une distance entre le centre de gravité et le centre de flottabilité (poussée verticale de bas en haut exercée sur le corps) inférieure à celle des adultes, en tiraient un moindre bénéfice. Chatard a également montré que la longueur (1985), la masse (1985) et la surface du corps (1990b) affectaient le coût énergétique. Des travaux de Kjendle et al. (2004) sont venus compléter les travaux de Chatard. Les auteurs ont montré que le facteur morphologique ayant le plus d'influence sur le

coût énergétique était la longueur du corps (plus la longueur augmente, plus le coût énergétique est important), alors que la masse et la surface étaient très dépendantes de cette première mensuration. La longueur de corps est d'ailleurs, et logiquement, fortement corrélée avec la taille des bras et des surfaces propulsives. Pour les nageurs de même taille, une plus grande masse augmenterait le coût énergétique. Enfin, il est intéressant de constater que les surfaces propulsives sont généralement très corrélées à la longueur du corps (Kjendle et al., 2004 ; Amirshaybani et al., 2001).

Vers une optimisation morphologique

Malgré le manque d'actualisation des connaissances sur l'impact de la morphologie sur la performance des meilleurs nageurs mondiaux, quelques études soulignent l'influence de la morphologie sur la performance sportive. En athlétisme, du 100 mètres au marathon, il a été mis en évidence que la performance est organisée autour de gradients morphologiques (les athlètes les plus performants sont les plus grands) (voir Figure 3B) (Sedeaud et al., 2014 ; Sedeaud, 2013).

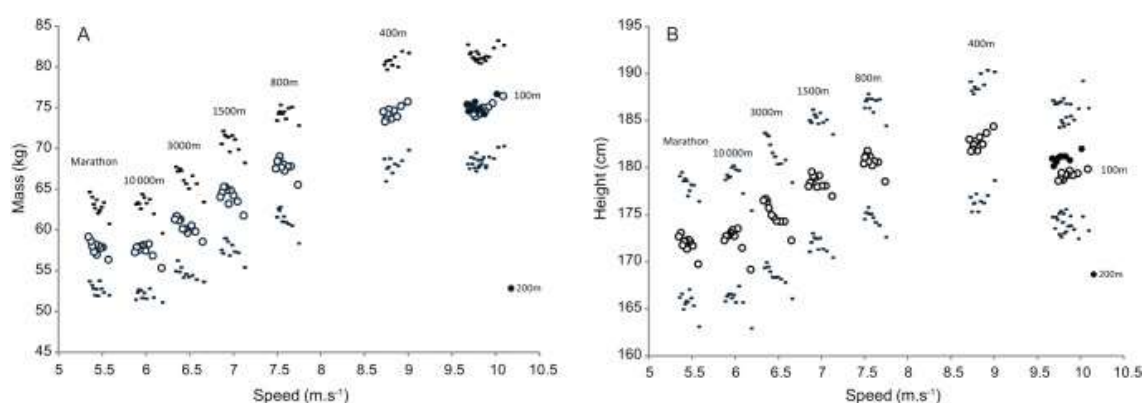


Figure 3. Moyenne de la masse (A) et de la taille (B) $\pm$ écart type des athlètes de chaque décile de vitesse pour huit épreuves en athlétisme (100, 200, 400, 800, 1500, 3000 et 10 000 mètres, marathon). Les cercles noirs montrent les athlètes du 200 mètres rangés par décile. Cette figure montre que l'augmentation de la vitesse sur les épreuves d'athlétisme induit des tailles et des masses plus grandes chez les meilleurs athlètes mondiaux. (D'après Sedeaud, 2013)

Adrien Sedeaud a montré les liens entre marges de progression et gradients morphologiques (taille, IMC, etc...) chez les athlètes de haut niveau (Sedeaud et al., 2014 ; Sedeaud, 2013). L'IMC, apparaît comme un indicateur principal de production énergétique et semble être le facteur le plus important pour les épreuves d'athlétisme (Sedeaud et al., 2014). Pour chaque distance, des optimisations morphologiques ont ainsi été décrites. Plus le niveau de performance

augmente, plus la variabilité diminue, avec un intervalle optimal d'IMC très restreint pour les meilleurs athlètes mondiaux.

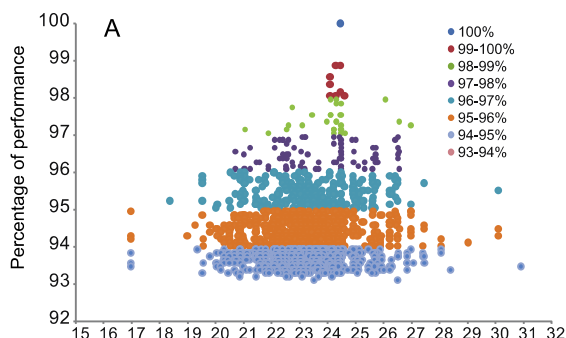


Figure 4. IMC des athlètes selon leur pourcentage de performance sur le 100 mètres (D'après Sedeaud et al., 2014). Cette figure montre que l'intervalle optimal d'IMC se réduit avec l'amélioration de la performance.

Ce qu'il faut retenir :

A ce jour, la morphologie n'a pas été intégrée comme facteur de performance en natation malgré la tendance de certains gabarits à dominer des types d'épreuves. Aucune étude scientifique n'a permis de décrire les caractéristiques morphologiques des nageurs de haut niveau depuis les Jeux Olympiques de 1976. Dans un environnement où les courses se jouent au moindre détail, il semble primordial de connaître les organisations morphologiques des meilleurs nageurs internationaux. Un travail complémentaire permettrait d'investiguer les gradients morphologiques optimaux chez les meilleurs nageurs mondiaux. En fonction des distances, il serait intéressant de décrire les morphotypes idéaux pour chaque sexe.

1.2 Age des meilleurs nageurs mondiaux

La carrière d'un nageur se construit au fil des années, avec un développement de ses capacités physiques, physiologiques et biomécaniques (Lätt et al., 2009). Les variations de performance durant les différentes étapes de la carrière d'un nageur sont principalement dues à l'interaction entre capacités développées par l'entraînement et les facteurs génétiques et environnementaux (Barbosa et al., 2013). Dans une perspective où le développement de potentiels talents est essentiel pour favoriser l'émergence de possibles médaillés internationaux, l'identification des futurs nageurs de haut niveau est importante. Dans cette voie, la construction de programme de développement de l'athlète est essentielle.

Récemment, plusieurs études ont investigué l'âge des meilleurs nageurs internationaux (Allen et al., 2014 ; Buhl et al., 2013 ; Kollarz et al., 2013 ; Wolfrum et al., 2013 ; Knechtle et al., 2016 ; König et al., 2014). Ces différentes études montrent que les femmes atteignent leurs meilleures performances environ 2 ans avant les hommes en moyenne (22 et 24 ans respectivement). Elles montrent également que les sprinters atteignent leurs meilleures performances environ 2 ans en moyenne après les nageurs de demi-fond.

Sexe	Nage	Distance	1992	1996	2000	2004	2008	2012
Femmes	Nage libre	50 m	21,3 ± 2,5	23,6 ± 3,6	26,1 ± 3,6	24,3 ± 4,9	25,5 ± 7,2	26,8 ± 5,1
		100 m	20,1 ± 3,5	22,7 ± 3,7	25,7 ± 4,0	23,6 ± 4,0	24,1 ± 3,4	22,8 ± 3,5
		200 m	18,8 ± 3,8	21,3 ± 3,8	23,6 ± 4,6	20,8 ± 3,9	21,0 ± 2,7	22,3 ± 2,8
		400 m	20,6 ± 2,3	21,8 ± 5,0	21,0 ± 4,4	21,0 ± 1,3	21,0 ± 2,4	23,0 ± 2,7
		800 m	20,0 ± 1,8	23,8 ± 3,9	19,3 ± 3,2	22,0 ± 4,0	19,5 ± 3,5	21,7 ± 3,4
		1500 m	-	-	-	-	-	-
	Brasse	100 m	20,0 ± 3,9	21,2 ± 4,2	21,5 ± 5,8	22,8 ± 4,7	21,6 ± 3,3	21,8 ± 3,7
		200 m	20,2 ± 4,5	19,6 ± 3,7	18,0 ± 2,7	22,1 ± 3,0	21,7 ± 2,9	23,1 ± 2,2
	Dos	100 m	18,0 ± 2,3	20,0 ± 4,2	21,8 ± 4,5	22,5 ± 3,2	23,2 ± 2,8	21,5 ± 3,9
		200 m	20,0 ± 2,4	22,5 ± 3,5	21,2 ± 3,0	21,1 ± 2,4	20,6 ± 4,1	21,7 ± 3,6
	Papillon	100 m	20,3 ± 3,2	20,5 ± 5,0	25,6 ± 4,7	24,2 ± 5,0	21,3 ± 2,4	22,8 ± 2,2
		200 m	21,0 ± 4,4	20,2 ± 3,4	21,2 ± 4,5	23,7 ± 4,7	21,7 ± 3,8	22,0 ± 0,7
	4 nages	200 m	20,0 ± 1,8	22,7 ± 2,7	23,0 ± 3,1	21,0 ± 4,4	21,7 ± 2,4	23,0 ± 3,7
		400 m	19,2 ± 1,4	21,0 ± 3,4	20,2 ± 3,2	20,1 ± 2,7	19,2 ± 3,3	20,8 ± 2,7
Hommes	Nage libre	50 m	24,8 ± 2,7	22,1 ± 1,9	25,0 ± 3,6	26,9 ± 3,6	25,0 ± 2,8	27,1 ± 3,6
		100 m	24,1 ± 2,7	22,5 ± 2,8	25,3 ± 2,4	24,4 ± 2,8	25,9 ± 4,0	23,8 ± 2,7
		200 m	21,5 ± 3,3	22,0 ± 3,3	22,6 ± 3,2	23,1 ± 2,5	22,2 ± 2,1	23,0 ± 2,8
		400 m	22,1 ± 3,9	21,5 ± 3,8	19,8 ± 4,8	22,1 ± 2,4	22,9 ± 2,8	23,6 ± 4,3
		800 m	22,1 ± 3,0	21,2 ± 2,4	21,5 ± 2,6	22,7 ± 3,2	22,5 ± 3,3	23,1 ± 3,1
		1500 m	22,1 ± 2,9	21,3 ± 2,5	21,5 ± 2,7	22,8 ± 3,1	22,5 ± 3,2	23,2 ± 3,0
	Brasse	100 m	22,5 ± 3,5	23,8 ± 2,4	20,6 ± 2,0	23,1 ± 1,4	26,2 ± 1,7	26,3 ± 3,3
		200 m	22,3 ± 2,4	24,6 ± 3,0	23,0 ± 2,5	20,5 ± 2,6	23,6 ± 2,8	25,0 ± 2,9
	Dos	100 m	23,2 ± 2,6	24,3 ± 2,2	22,8 ± 1,8	22,6 ± 3,9	23,5 ± 1,2	25,7 ± 2,7
		200 m	21,6 ± 1,0	23,7 ± 2,0	23,5 ± 4,7	22,7 ± 2,0	24,7 ± 3,3	22,1 ± 3,1
	Papillon	100 m	24,0 ± 2,6	22,8 ± 2,6	21,0 ± 5,1	24,7 ± 3,9	24,1 ± 2,2	25,1 ± 2,9
		200 m	21,2 ± 3,2	21,6 ± 1,8	23,1 ± 4,1	22,7 ± 4,4	23,6 ± 1,7	24,1 ± 3,4
	4 nages	200 m	21,6 ± 3,2	22,7 ± 1,0	25,8 ± 2,0	20,6 ± 2,0	23,5 ± 1,1	25,5 ± 3,7
		400 m	23,3 ± 1,1	24,3 ± 2,4	21,2 ± 3,0	20,8 ± 1,9	23,4 ± 2,3	22,2 ± 4,4

Tableau 2. Age des finalistes aux Jeux Olympiques de 1992 à 2012 (inspiré de König et al., 2014). Ce tableau montre une augmentation progressive de l'âge des finalistes aux Jeux Olympiques depuis 1992. Cette augmentation semble traduire une nécessité de temps de maturation plus important qu'auparavant. Ce tableau montre également que les sprinters sont plus âgés que les nageurs de demi-fond. Il montre aussi que les femmes sont en moyenne âgées de deux ans de moins que les hommes.

Ce qu'il faut retenir :

L'atteinte de la meilleure performance en natation se caractérise par une différence de 2 ans entre les hommes et les femmes, ces dernières sont plus précoces. Aussi, les sprinters sont en moyenne 2 ans plus âgés que les nageurs de demi-fond. Enfin, la tendance au niveau international montre que l'âge du pic de performance individuel augmente doucement depuis quelques années. Notre travail devra intégrer ces différences en fonction du sexe et de la spécialité pour optimiser le développement des capacités acquises par l'entraînement.

1.3 Génétique

Les travaux d'Antero-Jacquemin (2013) ont présenté un lien fort entre liens familiaux et performance des athlètes. De la première à la quatrième génération, la part des cyclistes du Tour de France partageant des liens de parenté avec un autre coureur ayant pris part à cette épreuve passe de 3,5 % à 1,8 %, puis à 5,6 % et à 9,0 %. Ces résultats ont également été observés pour l'équipe de France de rugby et pour les médaillés Olympiques. D'ailleurs, la probabilité d'être médaillé en fonction du taux de partage génétique est encore renforcée lorsque le pourcentage génétique commun est élevé. Ces résultats montrent qu'avoir un lien de parenté avec un sportif de haut niveau est associé à des performances supérieures, résultant d'une génétique et d'un environnement culturel favorables.

Durant les quinze dernières années, quelques études ont investigué l'influence du patrimoine génétique sur la performance en natation. Une étude de Costa et al. (2009) a mis en évidence que l'allèle D du gène ACE était plus fréquente chez les nageurs de courte distance plutôt que le groupe contrôle. Ces résultats avaient déjà été observés par Woods et al. (2001).

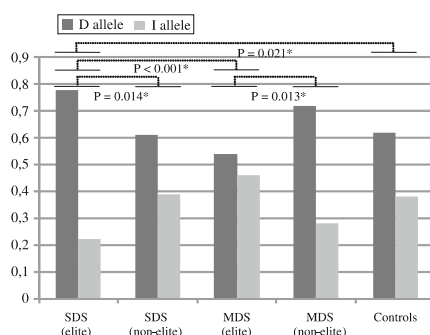


Figure 5. Fréquence des allèles D ou I chez les nageurs de courte distance (SDS) de haut niveau ou non, de moyenne distance (MDS) de haut niveau ou non, et un groupe contrôle. (D'après Costa et al., 2009). L'allèle D est plus fréquente chez les sprinters.

Ben Zaken et al. (2017) ont évoqué une prévalence du génotype CC et de l'allèle C du gène IL-6 pour des nageurs de longue distance, en comparaison avec des athlètes de longue distance, des nageurs sprinters, et la population générale. Cet allèle est pourtant associé à une prévalence de dommages musculaires après l'exercice. Ces résultats pourraient indiquer que pour les nageurs de longue distance, la présence de cet allèle serait associée à des mécanismes protecteurs. Dans une autre étude, la même équipe (Ben Zaken et al., 2017b) a montré que la présence des gènes IGF 1245Y et MSTN 153R était plus importante chez les nageurs de longue distance que les sprinters. Sur des travaux antérieurs, cette équipe (Ben Zaken et al., 2015) n'avait pas trouvé de différences significatives sur la présence du gène ACTN3 R577X entre les nageurs de longue distance et de courte distance.

Dans une étude de Mounier et al. (2006), l'expression du gène HIF1-alpha n'a pas été prédictrice d'une sécrétion d'EPO plus importante chez des nageurs de haut niveau. Dans une étude de 2014, contrairement à ce qui avait déjà été observé dans d'autres sports d'endurance, la présence des récepteurs IGF-I et IGF-IR n'était pas plus fréquente chez les meilleurs nageurs israéliens que dans la population générale (Ben Zaken et al., 2014). Ces résultats mettent en avant que le patrimoine génétique peut influencer la performance en natation, mais que son rôle reste difficilement interprétable et doit être analysé avec précaution.

L'importance du talent inné *versus* l'entraînement ou la motivation dans le sport de performance a été débattue depuis des décennies (Howe et al., 1998). Si quelques-uns ont pu soutenir que l'effort produit au cours de milliers d'heures de pratique suffisait à produire des élites, les études multi-générationnelles montrent que des qualités innées apportent un avantage certain. Les sportifs présentant un profil génétique favorable et interagissant dans un environnement favorable ont une plus grande probabilité d'atteindre le très haut-niveau mais le nombre de conditions nécessaires est immense et réduit la prédictibilité. Notre difficulté à comprendre cette complexité fait de la génétique de la performance un paramètre difficilement utilisable (Roth, 2012).

1.4 Paramètres psychologiques et socio-culturels

La motivation est une autre des variables importantes qui différencie les jeunes athlètes. L'état de préparation au sport de haute performance est aussi une question de temps, il demande des années d'adaptation à des intensités et des volumes d'entraînements très élevés et très stressants.

Il semble qu'un bon système sportif et éducatif, donnant des opportunités pour tous et l'autonomie nécessaire pour choisir son propre chemin au bon moment, reste le meilleur moyen d'identification de talents (Gonçalves et al., 2011).

Ce qu'il faut retenir :

Le patrimoine génétique offre un environnement plus ou moins favorable à la haute performance sportive. Avoir un lien de parenté avec un sportif de haut niveau augmente les chances de victoires. La découverte de certains gènes renforce ces suppositions.

2. Caractéristiques métaboliques et énergétiques des différentes épreuves en natation

La performance en natation peut être décrite comme le résultat de la transformation d'une puissance métabolique en une puissance mécanique avec une efficacité énergétique donnée (Toussaint et Hollander, 1994). A l'instar de toutes les formes d'exercice, des processus chimiques viennent transformer l'énergie stockée dans le muscle et apportée par le sang en une énergie mécanique engendrée par l'action des muscles (Rodriguez et Mader, 2010).

2.1 Processus énergétiques mobilisés au cours des différentes courses en natation

Les compétitions nationales et internationales de natation incluent des courses du 50 au 1500 mètres (d'une durée de 21 secondes à ~15 minutes). La puissance métabolique demandée et la contribution relative des différents systèmes énergétiques varient selon les distances et durées de courses. De nombreuses recherches se sont focalisées sur le calcul ou l'estimation de ces contributions relatives et ont rapporté des résultats contrastés (Capelli et al., 1998 ; Houston, 1978 ; Maglischo, 2003 ; Rodriguez et Mader, 2003 ; Troup, 1984).

Les travaux de Rodriguez et Mader (2003), à partir d'une simulation informatique du métabolisme énergétique (Tableau 3) rapportent des résultats proches de ceux de Capelli et de son équipe en 1998 basés sur la mesure en continue des échanges gazeux (Capelli, 1998).

Distance (mètres)	Temps (min:s)	Créatine phosphate (%)	Glycolyse anaérobie (%)	Oxydations aérobies (%)
50	0:22,0	38	58	4
100	0:48,0	20	39	41
200	1:45,0	13	29	58
400	3:45,0	6	21	73
800	7:50,0	4	14	82
1500	14:50,0	3	11	86

Tableau 3. Contribution des trois systèmes métaboliques à la dépense d'énergie totale pour les épreuves de nage libre chez des nageurs de haut niveau. (Rodriguez et Mader., 2003, 2010). Ce tableau montre notamment le caractère mixte des épreuves du 100 au 400 mètres où les contributions aérobie et anaérobie sont importantes.

Les résultats obtenus au cours de ces études mettent en évidence le caractère mixte des contributions énergétiques des épreuves de natation et plus particulièrement des courses du 100 au 400 mètres (75% des épreuves olympiques). Pour les courses de 50 mètres, les voies

anaérobies sont prépondérantes. A l'inverse, les épreuves de 200, 400, 800 et de 1500 mètres utilisent une énergie majoritairement produite par les oxydations aérobies.

Quelle que soit la fonction biologique associée, l'énergie provient de trois composants chimiques : les hydrates de carbone, les lipides et les protéines. Ils sont stockés, puis transformés en un autre composant chimique, l'adénosine triphosphate (ATP). C'est le seul carburant qui est utilisé directement pour la production de force musculaire et pour la fonction cellulaire. Au niveau musculaire, l'enzyme ATPase permet la création d'énergie par l'hydrolyse de l'ATP, ce qui induit la génération de force par les myofibrilles. Il existe trois grands mécanismes à l'origine de la dégradation et la synthèse d'ATP (Di Prampero, 1981 ; Maughan et al., 1997).

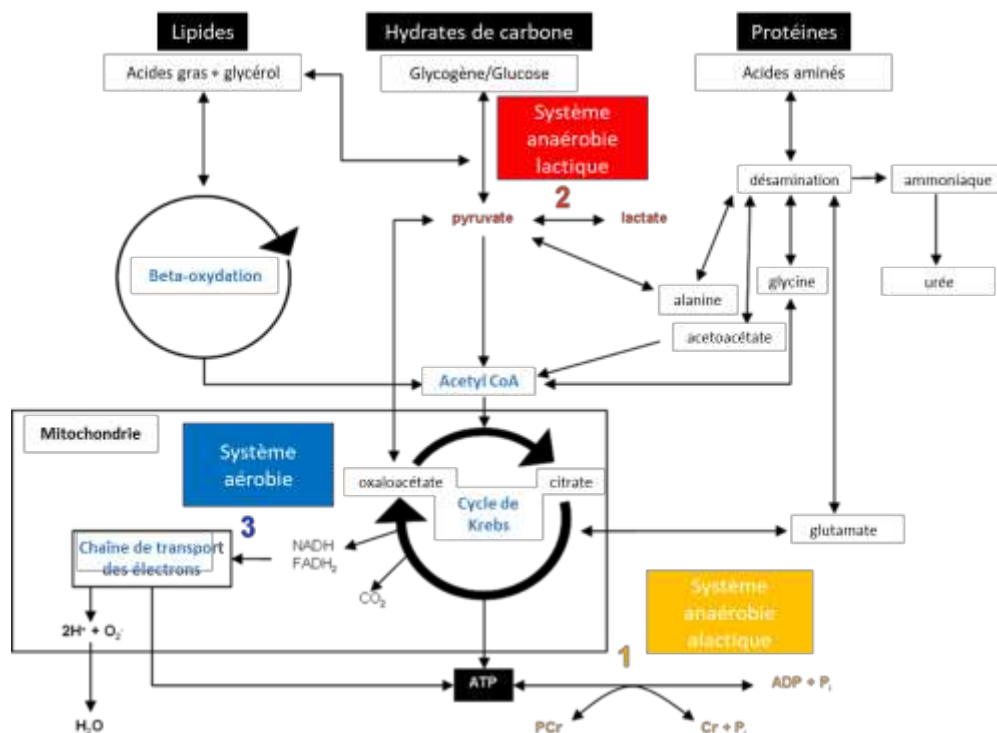


Figure 6. Vue générale des principales voies métaboliques de production de l'énergie avec l'activité des trois grands systèmes énergétiques : (1) anaérobie alactique, (2) anaérobie lactique, (3) aérobie. Le but de ces trois systèmes est de synthétiser continuellement de l'ATP pour éviter une chute brutale de concentration d'ATP au niveau musculaire. (D'après Rodriguez et Mader, 2010).

Le système anaérobie alactique

Ce système utilise la dégradation de phosphocréatine en créatine, en ions phosphate et en énergie (le phosphate inorganique pouvant se réassocier à l'ADP pour synthétiser de l'ATP). Ce mécanisme est également appelé système phosphagène, ou système anaérobie alactique car ni l'oxygène ni les lactates ne sont impliqués dans la production d'énergie. C'est le seul système énergétique qui ne dure que quelques secondes, avec seulement 3 à 5 secondes pour une intensité maximale. En natation, il n'existe pas d'épreuves suffisamment courtes pour solliciter majoritairement ce processus énergétique. Toutefois, il reste très important dans les épreuves de sprint, où les qualités d'explosivité sont primordiales (départ plongé, coulées). Après qu'environ deux tiers des stocks de phosphagène soient déplétés, la glycolyse deviendra prédominante (Maughan et al., 1997).

Le système anaérobie lactique

Le glucose 6-phosphate, qui provient des stocks de glycogène musculaire ou du glucose sanguin, est converti en lactate par la glycolyse. Cette dernière produit de l'ATP par des réactions de phosphorylation. Ce système se nomme aussi système glycolytique ou système anaérobie lactique car il engendre la production d'ions lactate. Après quelques secondes, la filière anaérobie alactique baisse fortement en activité, tandis que la filière aérobie ne peut pas rivaliser en termes de puissance métabolique, la glycolyse est alors prédominante. En natation, ce système est principalement efficace dans les épreuves de 100 à 400 mètres, où la glycolyse est très importante pour la production d'énergie.

Le système aérobie

La voie aérobie trouve sa source dans l'oxydation des glucides et des lipides (et des protéides en quantité très limitée). La glycolyse permet la dégradation du glucose en acide pyruvique, alors que les lipides sont dégradés en acides gras par la beta-oxydation. Les acides gras et l'acide pyruvique sont convertis en acétyl-CoA au niveau mitochondrial. Ce mécanisme est aussi appelé système oxydatif ou aérobie puisqu'il requiert du dioxygène pour produire de l'énergie. Sa puissance maximale peut être soutenue entre 5 et 7 minutes. Ensuite, le maintien de son activité dépend du taux de renouvellement des substrats énergétiques.

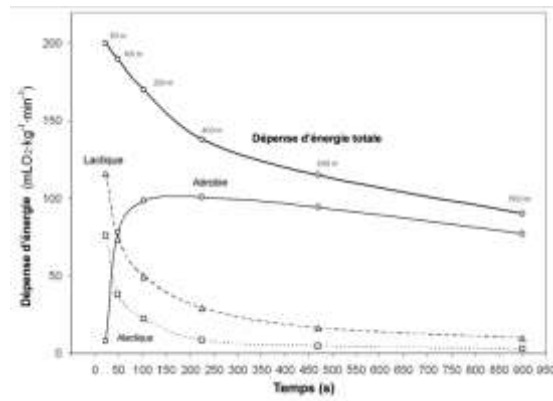


Figure 7. Dépense d'énergie totale et contribution relative des trois systèmes énergétiques durant un exercice maximal en natation en fonction du temps. Les données correspondent à des valeurs absolues exprimées en équivalent $\text{mL O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ du 50 au 1500 mètres en natation à des vitesses de compétition pour des hommes, obtenues par une simulation informatique. (D'après Rodriguez et Mader, 2010).

La mesure de la consommation d'oxygène

Sur le plan méthodologique, il existe au moins deux façons de mesurer la consommation d'oxygène au cours d'une épreuve de natation. Certains chercheurs (Rodriguez et Mader., 2003 ; Rodriguez et al., 2008 ; Sousa et al., 2011) ont évalué à plusieurs reprises la dynamique d'ajustement de la consommation en oxygène au cours des épreuves de 100 à 200 mètres en utilisant un tuba frontal installé sur la bouche du nageur.



Photo 1. Système portable Aquatrainer pour la mesure en direct de la consommation d'oxygène en natation (Cosmed).

L'avantage de cette méthode est de pouvoir observer la consommation en oxygène tout au long de l'épreuve, sans perte de données. Toutefois, elle présente le gros désavantage de ne pas pouvoir permettre au nageur de réaliser le départ plongé, les virages et les coulées, mais aussi de ne pas pouvoir réaliser la même technique de nage que celle réalisée à vitesse maximale (avec notamment une respiration totalement différente). En résumé, les conditions expérimentales ne permettent pas de reproduire des conditions de courses optimales.

Une autre méthode – dite par rétro-extrapolation - est donc aussi utilisée afin de laisser le nageur libre de ses mouvements, lui permettant de réaliser les parties techniques dites « non nagées » (départ, virages, coulées) et lui autorisant une stratégie similaire à celle d'une course de compétition (Seifert et al., 2007). En 2011, Jalab et al. se sont inspirés d'un protocole initié par Laffite et al. (2004), pour observer la réponse aérobie sur un 100 mètres nage libre chez des nageurs de niveau moyen (performance sur 100 mètres chronométrée à 62 secondes en moyenne). Le protocole consistait à nager un 100 mètres à allure maximale, puis de relever les échanges gazeux dès l'arrivée du nageur. Ensuite, des fractions de 25, 50 et 75 mètres étaient nagées à l'allure initialement enregistrée lors du 100 mètres. La mesure de la consommation d'oxygène a donc été mesurée après 25 mètres, 50 mètres, 75 mètres et 100 mètres, avec un repos suffisant entre chaque fraction. Une estimation de la dynamique de consommation d'oxygène au cours du 100 mètres a donc été rendue possible.

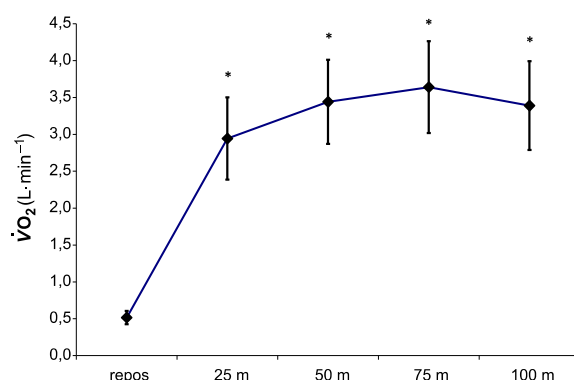


Figure 8. Cinétique de consommation d'oxygène au cours du 100 mètres nage libre, reconstruite à partir des $\dot{V}O_2$ mesurées à la fin des épreuves de 25, 50, 75 et 100 mètres nage libre, respectant les mêmes temps intermédiaires. *, valeur significativement différente de la valeur précédente ($p < 0,05$). Cette figure montre une montée très rapide de la $\dot{V}O_2$ dès le 25 mètres, avec l'atteinte d'un pic au 75 mètres (D'après Jalab et al., 2011).

Dans cette étude, la consommation d'oxygène augmente très rapidement en début de course pour atteindre 80 % de la consommation d'oxygène maximale au 25 m, 94 % au 50 m, 100 % au 75 m puis diminuait à 93 % au 100 m. Ces résultats sont conformes à ceux qui ont été obtenus à l'occasion de l'évaluation d'une dizaine de nageurs de l'équipe de France de natation course, pour des courses de 100 m nagées en spécialité (papillon, dos, brasse, crawl) et dans des conditions de compétition. La $\dot{V}O_2$ s'ajuste ensuite rapidement en début d'exercice pour soit se stabiliser, à partir des 50 mètres, soit diminuer selon le profil des nageurs (Jalab et al., 2011).

Il semblerait que les sprinters atteignent un $\dot{V}O_{2pic}$ entre le 25 et le 50 mètres, avant de voir leur $\dot{V}O_{2pic}$ diminuer jusqu'à la fin de la course, alors que les nageurs plus endurants arrivent à maintenir une consommation d'oxygène plus importante (Jalab et al., 2011).

Ces observations montrent que les nageurs ne sont pas en mesure de maintenir leur consommation d'oxygène jusqu'à la fin de la course. D'un autre côté, ils mettent en avant l'importance d'une puissance aérobie élevée, permise par une activation très rapide des mécanismes aérobie pour les épreuves de 100 mètres. Ces résultats confirment ceux de Rodriguez et Mader (2003) qui avaient rapporté des corrélations positives entre la valeur de $\dot{V}O_{2pic}$ et les performances sur les épreuves de 100 mètres ($r=0,79$) et de 400 mètres ($r=0,75$).

Toutefois, il est important de remarquer que les travaux de Jalab (2011) ont été effectués sur des nageurs de niveau très hétérogène, avec une performance moyenne de 62 secondes sur 100 mètres nage libre, dans un bassin de 25 mètres. Il sera intéressant d'évaluer cette cinétique des paramètres métaboliques sur des nageurs de haut niveau dans un bassin de 50 mètres.

La demande relative d'énergie (exprimée en pourcentage de la $\dot{V}O_{2max}$) requise pour les différentes épreuves a été estimée pour les épreuves de 50, 100, 200, 400 et 1500 mètres à 170, 140, 120, 110, et 104% respectivement (Troup et al., 1991). Par conséquent au cours de ces épreuves, comme lors de tout effort, les besoins d'énergie supplémentaires à ceux assurés par les processus oxydatifs aérobie, sont couverts par la mobilisation de phosphocréatine et l'activation de la glycolyse anaérobie (Ogita, 2006 ; Rodriguez et Mader, 2010).

A l'instar du protocole de Jalab et al. (2011) pour la mesure de la consommation d'oxygène, il est possible d'estimer l'activité anaérobie lactique en réalisant des fractions d'épreuves. Malheureusement, dans leur étude, Jalab et al. n'ont indiqué que des valeurs maximales de lactatémie, sans reporter les valeurs intermédiaires. Figueiredo et al. (2011) ont rapporté des valeurs de $3,4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ au 50 m, $4,2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ au 100 m, $4,9 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ au 150 m et $11,1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ au cours d'un 200 mètres. Ces résultats sont à prendre avec précaution, puisque l'épreuve était nagée avec un tuba, ne reproduisant pas une situation de course classique. Ils montrent une augmentation de la contribution anaérobie lactique sur la fin de course (probablement liée à l'augmentation de la vitesse, cf tableau 4), en accord avec d'autres études (Laffite et al. 2004 ; Coelho 2016) pour les épreuves de 400 et 100 mètres.

Paramètres	1 ^{er} 25 m	2 ^{ème} 25 m	3 ^{ème} 25 m	4 ^{ème} 25 m
V ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$2,15 \pm 0,05$	$1,97 \pm 0,04$	$1,81 \pm 0,03$	$1,90 \pm 0,03$
FR ($\text{c}\cdot\text{min}^{-1}$)	$0,61 \pm 0,04$	$0,60 \pm 0,03$	$0,63 \pm 0,03$	$0,68 \pm 0,04$
AMP ($\text{m}\cdot\text{c}^{-1}$)	$3,47 \pm 0,18$	$3,08 \pm 0,13$	$2,85 \pm 0,14$	$2,68 \pm 0,13$
IDN [$\text{m}^2 \cdot (\text{c}\cdot\text{s}^{-1})$]	$7,33 \pm 0,34$	$5,69 \pm 0,26$	$5,10 \pm 0,20$	$4,83 \pm 0,29$
[La] ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	$4,61 \pm 1,41^{**}$	$7,60 \pm 1,43^{**}$	$9,37 \pm 2,15^*$	$15,01 \pm 1,42^{**}$
BLIS [$(\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$]	$0,29 \pm 0,12$	$0,22 \pm 0,11$	$0,13 \pm 0,07^*$	$0,41 \pm 0,11^{**}$

Tableau 4. Moyenne $\pm$ SD des valeurs des paramètres métaboliques et techniques durant une épreuve maximale de 100 mètres crawl avec la méthode de simulation fractionnée par portions de distance (25, 50, 75 et 100 mètres). V représente la vitesse, FR la fréquence, AMP l'amplitude, IDN l'indice de nage, La lactatémie, BLIS la vitesse d'accumulation du lactate sanguin. (D'après Coelho, 2016). * : $p < 0,05$ et ** : $p < 0,01$.

Ce tableau montre que l'activité glycolytique a augmenté durant le premier 25 mètres, avant de baisser durant les deux 25 mètres suivants, puis de réaugmenter fortement lors du dernier 25 mètres. Cette accumulation de lactates peut être utilisée pour évaluer la contribution du système anaérobie lactique. Toutefois, il est important de préciser qu'il s'agit de lactate sanguin et non du lactate musculaire, ce qui masque en partie l'activité glycolytique des premières portions d'effort. Ces simples mesures de lactatémie ne sont pas suffisantes pour déterminer l'activité glycolytique avec précision (Maciejewski et al., 2012). Les résultats montrent aussi une baisse continue de l'indice de nage pendant le 100 mètres. Une approche basée sur la combinaison des facteurs physiologiques et biomécaniques sera nécessaire à l'entraînement, afin de monitorer la performance des nageurs.

	Vitesse ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Aérobie (kJ)	Anaérobie lactique (kJ)	Anaérobie alactique (kJ)	Energie totale (kJ)
1 ^{er} 50	1,56	38,22	12,05	35,01	85,28
2 ^{ème} 50	1,40	57,00	3,84	17,01	77,84
3 ^{ème} 50	1,36	59,92	3,40	8,79	72,10
4 ^{ème} 50	1,38	56,53	24,24	4,44	85,21
Somme		211,68	43,52	65,24	320,44
200 mètres	1,42	210,61	43,42	65,24	319,27

Tableau 5. Moyenne de la contribution de chaque système énergétique et de la dépense d'énergie totale pour les quatre fractions d'un 200 mètres nage libre (d'après Figueiredo et al., 2011)

Calcul de la dépense énergétique en natation

Afin de réaliser une performance, le nageur doit produire une puissance métabolique maximale sur une durée la plus courte possible sur une distance donnée. Cette dépense est le résultat du produit entre le temps parcouru et le coût énergétique dépensé. Plusieurs auteurs ont évalué la dépense énergétique en natation (Capelli, 1998 ; di Prampero, 1986 ; Toussaint et Hollander, 1994), après s'être inspiré de l'équation proposée par Wilkie (1980). Capelli (1998) a précisé

que la dépense totale d'énergie pour des vitesses maximales en natation pouvait se calculer par la somme de l'activité aérobie et anaérobie, sous la forme de l'équation suivante :

$$E = E_{an} + E_{ae}$$

Où E_{an} représente la somme totale d'énergie dépensée par la voie anaérobie et E_{ae} représente la somme totale dépensée par la voie aérobie.

$$E_{ae} = \alpha \dot{V}O_{2max} t_p + \alpha \dot{V}O_{2max} \tau (1 - e^{-t_p/\tau})$$

L'énergie provenant du système aérobie peut être calculée à partir des mesures de $\dot{V}O_2$, où α est l'équivalent de l'énergie délivrée par l'oxygène, qui est supposée être égale à $20,9 \text{ kJ} \cdot \text{L}^{-1}$, τ est la constante de temps pour atteindre $\dot{V}O_{2max}$ depuis le début de l'exercice et a été mesurée par résonance magnétique nucléaire à 24 secondes (Binzoni et al., 1992), t_p correspond à la durée de l'exercice (la performance en temps) et $\dot{V}O_{2max}$ mesurée en litres par minute pendant ou juste après l'effort (en soustrayant la valeur assumée de $\dot{V}O_2$ de repos).

La contribution anaérobie correspond à la somme des énergies fournies par les systèmes lactique et alactique du processus anaérobie.

$$E_{An} = An_{la} + An_{al}$$

Où An_{la} représente la somme totale d'énergie dépensée par la voie anaérobie lactique et An_{al} représente la somme totale dépensée par la voie anaérobie alactique.

$$An_{la} = \beta [La]_b M$$

Où $[La]_b$ correspond à l'accumulation nette de lactates sanguin mesurée après l'exercice ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), β est l'équivalent énergétique de l'accumulation de lactates dans le sang, supposé être égal à $0,0689 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mmol}^{-1}$ par Di Prampero (1981) et M la masse du nageur (kg).

$$An_{al} = PCr * (1 - e^{-t/\tau}) * M$$

Où t correspond au temps de l'exercice, τ comme constante de temps de la dégradation de la phosphocréatine après le début de l'exercice, (23,4 secondes) (Binzoni et al., 1992 et repris par Capelli, 1998), M la masse du nageur en kilogrammes et PCr la concentration de phosphocréatine au repos.

Le coût énergétique pourra alors être estimé par l'équation suivante :

$$CE = (\dot{E}Ae + \dot{E}AnLa + \dot{E}AnAl) / V$$

Il correspond à la somme totale de la dépense des trois systèmes énergétiques divisée par la vitesse de l'exercice.

Ce qu'il faut retenir :

Les travaux scientifiques mettent en évidence une contribution mixte des processus aérobie et anaérobie pour les épreuves de natation. Ce caractère mixte est très marqué pour les épreuves de 100, 200 et 400 mètres. Au cours de ces épreuves, un niveau presque maximal (pour le 100 mètres) ou maximal (pour les épreuves du 200 au 400 mètres) de la consommation d'oxygène est atteint. Les processus d'apport d'énergie métabolique de la glycolyse anaérobie assurent l'approvisionnement énergétique supplémentaire requis. L'accumulation de lactate musculaire et l'acidose qui y est associée est un facteur limitant majeur car elle inhibe les enzymes de la voie métabolique glycolytique de production d'énergie.

L'entraînement des nageurs doit par conséquent proposer des méthodes qui permettent de développer conjointement la puissance et la cinétique des processus oxydatifs et glycolytiques. Cet entraînement doit aussi élever les capacités d'élimination et d'oxydation du lactate comme les capacités de tamponnage musculaire. Enfin, l'évolution de la contribution de chaque système durant les différentes phases de la course est à prendre en compte, afin de gérer son effort de manière optimale. Notre travail consistera à alimenter les connaissances sur la cinétique des paramètres métaboliques au cours d'un 100 mètres. Les différentes réponses métaboliques observées selon l'âge et le sexe permettront de construire des stratégies d'entraînement adaptées.

2.2 Coût énergétique, rendement et performance en natation

La performance dépend d'une part de la capacité à mobiliser le plus d'énergie possible par les trois voies métaboliques aérobie, anaérobie lactique et anaérobie alactique durant la course et d'autre part, de la capacité du nageur à perdre le moins d'énergie possible (efficacité propulsive, technique de nage) dans les processus de turbulences lorsqu'il se déplace à vitesse de course. Le coût énergétique de la locomotion aquatique peut être ainsi être considéré comme étant la quantité d'énergie métabolique dépensée par unité de distance parcourue : $CE = E/d$ (Di Prampero, 1986).

L'influence du milieu aquatique

Le coût énergétique a été exprimé comme le rapport du travail nécessaire pour surmonter les résistances (W_d) sur le produit des efficacités propulsives (n_p) et brutes (n_M) selon l'équation $C = W_d/(n_p \cdot n_M)$. L'efficacité brute correspond à la conversion de la dépense d'énergie en travail mécanique. L'efficacité propulsive représente le rapport de l'énergie mécanique fournie sur l'énergie propulsive. Selon l'équation ci-dessus un nageur sera plus efficace à une vitesse et à un rendement brut donné s'il réduit les résistances à l'avancement et/ou améliore son efficacité propulsive.

Il existe des résistances de vagues dites actives et passives. Les résistances actives sont des déformations du milieu aquatique, générées par les actions motrices du nageur pour permettre son déplacement. Le nageur doit éviter de créer des résistances en opposition à son déplacement (actions frénatrices) et doit rechercher à créer des résistances propulsives, dans le sens de son déplacement. Les résistances passives sont liées à la capacité de glisser dans l'eau et sont influencées par une traînée de forme (forme du corps de nageur au cours de son déplacement dans l'eau), traînée de vagues (turbulences créées par les segments propulsifs) et une traînée de frottements (écoulement de l'eau et viscosité de la peau). En milieu aquatique, la résistance de l'eau et les forces de traînée augmentent avec le cube de la vitesse (Toussaint et Hollander, 1994).

Cette augmentation exponentielle des résistances à l'avancement avec la vitesse est l'une des causes principales (en plus de la contribution croissante de la glycolyse anaérobie) de l'augmentation exponentielle du coût énergétique avec la vitesse de nage (Capelli et al., 1998). Di Prampero et al. (1974) ont estimé le coût énergétique à $1.7 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1}$ à $1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, et $2 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1}$ à $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ chez un crawlleur de haut niveau.

L'influence de la locomotion

Di Prampero (1986) a comparé plusieurs formes de locomotion - à des vitesses correspondant aux records du monde - pour des épreuves d'endurance de durées similaires. Il a montré que le coût énergétique en natation ($20 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) pour un 1500 mètres nage libre réalisé à $1,67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ était 4,7 fois plus élevé que celui d'une course à pied de 5 kilomètres ($\sim 0,30 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1}$) et 8,7 fois plus grand que celui d'une épreuve cycliste de 10 kilomètres (de 0,1 à $0,2 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-1}$).

En revanche pour des temps d'efforts similaires (ex : 200 m nage libre (107 s), 800 m à pied (101 s) ou 1500 mètres en patinage de vitesse (114 s), les dépenses énergétiques sont très comparables : 2557, 2606 et 2514 kW respectivement. De même les 1500m nage libre, 5000m

à pied, 10000m en patinage (trois épreuves d'une durée proche d'un quart d'heure) entraînent des dépenses très semblables (voir tableau 6).

Quel que soit le mode de locomotion, c'est donc bien la production maximale d'énergie par unité de temps qui reste le principal facteur limitant (Di Prampero, 1986).

		Distance (m)	Temps (s)	Vitesse (m•s ⁻¹)	Coût énergétique (kJ•m ⁻¹)	Puissance métabolique maximale (kW)
Course à pied		400	43,86	9,12	0,359	3 675
		800	101,73	7,86	0,325	2 606
		1500	209,45	7,16	0,311	2 189
		5000	780,40	6,41	0,301	1 905
Skating		1000	73,60	13,59	0,242	2 914
		1500	114,79	13,07	0,221	2 514
		5000	416,91	11,99	0,188	1 997
		10 000	866,70	11,54	0,177	1 895
Natation		100	48,95	2,04	2,00	3 464
		200	107,44	1,86	1,70	2 557
		400	227,80	1,76	1,50	2 159
		1500	894,56	1,68	1,38	1 892

Tableau 6. Records du monde et leur vitesse dans les disciplines correspondantes. Le coût énergétique pour un homme de 70 kilogrammes, mesurant 1 mètre 75 centimètres. (D'après Di Prampero, 1986). La puissance métabolique maximale en natation est similaire à celle de la course à pied pour des durées d'effort similaires. Le coût énergétique rapporté au km, est 5 à 7 fois supérieur en natation.

Ces valeurs de coût énergétique témoignent du faible rendement de l'homme dans le milieu aquatique. Par comparaison, les espèces totalement adaptées au milieu aquatique comme les dauphins ont un coût énergétique plus faible comparativement à ceux des nageurs pour des vitesses de déplacement 3 à 4 fois plus élevées (Van Der Hoop et al., 2014). Dans un autre ordre d'idées, en nage avec palme sous-marine, l'augmentation de la surface propulsive associée à des résistances actives à l'avancement moins élevées induit un coût énergétique 3 fois plus faible comparativement à la nage en surface (environ 0,5 kJ•m⁻¹) (Pendergast et al., 1996).

Seifert et al. (2010) ont observé une augmentation du coût énergétique au cours d'un test progressif de 6 x 300 mètres, entrecoupés de périodes de 30 secondes de repos entre chaque palier. Le sixième 300 mètres devait s'effectuer à allure du record personnel du nageur sur 400 mètres. Le palier précédent devait être nagé 5 secondes plus lentement et ainsi de suite jusqu'au premier palier. De façon intéressante, à intensité sous-maximale, les valeurs de coûts énergétiques ont été supérieures pour les sprinters. De plus les augmentations du coût

énergétique ont été nettement supérieures entre les paliers 4 et 6 (qui correspond à des vitesses soutenues) qu'entre les paliers 1 et 3, et ce malgré des incréments de vitesses similaires (augmentation de 10% pour les nageurs de demi-fond et de 8% pour les sprinters entre les paliers 1 à 3 et augmentation de 25% pour les nageurs de demi-fond et 13% pour les sprinters entre les paliers 4 à 6).

300m	Nageurs de demi-fond						Sprinters					
	C ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)		C _{aéro} (%)		C _{anaéro} (%)		C ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)		C _{aéro} (%)		C _{anaéro} (%)	
	Moy SD		Moy SD		Moy SD		Moy SD		Moy SD		Moy SD	
1	10,5	2,3	86,9	6,1	13,1	6,1	13,3	2,4	70,7	8,2	29,3	8,2
2	10,7	2,7	82,9	7,5	17,1	7,5	13,4	2,2	67,3	11,0	32,7	11,0
3	11,7	2,7	78,5	6,9	21,6	6,9	14,4	1,9	67,2	9,9	32,9	9,9
4	12,9	2,0	75,9	8,5	24,1	8,5	15,1	1,7	66,0	9,9	34,0	9,9
5	14,6	2,2	72,0	9,0	28,0	9,0	15,6	1,6	65,3	8,6	34,7	8,6
6	17,2	2,4	63,3	8,3	36,7	8,3	17,2	2,1	60,8	7,8	39,2	7,8
Moy	12,9	3,3	79,6	10,7	23,4	10,7	14,8	2,3	66,2	9,4	33,8	9,4

Tableau 7. Augmentation du coût énergétique durant un test incrémenté de 6 x 300 m pour les nageurs de sprint et de longue distance (D'après Seifert et al., 2010). C représente le coût énergétique, C_{aéro} la contribution aérobie et C_{anaéro} la contribution anaérobie. Les résultats montrent une augmentation progressive du coût énergétique en fonction de la vitesse, ainsi qu'une augmentation de la contribution anaérobie. Aussi, les sprinters ont pour chaque palier, une contribution anaérobie plus importante que chez les nageurs de demi-fond. Enfin, sur les vitesses sous-maximales, le coût énergétique était plus élevé chez les sprinters.

Les résultats du tableau 7 montrent que les sprinters utilisent davantage le système anaérobie par rapport aux nageurs de demi-fond. Ce test à dominante aérobie semble avoir engendré rapidement une fatigue musculaire chez les sprinters tout en ayant un indice de nage (vitesse x amplitude) plus faible.

Ce test paraît plus adapté pour les nageurs de demi-fond. Au cours du test, nous observons une augmentation de la vitesse qui entraîne une élévation de la fréquence de nage associée à une diminution de l'amplitude. Il est possible d'observer les progressions du nageur, sur la capacité à maintenir son efficacité de nage avec l'augmentation du coût énergétique.

L'influence de la nage

Le coût énergétique diffère selon les nages, en raison de leurs spécificités propulsives. Capelli et son équipe (1998) ont montré que le crawl est la nage qui offre le meilleur (le plus faible) coût énergétique, devant le dos, le papillon et la brasse respectivement (ces deux derniers styles engendrant les plus grandes proportions de turbulences donc de pertes énergétiques durant le cycle propulsif). Il est possible que les fortes variations intra-cycliques observées en brasse (une phase propulsive à forte dépense d'énergie compensant la perte de vitesse lors de la phase non

propulsive) soient à l'origine de cette moindre efficacité. Ces résultats sont bien entendu corrélés aux vitesses de nage mesurées en compétition : le crawl est la nage la plus rapide et la brasse la nage la plus lente. Le coût énergétique est donc fortement influencé par la technique de nage ; il peut être amélioré par l'entraînement lorsque celui-ci parfait la technique et réduit les turbulences et les pertes énergétiques.

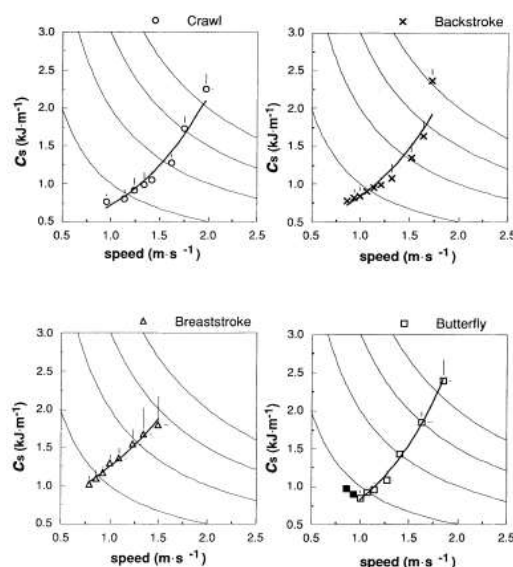


Figure 9. Valeurs moyennes du coût énergétique (C_s) en natation selon les quatre nages : crawl, dos (backstroke), brasse (breastroke), papillon (butterfly) en fonction de la vitesse (speed). (Capelli et al., 1998).

De surcroît, les différents composants du rendement (global, mécanique et propulsif) sont largement plus faibles en natation comparativement à d'autres activités sportives terrestres. Par exemple l'efficacité mécanique, a été estimée à environ 25% en cyclisme soit 2,5 fois supérieur à celui de la natation (Zameziati et al., 2006 ; Bertucci et al., 2012). La densité de l'eau est 800 fois supérieure à celle de l'air. C'est pourquoi sur une unité de distance, la natation demande une production d'énergie supérieure à celle des disciplines terrestres (mais la dépense d'énergie reste similaire lorsqu'on se réfère à une durée d'effort) (Di Prampero, 1986).

L'amélioration de 10% de l'efficacité propulsive (associée à une stabilisation de la puissance métabolique) induit une amélioration de la performance supérieure comparativement à une amélioration de 10% de la puissance du métabolisme aérobie ou du métabolisme anaérobie associée à une stabilisation de l'efficacité.

Distance (m)	Temps (s)	$\Delta t/\Delta PAé$ (%)	$\Delta t/\Delta PAn$ (%)	$\Delta t/\Delta PAna$ (%)	$\Delta t/\Delta C$ (%)
50	25,2	-0,034	-0,044	-0,160	0,251
100	55,3	-0,084	-0,042	-0,110	0,241
200	117,1	-0,141	-0,303	-0,069	0,237
400	238,2	-0,187	-0,017	-0,038	0,233
800	485,8	-0,215	-0,008	-0,021	0,233
1500	926,7	-0,229	-0,005	-0,012	0,233

Tableau 8. Amélioration ou diminution estimée du meilleur temps individuel (exprimées en pourcentage) correspondant à une amélioration théorique de 1% de la puissance maximale aérobie ($\Delta PAé$), de la capacité anaérobie lactique (ΔPAn), de la capacité anaérobie alactique ($\Delta PAna$) ou du coût énergétique (ΔC). (Capelli et al., 1999). Par exemple, une amélioration de 1% de la puissance maximale aérobie, entraîne une amélioration de 0,187% du temps sur 400 mètres, soit environ 45 centièmes de gains pour un 400 mètres nagé en 4 minutes.

L'ensemble de ces résultats montre que plus la vitesse augmente, plus la dépense d'énergie est importante. Par exemple, pour un 200 mètres nage libre, une amélioration de la performance de 4 secondes demandera une surdépense d'énergie aérobie de 10 à 15 ml•min⁻¹•kg⁻¹ en équivalent $\dot{V}O_2$, soit 0,7 L•min⁻¹ pour un nageur de 70 kg.

Cette augmentation est très considérable et demande un temps très important pour induire des capacités physiologiques. Pour espérer induire de telles adaptations, l'entraînement doit être largement modifié pour augmenter ce potentiel énergétique.

L'influence de la fatigue

Pour ce qui concerne l'influence de la fatigue sur la diminution de l'efficacité propulsive et l'augmentation du coût énergétique, Figueiredo (2011) et son équipe ont observé chez 10 nageurs internationaux, une diminution progressive de l'efficacité propulsive tout au long d'un 200 mètres nagé à vitesse de course. Cette décroissance de l'efficacité a été interprétée comme un indice de la réduction de la qualité technique du cycle (Wakayoshi et al., 1995, 1996), une baisse de la puissance (Toussaint et al., 2006), une apparition de la fatigue neuromusculaire (Figueiredo et al., 2011), ou une combinaison des ces possibilités.

D'autres auteurs (Chatard et al., 1990 ; Cappaert et al., 1992) ont rapporté aussi une meilleure efficacité propulsive pour les nageurs de longue distance comparativement aux nageurs de moyenne distance et aux sprinters (62 vs. 56 vs. 42%) respectivement. Les nageurs de longue distance semblent avoir une meilleure tolérance à la fatigue et arrivent à garder une bonne

efficacité propulsive plus longtemps que les autres. En termes techniques, cette efficacité se traduit par une fréquence gestuelle plus basse chez les nageurs de demi-fond. Lorsque la fréquence gestuelle augmente, les gestes sont moins précis et on observe une déperdition d'énergie très importante.

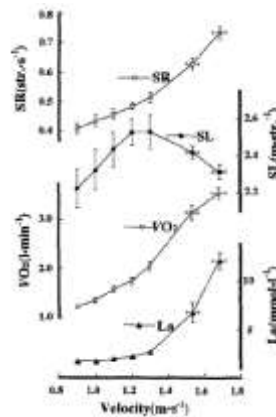


Figure 10. Relations entre la fréquence (SR), l'amplitude (SL), la $\dot{V}O_2$, la lactatémie (La) et la vitesse (velocity) sur des efforts sous-maximaux et maximaux (Wakayoshi, 1996). Cette figure montre un point d'inflexion du lactate sanguin, qui est associée à une augmentation rapide de la consommation d'oxygène. Ce changement au niveau physiologique se traduit également au niveau biomécanique, où l'amplitude de nage baisse fortement, alors que la fréquence s'élève de manière importante.

Ces observations et résultats scientifiques engagent les praticiens à rechercher les moyens d'entraînement permettant l'acquisition des techniques de nage les plus efficaces possibles. Dans cette perspective de diminution du coût énergétique, les travaux scientifiques ont montré qu'il était possible d'agir sur 2 variables principales, la technique de nage (Costa et al., 2012b, 2013 ; Barbosa et al., 2008 ; Vilas-Boas et al., 2009), et la tolérance à la fatigue (Figueiredo et al., 2011 ; Wakayoshi et al., 1995).

Wakayoshi (1995) a montré que la baisse de l'efficacité de nage se traduit par une détérioration de la technique de nage à la fin de la course. L'apparition de fatigue arrive avec une augmentation de concentration sanguine du lactate (Figueiredo et al., 2011 ; Wakayoshi et al., 1996) et une fatigue neuromusculaire (Figueiredo et al., 2011). Cette diminution de l'efficacité suggère une augmentation du coût énergétique.

A l'entraînement, il semble possible de pouvoir améliorer sa tolérance à la fatigue en contrôlant les paramètres de course. Le maintien de l'amplitude de nage à une vitesse donnée peut représenter un bon exemple de développement de l'efficacité de nage. L'idée est de repousser au maximum le moment où la fatigue neuromusculaire oblige le nageur à élever sa fréquence (et diminuer son amplitude) et ainsi augmenter son coût énergétique. Il semble alors primordial de déterminer les bonnes allures qui correspondent à un bon indice de nage.

Ce qu'il faut retenir :

Le coût énergétique en natation est particulièrement élevé (par unité de distance) en raison des résistances à l'avancement et du manque d'adaptation morphologique, physiologique et musculo-squelettique de l'homme au milieu aquatique. Les études scientifiques ont montré que le coût énergétique était d'autant plus élevé et le rendement propulsif d'autant plus faible pour des techniques de nages non efficaces et pour des vitesses de nages élevées. Les vitesses de nage trop lentes ne semblent pas les plus économiques du fait d'un rapport non optimal entre la fréquence et l'amplitude de nage et du fait de variations de vitesses intra-cycliques trop élevées. A l'inverse les vitesses de nage trop rapides sont aussi associées à une diminution de l'efficacité de nage (sauf si le nageur parvient à maintenir la précision du geste à ces fréquences élevées). Cette diminution de l'efficacité de nage aux intensités les plus élevées dépend de l'augmentation des résistances à l'avancement (elles-mêmes associées à l'augmentation de la vitesse), de l'augmentation des turbulences créées à des fréquences gestuelles élevées et de la fatigue musculaire. L'ensemble de ces arguments conduisent à questionner l'efficacité des modèles d'entraînement en natation, avec ceux existant dans les autres disciplines. Le déplacement en position couchée, dans un environnement aquatique, implique des contraintes qui diffèrent fortement de la locomotion terrestre. Le rendement mécanique n'est pas du tout identique et la relation entre coût énergétique et efficacité propulsive semble beaucoup plus étroite en natation, ce qui laisse penser à une spécificité de l'entraînement pour cette discipline.

2.3 Facteurs physiologiques sous-maximaux lors de test incrémentaux

Plusieurs paramètres physiologiques peuvent être analysés lors d'épreuves sous-maximales (Costill et al., 1973 ; Olbrecht et al., 1985).

La vitesse associée au seuil anaérobie

Le seuil anaérobie correspond au plus haut niveau d'intensité d'effort physique dont l'énergie provient très majoritairement du métabolisme aérobie. Au niveau du seuil anaérobie, la quantité de lactate diffusée dans le sang est égale à la quantité de lactate qui en sort (Svedahl et MacIntosh, 2003). En natation, comme dans les autres disciplines, de nombreux tests ont été élaborés afin de déterminer la vitesse associée au seuil anaérobie. Toutefois, chacune de ces approches varie selon leur protocole de mesure et donnent donc à un vocabulaire différent. Cette

identification du seuil anaérobie servira donc à quantifier le temps passé autour de cette zone, afin d'évaluer la qualité des programmes d'entraînement (voir chapitre suivant).

Le « seuil anaérobie » implique une notion d'intensité de l'effort, impliquant une forte masse musculaire, où la consommation d'oxygène n'est plus suffisante pour fournir l'énergie demandée par l'exercice. L'état stable maximal est défini comme la plus haute intensité d'exercice où la concentration de lactate sanguin n'augmente pas durant un exercice constant (Tegtbur et al., 1993). En quelque sorte, c'est le dernier niveau de puissance pour laquelle la concentration sanguine du lactate est à l'état d'équilibre, c'est-à-dire où la production de lactate est égale à son élimination. La vitesse de lactatémie minimum symbolise la vitesse de déplacement à laquelle la lactatémie atteint une valeur minimale durant un test incrémenté (progressif par paliers). Le seuil lactique est l'intensité d'exercice qui est associée à une augmentation significative de l'accumulation de lactates sanguin durant un test incrémenté. Plusieurs techniques mathématiques peuvent permettre de le mesurer. Le point d'inflexion du lactate sanguin est défini comme l'intensité d'exercice qui induit une lactatémie de $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ pendant un test incrémenté (Sjodin et al., 1981). Le seuil individuel anaérobie est une version individualisée du seuil lactique qui correspond toujours à l'intensité d'exercice associée à une augmentation de la lactatémie (Stegmann et al., 1981). Cette technique utilise une observation de la courbe de lactatémie en fonction de la vitesse durant un test incrémenté. Le seuil ventilatoire se caractérise par une augmentation forte de la ventilation qui devient disproportionnelle par rapport à l'augmentation de l'intensité de l'exercice durant un test incrémenté. Plusieurs études ont montré qu'il existait une augmentation non linéaire de la ventilation quand le seuil anaérobie était dépassé. Cette technique présente l'avantage d'être non invasive. Quelques auteurs ont montré une forte corrélation entre la vitesse associée au deuxième seuil ventilatoire et à la vitesse associée au second seuil lactique (Espada et al., 2015 ; Yamamoto et al., 1991). Ribeiro et al. (2015), chez des nageurs, ont par ailleurs, montré que la vitesse associée au deuxième seuil ventilatoire correspondait à des valeurs de lactatémie inférieure à $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, indiquant des valeurs plus basses que la valeur théorique de $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ souvent utilisée dans les sports d'endurance (Heck et al., 1985). En natation, les chercheurs et entraîneurs préfèrent souvent récolter la lactatémie plutôt que les échanges gazeux, par facilité de recueil des données.

Plusieurs études ont observé des changements de vitesse associés à une lactatémie de $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ chez des nageurs de haut niveau sur plusieurs saisons (Anderson et al., 2006 ; Costa et al., 2013 ; Pyne et al., 2001 ; Ryan et al., 1990 ; Santhiago et al., 2009 ; Sharp et al., 1984). Trois de ces études ont montré que l'augmentation du volume d'entraînement (en kilomètres) pendant la saison n'entraînait pas de changement significatif sur la vitesse associée au seuil lactique (Costa et al., 2013 ; Ryan et al., 1990 ; Sharp et al., 1984). Ces observations ont montré que les variations de vitesse au seuil lactique étaient très faibles chez des nageurs de haut niveau et ne changeaient que très peu au cours d'une saison (Costa et al., 2012). Toutefois, ces travaux ont également souligné que les nageurs internationaux avaient une vitesse au seuil lactique plus élevée, en comparaison avec des nageurs de niveau national (Figure 11).

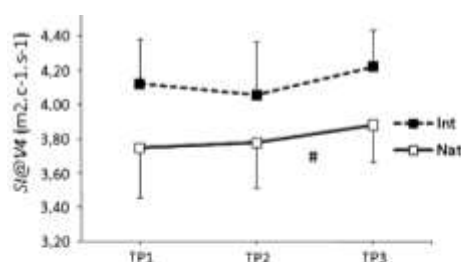


Figure 11. Variations de la vitesse à $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ au cours des trois grands cycles de la saison (TP1 : succédant la première phase d'affûtage ; TP2 : succédant la deuxième phase d'affûtage ; TP3 : succédant la troisième phase d'affûtage) entre des nageurs de niveau international et national. Cette figure ne montre pas de changements significatifs entre les périodes. En revanche, il montre une différence significative entre les nageurs internationaux et les nageurs de niveau national (D'après Costa et al., 2012).

Ces résultats ont renforcé les observations d'Olbrecht et al. (1985). Les auteurs ont trouvé une corrélation positive ($r = 0,97$; $P < 0,001$) entre la vitesse maximale durant un test de 30 minutes et la vitesse correspondant à une concentration sanguine de $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ de lactate estimée sur un test de 2 fois 400 mètres. Les auteurs ont alors conclu que cette vitesse V_4 est un bon indicateur de la performance en natation, et qu'il est possible d'ajuster l'intensité de l'exercice en fonction d'un pourcentage de V_4 . Costa (2012) a observé des résultats similaires en démontrant que l'indice de nage à V_4 était un indicateur de la performance sur une épreuve de 200 mètres pour des nageurs internationaux.

Cet indice semble être encore plus déterminant pour les épreuves de demi-fond. Seifert et al. (2010) ont montré que les nageurs de demi-fond avaient une concentration sanguine du lactate beaucoup plus basse que les sprinters, pour toutes les étapes d'un test incrémenté de 6 x 200 mètres. Les nageurs de demi-fond avaient alors un coût énergétique moins important et étaient susceptibles de maintenir cette intensité plus longtemps que les sprinters.

Le temps de maintien à $\dot{V}O_{2\max}$

Ribeiro et al. (1990) ont montré que la vitesse correspondant à 85% de la $\dot{V}O_{2\max}$ était fortement corrélée à la performance réalisée sur un 400 mètres nage libre chez des nageurs de niveau national. Les résultats ont montré que la performance sur ce type d'épreuves ne dépend pas directement de la consommation maximale d'oxygène, mais de la capacité à atteindre des vitesses importantes avec une demande aérobie moins importante. Les auteurs ont conclu que le nageur pouvait augmenter sa performance, en améliorant son économie de nage plutôt que sa consommation maximale d'oxygène.

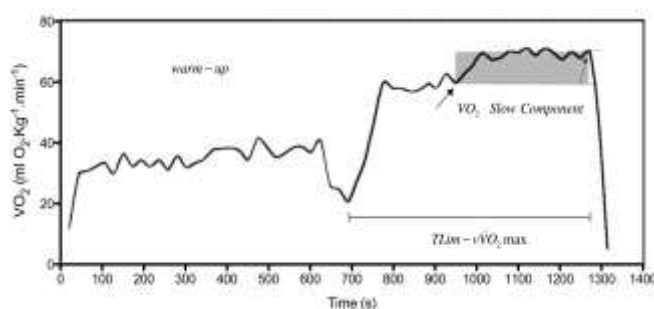


Figure 12. Exemple de la dynamique de $\dot{V}O_2$ au cours d'un test de temps limité à $\dot{V}O_{2\max}$. Le test consiste à réaliser un échauffement à allure sous-maximale, qui est suivi par 20 secondes de repos, suivi d'un 50 mètres à allure progressive, puis un maintien de la vitesse à $\dot{V}O_{2\max}$ jusqu'à épuisement. La zone grise représente le $\dot{V}O_2$ slow component (le surplus de dépense d'oxygène pour réaliser un effort relativement intense). (D'après Fernandes et al., 2003).

Ce qu'il faut retenir :

Il est possible d'évaluer les capacités physiologiques à travers des tests sous-maximaux. Leurs évolutions peuvent ainsi être suivies pour définir de potentielles sources d'amélioration des performances. Ces tests sont facilement réalisables et peuvent servir de moyens de suivi de l'entraînement, au cours des différents cycles de la saison. D'autres variables sont également susceptibles de compléter l'analyse, en utilisant notamment des échelles de fatigue, pour évaluer l'état de forme du nageur.

A travers la réalisation de ces différents tests, il sera plus facile de prescrire un entraînement adapté en fonction des adaptations physiologiques observées lors de ces tests. Les différents types d'entraînement conduisent à des changements physiologiques et spécifiques, conditionnés par la charge d'entraînement (volume, intensité, fréquence).

3. Les différents modèles d'entraînement en natation

A l'image de toutes les disciplines sportives, le nageur organise sa vie pour atteindre la plus haute performance possible. Pour cela, il doit développer des habiletés mentales, physiques et techniques spécifiques à son activité. L'entraînement permet de développer ses capacités d'adaptation aux contraintes spécifiques de chaque discipline. C'est pourquoi, il y consacre une grande partie de son temps.

L'entraînement se caractérise par sa périodicité (fréquence), sa quantité (durée et intensité) et sa qualité (travail motivationnel, exercices techniques). Il se traduit également par une périodisation au cours du temps. Sur le long terme, il est primordial de planifier les grandes étapes de la vie du sportif afin de développer des adaptations physiologiques et techniques de manière optimale. A plus court terme, l'entraînement se planifie pour l'ensemble des objectifs d'une saison de compétition.

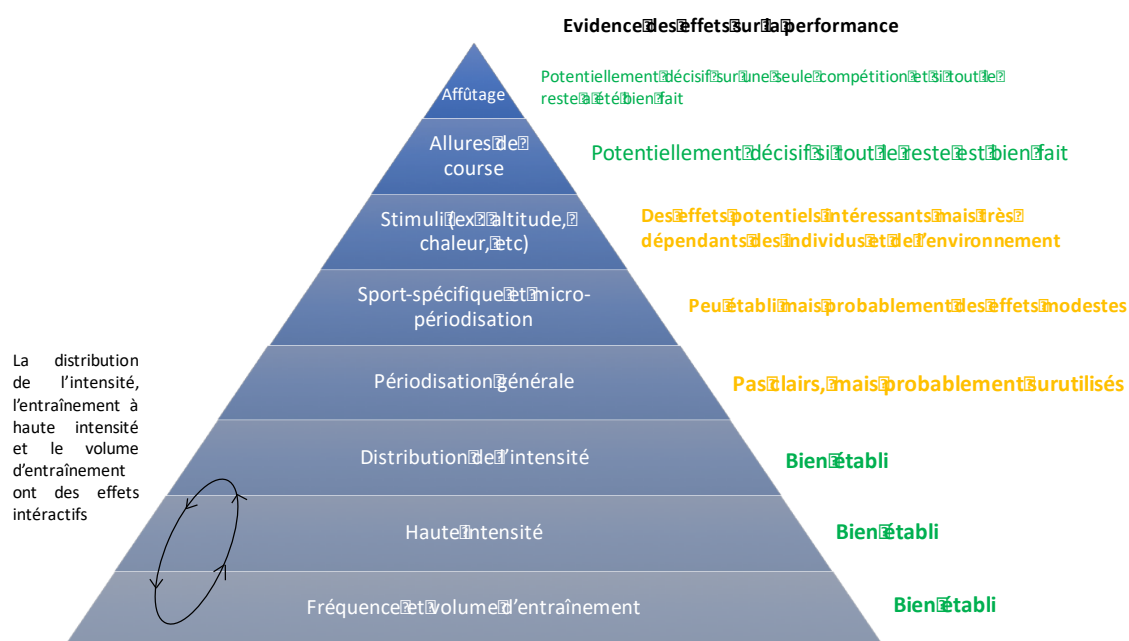


Figure 13. Hiérarchie et structure de l'entraînement en endurance (D'après Seiler, 2016). Cette figure proposée par Seiler lors d'un congrès sur l'entraînement en endurance vise à mettre en évidence que les effets sur la performance se construisent sur un socle important combinant la distribution de l'intensité, l'entraînement à haute intensité et la volume d'entraînement. Le reste permet d'optimiser encore les gains en performance mais ces effets restent relatifs, et ne seront utiles que si le reste est bien mené.

3.1 Les différents cycles d'entraînement

Une saison d'entraînement se compose en différentes périodes, qui sont séquencées dans le but d'améliorer la performance (Issurin, 2010) tout en limitant les risques de blessure, de surentraînement (baisse installée du niveau de performance associée à une diminution des capacités physiologiques et psychologiques) (O'Toole, 1998) et de désentraînement (perte partielle ou complète des adaptations acquises par l'entraînement en réponse à un stimulus d'entraînement trop faible) (Mujika et Padilla, 2000 ; Turner, 2011).

Au cours de la saison sportive, il existe donc trois types de périodes que l'on qualifie généralement de macrocycles, mésocycles et microcycles (Issurin, 2010). Les macrocycles représentent une période d'entraînement à long terme, qui s'étend sur plusieurs mois voire parfois des années. Ils se planifient souvent en fonction de la date de la compétition majeure de la saison et ont pour objectif d'induire des adaptations à long terme. Le macrocycle est composé de plusieurs mésocycles d'une durée de quelques semaines. Ces mésocycles définissent des objectifs à moyen terme et sont eux-mêmes composés de microcycles. Ces derniers ne durent que quelques jours et visent à induire des adaptations à court terme.

En natation, les pratiques d'entraînement et de périodisation peuvent différer selon les groupes d'entraînement et les spécialités des nageurs. Les études expérimentales et les rapports d'entraîneurs nous serviront à présenter les principaux schémas de périodisation connus dans cette discipline.

3.1.1 Les études expérimentales

Peu d'études ont décrit la composition des cycles d'entraînement des nageurs de haut niveau. Hellard et al. (2017) ont montré que les schémas d'entraînement doivent être périodisés différemment selon les caractéristiques des nageurs (sprinters vs demi-fond). Alors que pour les sprinters l'entraînement aérobie (intensité basse, sous $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) et au seuil (intensité moyenne, autour de $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) est préconisé au cours des mésocycles dits de base et généraux (6 à 11 semaines avant les compétitions), pour les nageurs de demi-fond, plus le volume de l'entraînement aérobie et au seuil est élevé durant les mésocycles de base, général et spécifique (3 à 11 semaines avant les compétitions) plus les performances sont importantes. De façon différente pour les sprinters, la quantité d'entraînement à haute intensité est liée à des hautes performances 3 à 5 semaines avant les compétitions.

Ces résultats mettent en évidence que les nageurs de longue distance semblent nécessiter de mésocycles plus longs que les sprinters, avec une charge d'entraînement plus conséquente, et un affûtage d'une durée plus courte. A l'inverse, les sprinters nécessitent une période d'affûtage plus courte, mais où le travail à haute intensité reste important.

Ces observations sont descriptives et ne signifient pas qu'il existe un seul modèle optimal. La littérature technique décrit d'ailleurs d'autres modèles d'entraînement avec une attention particulière aux différences inter-individuelles.

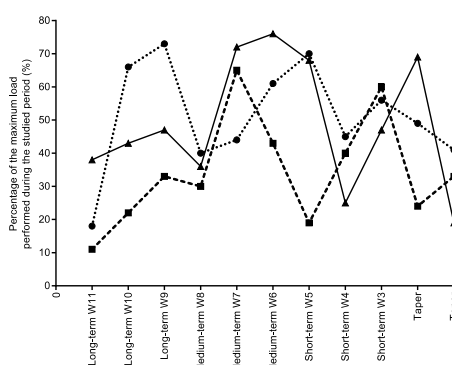


Figure 14. Charge d'entraînement à haute intensité (lignes pointillées avec des cercles), à basse à moyenne intensité (lignes pointillées avec des carrés), entraînement de force (lignes solides avec des triangles) pour un nageur champion du monde durant les 11 dernières semaines de préparation et les 4 mésocycles avant la compétition. Cette figure nous montre les fortes variations de charge d'entraînement au cours des différents cycles d'entraînement (D'après Hellard et al., 2017).

Cette illustration (figure 14) nous montre que la distribution de la charge d'entraînement est très variée au cours de la préparation d'une grande compétition pour un nageur de niveau international. C'est l'interaction entre le volume, les zones d'intensité, la préparation physique qui conditionne le développement des adaptations physiologiques du nageur.

A ce jour, seules les études scientifiques observationnelles ou les rapports d'entraîneurs ont permis de fournir des enseignements sur les effets de la distribution de l'intensité à l'entraînement. Il est nécessaire d'explorer ce champ scientifique pour comprendre comment les variations de charge d'entraînement en natation sont susceptibles de maximiser les gains de performance.

3.2.2 La littérature technique

a) Les épreuves de fond

Pour les nageurs de fond et de demi-fond, Maglischo (2003) a décrit les entraînements de plusieurs champions du monde et Olympique : Kieren Perkins, Janet Evans, Brooke Bennet,

Tom Dolan. Comparées à aujourd'hui, ces publications montrent une réduction de la durée des macrocycles de 24-26 semaines pour les nageuses et nageurs de demi-fond dans les années 1985-2004 (Janet Evans, Tom Dolan) à 14-18 semaines pour les nageurs de demi-fond des années 2004-2016 (Katie Ledecky, Mireia Belmonte, Grant Hackett) (Maglischo 2003 ; Vergnoux, 2014). Le volume hebdomadaire des nageurs de 800 et 1500 mètres est généralement compris entre 60 et 70 kilomètres, pouvant atteindre jusqu'à 90 kilomètres pour 10 à 11 sessions d'entraînement par semaines dans la majorité des cas (2 fois les lundis, mardis, jeudis, vendredis et 1 fois le mercredi et samedi).

b) Les épreuves mixtes

Dans son ouvrage, Maglischo (2003) rapporte également l'entraînement de plusieurs nageurs internationaux de moyenne distance (200 et 400 mètres). La durée de leurs cycles se rapproche fortement de celles des nageurs de demi-fond, avec un volume moyen annuel légèrement inférieur (2000 à 2500 km *vs* 2500 à 3000 km). Marsh (cité dans Maglischo 2003) propose que l'entraînement aérobie de base soit réalisé deux heures par jour, entre 5 et 6 jours par semaine. Il suggère aussi que les nageurs de moyenne distance incluent dans leur programme hebdomadaire 3 à 4 séances de « seuil » (allures se situant entre 2 mmol•L⁻¹ et 4 mmol•L⁻¹) pour améliorer leur tolérance à la fatigue (capacité à nager bien techniquement avec des valeurs de lactatémie supérieures à 2 mmol•L⁻¹) et développer leur endurance.

Marsh rappelle que ce type d'entraînement est important dans la période préparatoire mais doit être diminué à l'approche de la compétition (une ou deux sessions hebdomadaires durant la deuxième partie de la saison) car il devient trop sollicitant pour l'organisme et le nageur n'a pas le temps de récupérer. En revanche, plus la compétition s'approche, plus le volume nagé à allure de course est important pour se préparer à l'effort maximal (tant sur le plan physiologique que technique).

Urbanchek (cité par Maglischo 2003) l'entraîneur de Barrowman, Dolan, Malchow, Clary, Vanderkaay insiste également sur l'importance du travail qu'il définit comme « mixte » (séries durant lesquelles le nageur passe par toutes les intensités). Urbanchek propose souvent à ses nageurs, des longues séries de 3000 à 4000 mètres avec des variations d'allure. Ce type de séances semble intéressant pour les nageurs de moyenne distance car il permet de solliciter tous les systèmes énergétiques de manière importante. Ces nageurs doivent être capables de développer une forte puissance anaérobie et aérobie pour espérer l'emporter, tant le caractère mixte (aérobie et anaérobie) d'un 200 ou d'un 400 mètres est important.

c) Les épreuves de sprint

Contrairement aux nageurs de distance intermédiaire, pour les nageurs de sprint, l'entraînement est organisé sous forme de succession de blocs plus courts (de 3 à 6 semaines). Chaque mésocycle est composé de 2, 3 ou 4 blocs. Touretsky cité par Maglischo (2003) réalise des cycles de 8 à 12 semaines avec une succession de 3 blocs. Durant son mésocycle de développement de l'endurance, sur huit séances d'entraînement, en 3 jours il en consacre deux au développement du second seuil lactique, deux au développement de $\dot{V}O_{2max}$, et les 4 autres au travail aérobic.

David Marsh, quant à lui, propose deux séances consacrées au développement du seuil anaérobie aux sprinters durant une semaine d'un cycle en milieu de saison. La première en début de semaine est une série d'environ 1000 m sur des intervalles courts et moyens (75 à 125 m), et la seconde en fin de semaine avec une série du type 20 x 100 m.

D'un autre côté, Barnier (2012) entraîneur de nombreux médaillés Olympiques et mondiaux sur les distances de 50 et 100 m présente une conception d'entraînement à haute intensité, associé à un important développement de la force et des habiletés techniques. Dans les 3 mois qui ont précédé le titre de champion olympique de Manaudou, le volume hebdomadaire n'excédait pas 30 km, mais une forte partie était réalisée à allure de course et l'entraînement était constitué de 5 séances de musculation par semaine.

Pour les sprinters cités, les premiers mésocycles des macrocycles sont consacrés au développement accentué de la force et de la puissance et à un entraînement aérobic à basse intensité. Les mésocycles situés (5 à 8 semaines avant les compétitions majeures) sont majoritairement consacrés à l'entraînement anaérobie et de vitesse (Hellard et al., 2017).

Phase	Description
Mise en condition	Une augmentation progressive de la charge d'entraînement, composée d'un important volume en aérobic
Développement	Stabilisation du volume d'entraînement associée à une augmentation de l'intensité
Surcompensation	Phase d'allègement de la charge d'entraînement pour permettre une amélioration de l'état de forme
Récupération	Généralement limitée à une semaine entre les macrocycles, elle peut atteindre six semaines entre deux saisons sportives

Tableau 9. Les différentes phases d'entraînement d'un macrocycle. Ce tableau surligne l'importance de la périodisation de l'entraînement pour induire des adaptations physiologiques. (Communication FFN)

3.2 L'intensité d'entraînement

La quantification de l'intensité est beaucoup moins aisée que celle du volume (voir dans un chapitre ultérieur). Les entraîneurs ou les équipes scientifiques des sportifs de haut niveau ont souvent l'habitude de quantifier l'intensité à l'aide de la fréquence cardiaque ou de la lactatémie. Certains préfèrent utiliser un pourcentage de $\dot{V}O_{2\max}$, alors que d'autres ont recours aux échelles de perception de l'effort (RPE). Les échelles perceptuelles sont d'ailleurs très intéressantes car elles permettent de constater si les prescriptions de l'entraîneur sont en accord avec la réalisation des athlètes (Foster, 2001). Toutefois, il a déjà été montré que le RPE était très sensible au volume de la séance en natation (De Andrade et al., 2016) et ne pouvait donc être utilisé de manière isolée pour quantifier la charge d'entraînement.

Zone d'intensité	$\dot{V}O_{2\max}$ (% $\text{mL}\cdot\text{mn}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$)	FC (%bpm)	Lactate ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	50-65	60-72	0,8-1,5
2	66-80	72-82	1,5-2,5
3	81-87	82-87	2,5-4
4	88-93	88-92	4,0-6,0
5	94-100	93-100	6,0-10,0

Tableau 10. Exemple de 5 zones d'intensité pour prescrire et monitorer l'entraînement. (D'après Seiler, 2010). Plusieurs variables physiologiques peuvent être utilisées pour évaluer l'intensité de l'exercice.

Pour des raisons pratiques, la quantification en trois zones d'intensité semble la plus appropriée, puisqu'elle construit ses bornes autour des seuils lactiques ou ventilatoires. Pour les athlètes bien entraînés ou de haut niveau, une classification a été réalisée et permet une comparaison relative entre les différentes disciplines. Dans ce manuscrit, nous nous référons à cette classification proposée par Seiler (2010). L'entraînement associée à une lactatémie stable, inférieure plus ou moins à $2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ est considéré comme une basse intensité (zone 1). L'entraînement réalisé à une intensité supérieure à $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ est considéré comme un entraînement à haute intensité (zone 3). Enfin, l'entraînement effectué entre 2 et $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ de lactate est considéré comme un entraînement au seuil ou à moyenne intensité (zone 2).

Comme pour le sous-chapitre précédent, nous regarderons d'abord les études ayant rapporté les quantifications de l'intensité chez des nageurs de haut niveau, puis nous observerons les réponses physiologiques présentées dans les études expérimentales.

3.2.1 Les études observationnelles

Les études observationnelles qui ont décrit l'entraînement des nageurs de haut niveau, ont montré des distributions qui semblent évoluer de 1990 à nos jours. Mujika et al. (1996) chez des nageurs Français suivis durant les années 1992-1995 ont rapporté pour trois périodes d'entraînement correspondant aux 4 semaines de surcharge précédant les affutages : des volumes équivalents à ~25, 5 et 4,5 km dans les zones 1, 2 et 3, correspondant aux pourcentages suivants : ~73, 15 et 11%. Au cours de l'affutage cette même équipe montre une évolution des proportions à ~86, 4 et 10%. Sur la totalité de la saison sportive la même équipe (Mujika et al., 1995) a par exemple mis en évidence pour des volumes annuels moyens ~1151 km des contributions de ~77, 11, 12%. Les modèles de distribution présentés par cette équipe scientifique dans les années 1992-1996 peuvent être qualifiés de modèles de distribution à volume moyen et à prédominance aérobie. Des corrélations individuelles pour les 18 nageurs étudiés entre les charges d'entraînement et les performances ont permis de montrer des corrélations significatives entre des volumes élevés et des hautes performances pour 8 des 18 nageurs, des volumes élevés en Zone 1 et des hautes performances pour 4 des 18 nageurs, des volumes élevés en Zone 2 et des hautes performances pour 14 des 18 nageurs, des volumes élevés en Zone 3 pour 4 des 18 nageurs.

Ces résultats mettent en avant qu'une faible partie de l'entraînement était réalisée en zone 3. Pourtant, les nageurs qui ont obtenu les meilleures performances, sont ceux pour lesquels les volumes nagés en zone 2 étaient les plus élevés. Au regard de ces résultats, les entraîneurs de ces groupes d'entraînement ont alors choisi d'augmenter le volume nagé à cette intensité.

Quelques années plus tard, Hellard et al. (2006) ont quantifié l'entraînement de nageurs français de haut niveau entre 2000 et 2005 et ont rapporté pour les nageurs sprinters, de demi-fond et de fond des volumes moyens annuels de 1600 km et des distributions de l'intensité en Z1 de (69, 57, 48% pour les nageurs sprinters, intermédiaires et de demi-fond respectivement) en Z2 (22, 35, 44 %) en Z3 (9, 8, 8%).

Epreuves	Zone 1 (%)	Zone 2 (%)	Zone 3 (%)
Sprinters	69	22	10
200-400 m	57	35	8
Demi-fond	48	44	8

Tableau 11. Synthèse des distributions de l'intensité d'entraînement pour des nageurs de haut niveau entre 2000 et 2005 (d'après Hellard et al., 2006). Ce tableau montre que le travail réalisé à haute intensité (Z3) ne dépasse pas 10% du volume d'entraînement. Il montre également une importante part réalisée entre les seuils aérobie et anaérobie (Z2). Cette part est d'autant plus importante pour les nageurs de demi-fond.

Les travaux de Avalos et al. (2003) et de Hellard et al. (2006, 2013) montrent que, pour ce groupe de nageurs Français de haut niveau, l'entraînement a évolué sur une dizaine d'années (1996-2008) à travers un volume d'entraînement plus important et plus orienté vers l'entraînement au second seuil lactique.

En synthèse, ces études mettent en évidence un changement des types d'entraînement passant d'une forte proportion aérobie durant les années 1990 (plus de 70% du temps d'entraînement) à une plus grande proportion au seuil durant les années 2000 (20 à 45%). Toutefois, toutes ces études montrent une part relativement faible de l'entraînement effectué au-dessus de $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (8 à 12%).

	Années 90 (Mujika)	Années 00 (Avalos, Hellard)
Zone 1	73 à 86%	50 à 70%
Zone 2	4 à 18%	20 à 45%
Zone 3	8 à 12%	8 à 10%

Tableau 12. *Résumé des quantifications de l'intensité chez des nageurs de haut niveau au cours d'études observationnelles. (Données tirées des travaux de Mujika et al., 1995, 1996 ; Avalos et al., 2003 et Hellard et al., 2006, 2013). Les observations de Mujika montrent une forte part de l'entraînement nagée à basse intensité alors que celles réalisées par Avalos et Hellard montrent une forte part de l'entraînement nagée entre les seuils aérobie et anaérobie.*

3.2.2 Les études expérimentales

Costill (1991) est l'un des premiers à avoir questionné la durée de l'entraînement en natation, qu'il décrit « par deux séances quotidiennes d'une durée totale d'environ 4 heures, avec un fort volume d'entraînement à des intensités basses ou modérées, inférieures aux allures de course, alors que la majorité des épreuves en natation ne durent pas plus de 3 minutes ».

Rares sont les études expérimentales qui ont rapporté des quantifications de nageurs de niveau international orientés sur une forte dose d'entraînement réalisée à haute intensité. Sept études ont mis en évidence des améliorations significatives sur les systèmes aérobie et anaérobie après une augmentation du travail à haute intensité (Faude et al., 2008 ; Houston et al., 1981 ; Kame et al., 1990 ; Pugliese et al., 2015 ; Sperlich et al., 2010 ; Termin et Pendergast, 2000 ; revues dans Nugent 2017).

Quatre d'entre elles ont rapporté des améliorations de la performance, sur des distances allant du 50 mètres au 2000 mètres (Kame et al., 1990 ; Pugliese et al., 2015 ; Sperlich et al., 2010 ; Termin et Pendergast, 2000). Aucune d'entre elles n'a montré une baisse de la performance ou une diminution des adaptations physiologiques après un entraînement à haute intensité.

Auteurs	Durée	Mesures physiologiques	Mesures de performance	Résultats
Sperlich et al.	5 semaines	$\dot{V}O_{2pic}$ sur ergomètre et La_{pic}	100 et 2000 mètres	Améliorations physiologiques et de performance
Faude et al.	4 semaines	La_{submax}	100 et 400 mètres	Améliorations physiologiques
Kilen et al.	12 semaines	$\dot{V}O_{2max}$	100 et 200 mètres	Aucun changement
Kame et al.	1 an	$\dot{V}O_{2pic}$	50, 100, 200, 500, 1000 et 1650 yards	Améliorations physiologiques et de performance
Termin et al.	4 ans	$\dot{V}O_{2pic}$	100 et 200 yards	Améliorations physiologiques et de performance
Houston et al.	6,5 semaines	$\dot{V}O_{2max}$	23, 91 et 457 mètres	?
Pugliese et al.	6 semaines	$\dot{V}O_{2pic}$ et La_{submax}	100, 400 et 2000 mètres	Améliorations physiologiques et de performance

Tableau 13. *Etudes ayant cherché des améliorations physiologiques et de performance après une réduction du volume et une augmentation de l'intensité (D'après Nugent et al., 2017).*

Dans l'étude de Sperlich (qui obtient le meilleur score d'inclusion de la review 22/32), un entraînement à haute intensité a été comparé avec un entraînement à haut volume pendant 5 semaines sur 26 jeunes nageurs. Le groupe HIT (haute intensité) a amélioré son La_{pic} de 20,1% alors que le groupe HVT (haut volume d'entraînement) a connu une baisse de son La_{pic} de 30,1%. Cette augmentation de La_{pic} peut se traduire par une plus forte contribution de l'activité anaérobie, qui correspond à une amélioration de la puissance sur une épreuve de sprint. Dans cette étude, la performance sur 50 et 100 m a été améliorée de 14,8% et les auteurs ont suggéré que l'augmentation de La_{pic} avait fortement influencé ce gain en performance. Sperlich a aussi montré que $\dot{V}O_{2pic}$ avait été augmenté de 10,2% dans le groupe HIT, et de 8,5% dans le groupe HVT.

En résumé, ces résultats indiquent que pour ces jeunes nageurs, un entraînement centré autour de HIT avec un volume moyen de 5,5 km était plus efficace qu'un entraînement HVT au volume deux fois supérieur.

Dans l'étude de Faude et al. (2008), des résultats similaires montrent l'amélioration des capacités physiologiques. Le groupe s'étant entraîné à haute intensité, avec un volume total d'entraînement deux fois moins important que le groupe contrôle, a amélioré sa vitesse V_4 dans des proportions identiques. Toutefois, aucune amélioration de performance n'a été observée sur le 100 et le 400 mètres pour les deux groupes. On retrouve également ce constat sur l'étude de

Kilen et al. (2014), où les nageurs n'ont pas amélioré leurs performances après avoir intensifié leur entraînement et réduit leur volume. Les auteurs ajoutent que les nageurs de l'étude avaient déjà eu beaucoup d'expérience en HIT, et qu'une limite de quantité totale à haute intensité peut se produire. Toutefois, il est important de noter que les nageurs étaient de niveau international, et que le groupe s'entraînant à haute intensité a obtenu les mêmes résultats que le groupe à haut volume. Cette observation permet de donner des perspectives d'entraînement, afin de réduire le volume nagé et le temps passé dans l'eau.

Chez des nageurs de niveau universitaire, Kame et al. (1990) ont montré une progression de 20% de $\dot{V}O_{2pic}$ durant une épreuve de nage contre résistance après une saison réalisée avec une haute intensité plus importante (ces résultats sont à prendre avec précaution puisqu'ils ont été publiés dans une revue technique).

L'étude de Pugliese et al. (2015) a montré une augmentation de 12% de la V_4 et une augmentation légèrement supérieure à 1% pour la performance sur 100 mètres chez des masters après un entraînement de 6 semaines à haute intensité. Cependant, aucun changement n'a été observé sur $\dot{V}O_{2pic}$ et la vitesse sur 400 et 2000 mètres, alors que le groupe à haut volume a amélioré $\dot{V}O_{2pic}$ et ses performances.

Termin et Pendergast (2000) ont montré chez 21 nageurs d'une université américaine, une amélioration de la performance sur 4 saisons sportives à la suite d'un entraînement à haute intensité. La distribution n'était pas quantifiée mais l'augmentation d'intensité était décrite de la façon suivante : deux jours successifs de haute intensité, suivis de deux jours de récupération (incluant eux-mêmes des sprints de moins de 15 secondes). Après 4 saisons à haute intensité, les nageurs ont amélioré leur performance de 8 et 10% sur 100 et 200 yards respectivement.

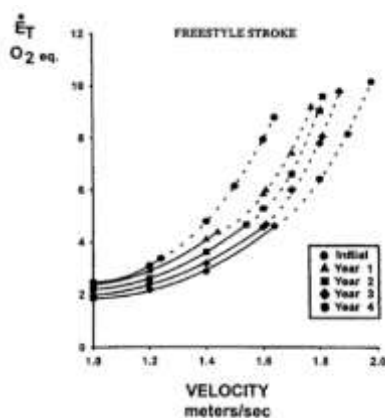


Figure 15. Le coût énergétique (E_T) en natation, exprimé en équivalent de O_2 , en fonction de la vitesse (velocity). Les données sont les valeurs moyennes pour les pré-tests de l'année 1, puis des tests de fin de saison, pour les années (years) 1, 2, 3 et 4. Cette figure montre une réduction progressive du coût énergétique saison par saison pour des nageurs universitaires, après une augmentation de la part d'entraînement réalisée à haute intensité (D'après Termin et Pendergast, 2000)

Une autre étude (Arroyo-Toledo et al., 2013) a présenté une distribution de l'intensité sur des nageurs de niveau régional âgés de 16 ans où deux modèles de distribution ont été testés. Un groupe a réalisé une périodisation dite traditionnelle avec un volume d'entraînement moyen de 23 kilomètres par semaine et la distribution de l'intensité suivante : 69% en zone 1, 25% en zone 2 et 6% en zone 3. Le second groupe s'entraînait selon une périodisation inversée (basée sur un premier cycle de développement anaérobie, suivie d'un cycle à développement aérobie), avec un volume hebdomadaire de 16 kilomètres et la distribution suivante : 49% en zone 1, 33% en zone 2 et 18% en zone 3. Les conclusions de cette étude soulignent que l'entraînement à haute intensité permet d'induire des améliorations de la performance sur 100 m plus élevées (+6,9%) comparativement à l'entraînement traditionnel (+0,4%).

Par ailleurs, Ogita et al. (2014) ont étudié les effets de deux séances quotidiennes de sprint interval training (répétitions de sprint de 10 secondes à très haute intensité), pendant 4 semaines 5 fois par semaine sur des nageurs scolaires bien entraînés. Après cette période, des améliorations significatives ont été observées sur la $\dot{V}O_{2max}$ et la puissance maximale. Ces adaptations physiologiques ont permis une amélioration de la performance sur l'épreuve de 50 m (2,0%). Cependant, l'âge des nageurs n'a pas été étudié et il est possible que ces améliorations soient en partie expliquées par le développement physiologique des nageurs lié à leur croissance.

	Avant	Après
$\dot{V}O_{2max}$ (L•min ⁻¹)	3,4 ± 0,7	3,6 ± 0,8*
$\dot{V}O_{2max}$ (mL•kg ⁻¹ •min ⁻¹)	55,0 ± 6,6	57,5 ± 7,0*
Déficit maximal d'oxygène (L)	3,06 ± 1,05	3,68 ± 1,18**
Economie de nage (L•min ⁻¹)	2,51 ± 0,46	2,53 ± 0,47
Coefficient de trainée	21,8 ± 5,1	21,9 ± 4,1
Puissance maximale (w)	118 ± 51	129 ± 50*
Temps sur 50 m (s)	26,60 ± 1,91	26,18 ± 1,75**

Tableau 14. Comparaison de $\dot{V}O_{2max}$, le déficit maximal d'oxygène, économie de nage, le coefficient de trainée, la puissance maximale et de la performance sur 50 mètres avant et après les 4 semaines d'entraînement à haute intensité. Les différences significatives indiquent : ** $P < 0,01$ * $P < 0,05$. (D'après Ogita, 2014). Ce tableau montre qu'après 4 semaines d'entraînement à haute intensité, la puissance métabolique et la puissance musculaire ont été améliorées. En revanche, aucun changement technique n'a été observé (économie de nage et coefficient de trainée).

En synthèse bien qu'il n'existe pas d'étude observationnelle qui ait documenté un entraînement fondé sur un volume important (environ 15%) réalisé à haute intensité, les études scientifiques qui ont expérimentalement testé l'entraînement à haute intensité associé à un volume réduit ont

montré des effets positifs sur l'amélioration des performances. Ces études ont souvent étudié ces changements sur des populations de nageurs de faible niveau. Notre travail consistera à investiguer les changements physiologiques et de performances sur des nageurs d'un niveau plus élevé et sur une période suffisamment longue.

3.2.3 La littérature technique

Pour ce qui concerne les informations techniques rapportées par des entraîneurs dans des congrès internationaux, il est observé des formes de distribution de l'intensité qui présentent des similarités avec celles présentées dans les études scientifiques. Toutefois, il semble nécessaire de distinguer les profils de nageurs en fonction de la distance de spécialité.

a) Les épreuves de demi-fond

L'analyse du contenu des séances du programme hebdomadaire, partagé par ces entraîneurs internationaux, révèle une proportion d'environ 60% d'entraînement en aérobie, 30% autour du seuil anaérobie et 10% au-dessus de la vitesse de nage supérieure à V4 (Maglischo, 2003). L'entraînement à sec est majoritairement composé de préparation physique générale bien que le développement de la force maximale et de l'explosivité soit de plus en plus développé depuis les années 2000 (Vergnoux, 2014).

b) Les épreuves mixtes

Les rapports des coaches dans les congrès ne précisent pas les quantifications en fonction de l'intensité. Toutefois, cette distribution peut être approchée en analysant le contenu des séances d'entraînement. Bowman (2008) déclare que Phelps a souvent inclus deux séances de développement du seuil par semaine, ce qui représente au moins 20% de son entraînement total. Dans les cahiers d'entraînement de la FFN, l'exemple de la quantification de la championne du Monde 2005 du 200 mètres est donnée en indiquant qu'elle a réalisé 2000 kilomètres au cours de sa saison avec 56, 37 et 7% dans les trois niveaux d'intensité. Une autre nageuse, championne d'Europe du 400 m nage libre qui a nagé 2400 kilomètres au cours de l'année 2008, a réalisé 36, 53 et 11% dans les trois niveaux d'intensités.

c) Les épreuves de sprint

Le volume de nage annuel de la sprinteuse Malia Metella médaillée de bronze aux Jeux Olympiques d'Athènes en 2004, a été légèrement inférieur aux nageuses de moyenne distance présentées avant (environ 1800 kilomètres par an), bien que les intensités réalisées aient été similaires 41, 54 et 5% dans les trois zones d'intensités (FFN). Cette évolution des répartitions

de l'entraînement dans l'eau a été accompagnée d'une augmentation de l'entraînement à sec atteignant environ 200 heures de musculation (force maximale et explosive et endurance de force) et 200 heures d'autres activités sportives aérobies comme la course à pied ou le VTT. Pour les nageurs de sprint récents, il existe peu de données précises sur la distribution de l'intensité à l'entraînement. Toutefois, Hawke (2010) entraîneur de Cesar Cielo, souligne que le volume maximal des séances est de 5,5 km composé d'une forte proportion d'intensité associée à un volume réalisé à allure aérobie à allure lente (3 séances par semaine). Récemment une autre forme d'entraînement a été associée aux résultats spectaculaires de Andrews (multiple recordman mondial juniors), définit par Rushall comme *Ultra Short Race Pace Training* que l'on peut traduire par « entraînement à allure de course sur de courts intervalles ». Ce modèle se base sur de nombreuses répétitions nagées à allure de course sur des distances courtes et des temps de récupération courts. Rushall (2015) argumente que ce type de travail préparatoire permet de réaliser un volume plus important à haute intensité.

	Aérobie	Haute intensité	Seuil
Etudes observationnelles	Mujika et al. (1995, 1996)	Olbrecht (2003)	Hellard et al. (2006) Avalos et al. (2003) Maglischo (2003)
Rapports d'entraîneurs		Barnier (2012) Rushall (2016) Hawke (2010)	Touretski (1998) Suguiyama (2012) Urbanek (2003)

Tableau 15. Résumé des types de distribution de l'intensité à l'entraînement des nageurs internationaux. (Communication personnelle).

Ce qu'il faut retenir :

Les rapports techniques et scientifiques mettent en évidence des types d'entraînement en natation différents et spécifiques aux nageurs de demi-fond, de moyenne distance et aux sprinters. Dans les dix dernières années, l'entraînement des nageurs de demi-fond (200-400 m) a été caractérisé par une distribution à prédominance aérobie (de 55 à 70%) et d'entraînement au seuil (de 30 à 40%). Chez les sprinters (nageurs de 50 et 100m) deux modèles sont distingués, un modèle basé sur une proportion conséquente d'entraînement aérobie et au seuil (environ 90% du temps total d'entraînement) et un modèle composé d'entraînement à haute intensité qui se rapproche de la distribution du modèle polarisé (volume en Z1 supérieur à 70% et volume en Z3 qui tend vers les 15%).

3.3 Le volume d'entraînement

En natation, le volume d'entraînement (exprimé en kilométrage) est le principal paramètre contrôlé par les entraîneurs. Les différents programmes de la Fédération Française de Natation préconisent une augmentation graduelle pour passer de 800 km annuels à l'âge de 12 ans à 2500 kilomètres à 20 ans.

De nombreuses communications d'entraîneurs internationaux ont permis de voir que l'augmentation du volume d'entraînement entraînait une amélioration des performances. Mireia Belmonte double médaillée d'argent sur 200 mètres papillon et 800 mètres nage libre aux Jeux Olympiques de Londres en 2012 (puis championne Olympique du 200 mètres papillon en 2016) a augmenté son volume d'entraînement de 3500 à 4500 kilomètres par an au cours de l'année Olympique (Vergnoux, 2014). De manière similaire, l'analyse de l'entraînement des nageurs Niçois ayant remporté 9 médailles aux Jeux Olympiques de Londres en 2012 a mis en évidence une augmentation du volume d'entraînement hebdomadaire de 10-12 kilomètres par jour pour la saison 2009-2010, à 12-14 kilomètres en 2010-2011 et à 14-16 kilomètres en 2011-2012.

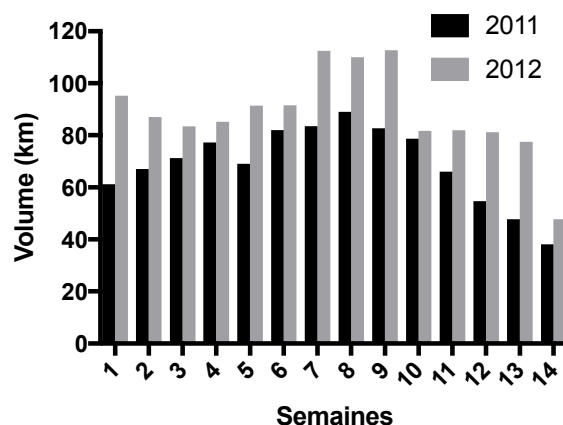


Figure 16. *Volume hebdomadaire réalisé par Mireia Belmonte durant les 14 dernières semaines précédant les championnats du monde 2011 et les Jeux Olympiques 2012. Le volume d'entraînement durant la saison Olympique a augmenté d'environ 30% par rapport à la saison précédente (D'après Vergnoux, 2014).*

Bien que la grande majorité des épreuves internationales de natation durent moins de 3 minutes (seules 8 épreuves sur 34 se courent sur 400 m ou plus), la plupart des entraîneurs de natation ont donc une stratégie d'augmentation du volume total d'entraînement, en élevant principalement le volume réalisé à basse intensité (Lang et Light, 2010).

Dans une étude observationnelle portant sur l'analyse de l'entraînement de 32 nageurs de haut niveau, Hellard et al. (2017) ont rapporté des données témoignant d'une association systématique entre la charge d'entraînement et les performances (excepté pour la période d'affûtage, voir ci-dessous).

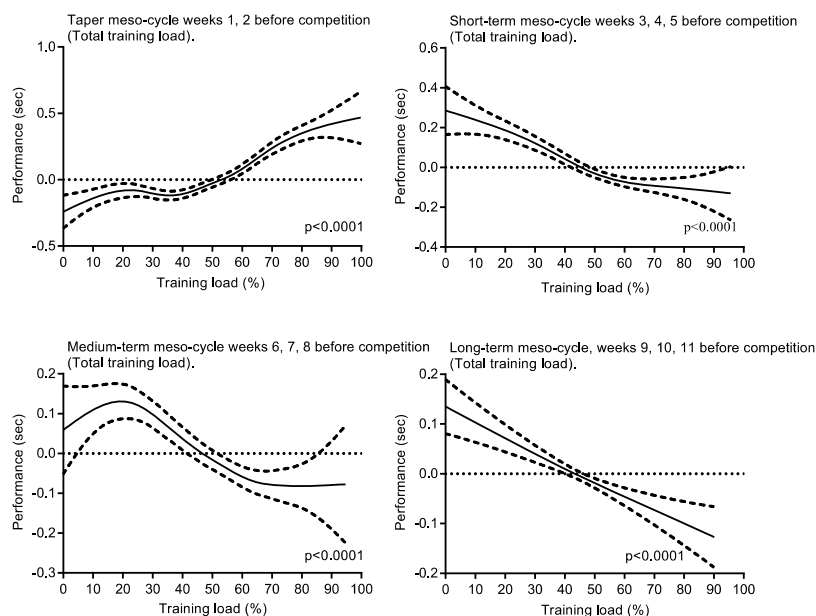


Figure 17. Amélioration ou détérioration relative de la performance en fonction de la charge totale d'entraînement (total training load) pour des nageurs de moyenne distance après l'affûtage, court-terme, moyen-terme et long-terme. (Hellard 2017)

Toutefois, il s'avère important de noter, que lors d'une des premières études expérimentales sur le sujet, Costill et al., (1991) concluaient déjà qu'il était « difficile de comprendre comment le fait de nager pendant 3 ou 4 heures par jour, à des vitesses bien inférieures à celles de compétition, pouvait préparer des nageurs à réaliser des efforts maximaux. Ensuite, plusieurs études ont débattu de la qualité versus la quantité des entraînements (Maglischo, 2003 ; Salo et Riewald, 2008 ; Nugent et al., 2017).

De nombreuses publications scientifiques confirment l'impact important d'une augmentation du volume d'entraînement au cours de la carrière des nageurs. Chez les sportifs en formation les périodes caractérisées par des sessions de longue durée et de faible intensité provoquent des profondes adaptations au sein des muscles squelettiques incluant une augmentation du contenu mitochondrial et de la capacité respiratoire des fibres musculaires (Holloszy et Coyle, 1984). Ces résultats ont été confirmés par une étude récente (Granata et al., 2016). Ces auteurs ont ajouté que les adaptations mitochondriales revenaient à leur statut de base, très rapidement après la baisse du volume d'entraînement.

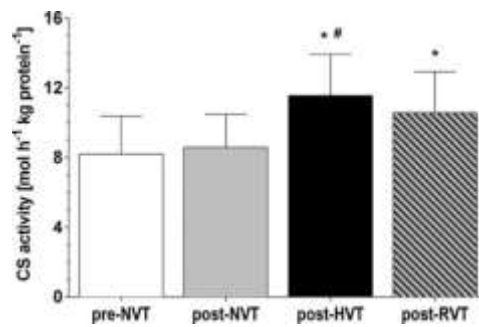


Figure 18. *Activité de l'activité de la citrate synthase. Son activité a été mesurée par des biopsies du vaste latéral au repos, avant l'intervention, après une période d'entraînement normal (NVT), après un haut volume d'entraînement (HVT) et après une période de volume réduit (RVT). On observe une augmentation significative de l'activité de la citrate synthase après l'entraînement à haut volume par rapport à la baseline et à la période d'entraînement normal. Après la période de volume réduit, il existe encore des différences significatives par rapport à la baseline (D'après Granata et al., 2016)*

L'augmentation du volume d'entraînement a également été conseillée par Greyson et al. (2010). Cet auteur suggère que le développement des capacités aérobies se produit principalement par la réalisation d'un haut volume d'entraînement, et demeure crucial pour le développement des adaptations physiologiques à long terme, comme proposé par Balyi et Hamilton (2004). Ces observations sont renforcées par les rapports d'entraîneurs qui indiquent que les médaillés olympiques ont suivi un entraînement à fort volume durant leurs jeunes années. Mais aucune étude longitudinale n'est venue confirmer ces suppositions et d'autres types de développement ont été proposés dans la littérature (Lloyd et Oliver, 2012).

En plus, il est essentiel de noter, que même si l'augmentation du volume d'entraînement génère des adaptations physiologiques importantes, la charge totale est à surveiller de près pour éviter le surmenage non fonctionnel voire le surentraînement (voir par ailleurs). Au-delà du haut risque de surentraînement, le haut volume d'entraînement peut causer des blessures ou maladies (Le Meur et al., 2013). Plusieurs études ont d'ailleurs montré que 45 à 87% des nageurs connaissaient des douleurs de l'épaule durant leur carrière (Pink et Tibone, 2000 ; Stocker et al., 1995 ; Beach et al., 1992).

3.4 La fréquence d'entraînement

Lorsque l'on observe les différents rapports d'entraîneurs dans les congrès internationaux, nous remarquons que les nageurs de haut-niveau s'entraînent entre 11 et 12 fois par semaine en moyenne. Il est fréquent qu'une demi-journée de récupération soit réalisée en milieu de semaine (souvent le mercredi après-midi). Enfin, pour la plupart des entraîneurs, le dimanche est un jour

de récupération. Toutefois, il est important de noter que de plus en plus d'entraîneurs optent pour une séance le dimanche. Fabrice Pellerin explique d'ailleurs la réussite de ses nageurs aux Jeux Olympiques de Londres (3 champions olympiques) par l'ajout d'une séance de natation le dimanche et donc des séances d'entraînement sept jours sur sept. Cette observation renforce l'idée que les nageurs ont besoin de nager tous les jours pour dépasser leurs limites. Toutefois, cette fréquence d'entraînement réduit la marge d'augmentation du volume d'entraînement. Les entraîneurs doivent trouver des solutions pour améliorer la qualité de l'entraînement pour obtenir une plus-value sur la performance. Un des objectifs de ce travail de thèse est de trouver des outils qui permettent d'optimiser cette qualité d'entraînement tout en régulant le volume d'entraînement.

3.5 La période d'affûtage

L'affûtage correspond à la période qui précède la compétition majeure de la saison. Il consiste, sur une période de quelques jours à plusieurs semaines, à diminuer le niveau de fatigue induit par l'entraînement sans diminuer la condition physique. Comme pour l'entraînement général, l'affûtage peut se caractériser par une charge d'entraînement totale moindre, en intensité, volume et fréquence des sessions.

Concernant la charge totale d'entraînement, Hellard et al. (2013) ont proposé un schéma consistant à mener une période de surcharge entre les 4 et 6 semaines précédant la compétition, puis de réaliser une diminution linéaire de la charge d'entraînement durant les trois dernières semaines d'affûtage.

Concernant la fréquence d'entraînement, Bosquet et al. (2007) ont décelé que diminuer le nombre de séances hebdomadaires ne permet pas de produire des gains de performance. Dans cette même méta-analyse, les auteurs ont indiqué que la durée optimale moyenne d'un affûtage se situe généralement entre 8 et 14 jours. Cette durée donnerait le meilleur compromis entre diminution de la fatigue et anticipation du risque de désentraînement. Toutefois, d'autres études rapportent que des effets bénéfiques peuvent être attendus jusqu'à 4 semaines. Bien entendu, cette durée dépend grandement de la charge d'entraînement réalisée avant la période d'affûtage (Thomas et Busso, 2005 ; Hellard et al., 2013).

Si la durée de l'affûtage semble importante, le volume semble être un des principaux composants de cette période pour espérer gagner en performance. Toujours dans la méta-analyse de Bosquet et al. (2007), les auteurs ont montré que la diminution du volume devait se

situer entre 40 et 60% par rapport à la période précédant l'affûtage. Cette réduction devant être accompagnée d'une réduction du temps des séances plutôt que de leur fréquence.

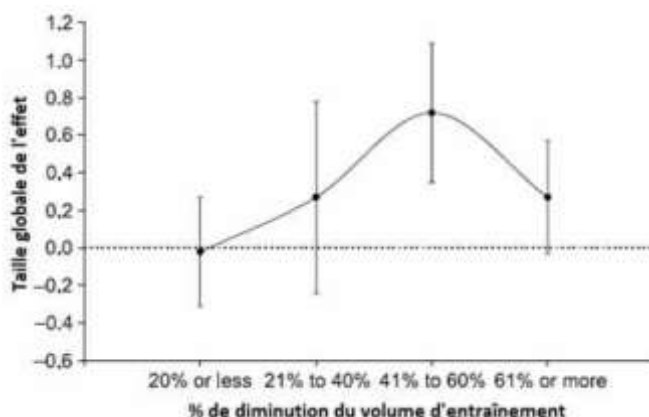


Figure 19. Courbe dose-réponse pour l'effet du pourcentage de diminution du volume d'entraînement sur la performance au cours de l'affûtage. La taille de l'effet était considérée comme faible ($< 0,2$), modéré ($0,2$ à $0,5$) ou grande ($> 0,5$). Les valeurs sont moyennées et les intervalles de confiance de 95%. (D'après Bosquet et al., 2007).

Ce qu'il faut retenir :

En résumé, il existe différentes manières de s'affûter pour mener à des gains en performance. Mujika et Padilla (2003) ont décrit plusieurs sortes d'affûtage. La réduction de la charge peut être linéaire ou exponentielle. L'affûtage linéaire implique une charge plus importante, même si l'affûtage exponentiel peut être plus ou moins rapide.

3.6 Individualisation de l'entraînement

Le volume, l'intensité et la fréquence de l'entraînement déterminent la charge imposée au nageur. L'interaction de ces trois facteurs aura une influence sur la charge totale d'entraînement. Toutefois, chaque individu est différent et ne connaîtra pas les mêmes adaptations physiologiques. C'est pourquoi, l'entraînement doit être adapté en conséquence pour chaque nageur. La dose d'entraînement peut être vécue de manière très différente, selon l'organisme de chacun. De nombreuses études mettent en évidence qu'une même charge d'entraînement peut mener à des états d'adaptation bien distincts : développement des capacités physiologiques pour certains, état de fatigue chronique pour d'autres. A ce titre, les réponses adaptatives à l'entraînement sont contrôlées par différents marqueurs biologiques.

4. Les différents modèles d'entraînement dans les autres disciplines

Le développement des capacités physiologiques implique la manipulation de l'intensité, du volume et de la fréquence des séances d'entraînement. Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les diverses méthodes d'entraînement utilisées par les meilleurs nageurs internationaux et les variables physiologiques améliorées dans les différentes études expérimentales de natation. A présent, il est intéressant d'observer les grands principes d'entraînement utilisés dans les autres disciplines, afin d'y trouver des pistes d'amélioration pour la natation.

Dans les sports d'endurance, on remarque quatre types de distributions de l'intensité à l'entraînement (Stoggl et Sperlich, 2014) ;

(1) l'approche pyramidale, avec un volume décroissant de la zone 1 à la zone 3 (Seiler, 2010) : il consiste à réaliser une majeure partie du volume d'entraînement à basse intensité (environ 80%), le reste étant effectué en zone 2 et 3 (avec une part supérieure en zone 2) ;

(2) le modèle polarisé consiste à s'entraîner majoritairement en zone 1 (environ 80%), avec une importante partie réalisée à haute intensité (environ 15% en zone 3), et donc très peu de travail en zone 2 (Seiler, 2010) ;

(3) le modèle à haut volume et basse intensité ; qui comprend une très large partie de l'entraînement réalisé à basse intensité (> 90% en zone 1) et le reste dans les autres zones (moins de 5% chacune).

(4) l'entraînement au seuil ; qui consiste à s'entraîner davantage en zone 2 (environ 20%) (Seiler, 2010).

Le modèle pyramidal est adopté par la majorité des athlètes de haut niveau en course à pied (demi-fond) (Stoggl et Sperlich, 2015), alors que le modèle polarisé semble davantage adopté par les sportifs d'endurance comme le ski de fond ou l'aviron (Seiler et Tonnessen, 2009). Cependant, certains rapports d'entraîneurs indiquent que des marathoniens, incluant des recordmen du monde, adoptent un entraînement au seuil (Arcelli et Canova, 1999).

Dans ce chapitre, il sera alors essentiel de comprendre les mécanismes physiologiques en jeu, selon le modèle d'entraînement réalisé, et de trouver des perspectives d'évolution, applicables pour l'entraînement en natation.

4.1 Le modèle pyramidal

Le modèle pyramidal est défini par une décroissance du volume d'exercice quand l'intensité augmente. Les sportifs réalisent une majeure partie de l'entraînement à intensité basse, une partie relative à intensité modérée et à une part faible à haute intensité (Stoggl et Sperlich, 2015).

Ce schéma est largement utilisé dans les disciplines d'endurance : en course à pied (Esteve-Lanao et al., 2005 ; Tjelta et Enoksen, 2010 ; Enoksen et al., 2011), cyclisme (Lucia et al., 1998 ; Schumacher et Mueller, 2002 ; Zapico et al., 2007 ; triathlon (Neal et al., 2011).

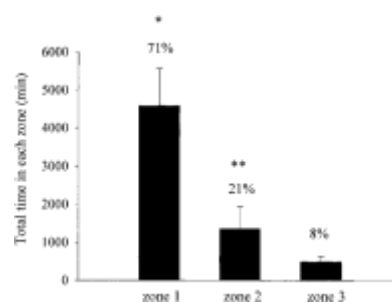


Figure 20. Présentation d'un exemple de distribution de l'intensité selon un modèle pyramidal pour des athlètes bien entraînés (D'après Esteve-Lanao et al., 2005).

Au niveau expérimental, plusieurs études sont venues confirmer l'efficacité de cette méthode, en montrant une amélioration des adaptations physiologiques entraînant des gains en performance après avoir suivi un entraînement de type pyramidal (Zapico et al., 2007 ; Esteve-Lanao et al., 2005, 2007). Toutefois, Costill (1991) a montré qu'une forte augmentation du volume à basse intensité n'induisait pas d'améliorations significatives sur la performance en natation. Une autre étude a également souligné qu'un trop haut volume d'entraînement à basse intensité pouvait altérer les états de l'humeur (Raglin, 1993). Il semble donc important de distribuer l'intensité de manière optimale, en évitant le surmenage non fonctionnel (Finkerstrand et Seiler, 2004).

Ce qu'il faut retenir :

Le modèle pyramidal se construit essentiellement sur un haut volume à basse intensité, puis à une forte décroissance du volume au fur et à mesure que l'intensité augmente. Il est largement utilisé dans les sports d'endurance et se distingue du modèle polarisé par une part d'entraînement à haute intensité beaucoup plus faible.

4.2 Le modèle polarisé

Ce modèle a été proposé à la suite d'études expérimentales et d'observations de rapports d'entraîneurs de sportifs de haut niveau.

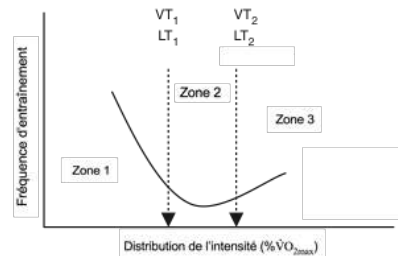


Figure 21. Concept de l'entraînement dit «polarisé» qui vise à réaliser une majeure partie de l'entraînement sous le premier seuil ventilatoire, associée à une part importante réalisée au-dessus du deuxième seuil ventilatoire, dit lactique. (Seiler, 2006).

En 1991, Robinson et al. ont étudié les caractéristiques de l'entraînement préparatoire de 13 coureurs de niveau national spécialistes de distances s'étendant du 1500 m au marathon. La plus grande quantité de l'entraînement était réalisée à une intensité correspondant à 65% de la consommation maximale d'oxygène. Uniquement 4% de l'entraînement étaient consacrés à l'entraînement par intervalle.

Billat et al. (2001), en analysant le contenu de l'entraînement de marathonniens de haut niveau durant les 12 semaines précédant les qualifications olympiques ont observé que ces derniers avaient réalisé 78% de leur entraînement en dessous de leur vitesse moyenne au marathon (Z1), 4% à la vitesse du marathon (Z2) et 18% à une vitesse équivalente à celles enregistrées sur 10000 ou 3000 m (Z3). La même équipe (Billat et al., 2003) a rapporté des résultats proches sur les caractéristiques de l'entraînement des coureurs de demi-fond Kenyans.

Dans un protocole randomisé croisé, séparé par 4 semaines de repos, Neal et al., (2013) ont étudié 12 cyclistes bien entraînés réalisant deux périodes d'entraînement de six semaines. Un premier groupe s'entraînait selon un modèle polarisé de six heures d'entraînement par semaine comprenant 80, 0 ou 20% de l'entraînement dans les zones 1, 2 et 3 respectivement. L'autre groupe suivait un modèle d'entraînement au seuil de 7 heures d'entraînement constitué de 57, 43 et 0% dans les trois zones d'intensité respectives. Malgré un volume d'entraînement moins important, les améliorations ont été plus élevées à la suite de l'entraînement polarisé comparativement à l'entraînement au seuil pour le pic de puissance ($8 \pm 2\%$ versus $3 \pm 1\%$), et le seuil lactique ($9 \pm 3\%$ versus $2 \pm 4\%$) (Tableau 16).

Cependant l'analyse de l'activité enzymatique musculaire a suggéré que les améliorations des performances étaient indépendantes de différences détectables de la capacité oxydative mitochondriale ou du transport et de l'oxydation du lactate. De plus des analyses métabolomiques ont révélé que certains marqueurs du stress cellulaire avaient été modifiés avec l'entraînement au seuil mais pas au cours de l'entraînement polarisé. Avec ces résultats, les auteurs ont supposé que le modèle au seuil induit un stress métabolique plus important. Ce stress n'a pas été associé à des adaptations physiologiques positives et il est probable que la récupération après un entraînement au seuil demande beaucoup de temps.

Modèle d'entraînement	Mesure	%	Taille d'effet	Amplitude
Polarisé	40 kilomètres	8 ± 8	0,57	Modéré
	Seuil lactique	9 ± 9	0,59	Modéré
	Puissance au seuil lactique	6 ± 10	0,40	Petit
	Puissance pic	8 ± 5	0,77	Modéré
	95% de la capacité d'exercice	85 ± 43	2,44	Grande
Seuil	40 kilomètres	4 ± 6	0,35	Petit
	Seuil lactique	2 ± 14	0,11	Trivial
	Puissance au seuil lactique	4 ± 7	0,34	Petit
	Puissance pic	3 ± 4	0,26	Petit
	95% de la capacité d'exercice	37 ± 45	0,99	Grande

Tableau 16. Valeurs moyennes ± écart-type des changements (exprimés en pourcentages) et tailles d'effets sur la performance et les adaptations physiologiques après 6 semaines d'entraînement polarisé ou au seuil (Neal et al., 2013).

Des publications rapportent l'efficacité du modèle polarisé chez les skieurs de fonds (Seiler et Kjerland, 2006), les rameurs (Steinacker et al., 1998), les cyclistes (Schumacher et Mueller, 2002), les coureurs à pied (Esteve-Lanao, 2005) et les triathlètes (Mujika, 2009). Au niveau expérimental, Stoggl et Sperlich ont confirmé ces effets positifs, où le modèle polarisé était celui où les améliorations de $\dot{V}O_{2pic}$ et de V_4 étaient les plus importantes, comparativement aux modèles au seuil, pyramidal et à haut volume.

Ce qu'il faut retenir :

L'entraînement polarisé a pour but de maximiser les adaptations physiologiques et les gains en performance en associant un fort volume aérobie et une part importante de travail à haute intensité. Ce modèle n'a jamais été rapporté dans la littérature technique en natation. Aucune étude expérimentale n'a investigué les effets physiologiques et de performance à l'issue de ce type d'entraînement chez des nageurs. Notre travail consistera à explorer les voies possibles d'amélioration de performance en utilisant ce type d'entraînement.

4.3 Le modèle à haut volume

Le modèle à haut volume se rapproche du modèle polarisé du fait de son haut volume réalisé à basse intensité. Mais il s'en distingue puisque très peu de travail est réalisé en zone 3, contrairement au modèle polarisé, où le travail à haute intensité avoisine les 15%.

Steinacker et al., 1998 ont rapporté que l'entraînement en endurance d'une intensité inférieure à $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ de lactate sanguin représentait la plus grande part de l'entraînement des rameurs Allemands (90% et plus).

Guellich et al., 2009 ont décrit l'entraînement de 31 rameurs juniors de niveau mondial durant 37 semaines (du début de la saison jusqu'aux championnats nationaux). Sous contrôle de la fréquence cardiaque, 95% de l'entraînement était réalisé en zone 1, 2% de l'entraînement en zone 2, et 3% en zone 3. A l'approche de la compétition, la structure de l'entraînement est devenue plus polarisée.

Cette observation nous laisse penser que le travail à haute intensité semble nécessaire pour conduire à l'amélioration de la performance. Un pourcentage suffisant (mais qui reste à déterminer selon les disciplines et la durée des épreuves) réalisé à allures de courses facilite les adaptations techniques tout en développant les capacités physiologiques.

Ingham et al., 2008 ont randomisé durant 12 semaines un groupe de 18 rameurs bien entraînés de niveau national en 2 groupes. Les deux groupes ont réalisé un volume d'entraînement identique à 1140 km. Le premier groupe a réalisé 100% de l'entraînement en zone 1 alors que le second groupe a réalisé 70% en zone 1 et 30% en zone 2. Les gains en performance ont été légèrement supérieurs pour le premier groupe (+2,0% *vs* +1,4%) Comparativement au deuxième groupe, le premier groupe a amélioré sa puissance au seuil lactique ($23,5 \pm 12,2$ *versus* $5,1 \pm 5,0$ watts) et sa puissance à une concentration d'acide lactique de $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($32,3 \pm 6,9$ *versus* $13,1 \pm 3,7$ watts) même si le pic de $\dot{V}\text{O}_2$ bénéficie d'une augmentation similaire dans les deux groupes.

Ce qu'il faut retenir :

L'entraînement à haut volume est souvent utilisé en début de saison par les sportifs de haut niveau. Malgré l'absence d'intensité moyenne ou sévère, l'entraînement aérobie (zone 1) induit des adaptations physiologiques importantes. En natation, il est courant d'observer ce type d'entraînement lors du début de la saison ou lors de cycles de récupération.

4.4 Le modèle au seuil

Ce modèle a pris de l'ampleur chez certains sportifs, après la publication de plusieurs articles scientifiques démontrant l'efficacité de l'entraînement lorsque la part réalisée proche du seuil anaérobie était augmentée (Kindermann et al., 1979 ; Denis et al., 1984, Londeree, 1997 ; Gaskill et al., 2001).

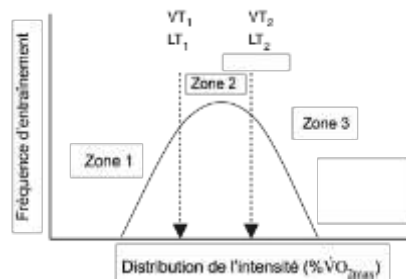


Figure 22. Concept de l'entraînement dit « au seuil » qui vise à réaliser une majeure partie de l'entraînement entre le premier et le deuxième seuil ventilatoire (VT_1 et VT_2) ou lactique (LT_1 et LT_2). (Seiler, 2006). Ce type d'entraînement a pour but de développer la vitesse associée au seuil lactique.

Ce schéma semble être adopté par les sportifs d'ultra-endurance. Plusieurs études de cas ont rapporté des distributions de l'intensité avec au moins 25% de travail réalisé en zone 2 (Arcelli et Canova, 1999 ; Pugliese et al., 2014 ; Manunzio et al., 2016).

Laursen et al. (1999) a suggéré que pour les épreuves d'ultra-endurance, l'intensité de course oscillait entre 70 et 85% de $\dot{V}O_{2max}$, avec une intensité moyenne autour de 80%. Cette intensité de course semble se rapprocher de l'intensité de zone 2 (Manunzio et al., 2016).

Une étude d'Evertsen et al. (2001) a montré que réaliser un travail à une intensité associée à des lactatémies autour de 3-4 mmol•L⁻¹ permettait d'améliorer sa vitesse au seuil lactique, comparativement à un travail réalisé à basse intensité.

Mais à l'inverse, deux études expérimentales ont montré qu'une quantité importante de travail au seuil pouvait être inefficace voir contre-productive. Esteve-Lanao et al. (2007) ont montré qu'un entraînement trop important en zone 2 (20%) induisait une performance moins bonne comparativement à un entraînement réalisé majoritairement en zone 1 (82% en zone 1 et 10% en zone 2).

Guellich et Seiler (2010) ont étudié des cyclistes de haut niveau, après une période de 15 semaines d'entraînement. Les cyclistes ayant détérioré leur performance s'étaient entraînés deux fois plus en zone 2, par rapport à ceux ayant amélioré leur performance (244 vs 442 km).

Ce qu'il faut retenir :

Ce type d'entraînement est souvent utilisé par les sportifs d'ultra-endurance. Toutefois, le travail réalisé en zone 2 pourrait affecter négativement le système nerveux autonome et le système endocrinien (Kenneally et al., 2017). Seuls les meilleurs athlètes mondiaux bénéficiant de capacités physiologiques hors-normes semblent pouvoir soutenir un tel effort et sont susceptibles de mieux récupérer après des séances au seuil. En natation, culturellement, un bon nombre d'entraîneurs apprécie prescrire de telles séances afin d'améliorer le seuil lactique. Il est possible que le milieu aquatique, la position couchée du corps soient des éléments qui permettent au nageur de mieux réagir face à ce genre d'activités. Notre travail de thèse consistera à investiguer en quoi l'entraînement au seuil peut être bénéfique en natation. Des outils de suivi de la charge d'entraînement et de l'état de forme devront nous permettre d'observer les effets produits sur la performance et la fatigue.

4.5 Apports et limites de l'entraînement polarisé pour la natation

L'hypothèse principale permettant d'expliquer l'efficacité en natation d'une méthode d'entraînement orientée autour du seuil est le niveau élevé d'efficacité motrice dans cette zone d'intensité. En effet, l'analyse de 7655 séries d'entraînement pour 123 nageurs a mis en évidence que la distance par cycle et l'indice de nage (vitesse x amplitude), deux indices importants de l'efficacité, étaient beaucoup plus élevés dans la zone du seuil anaérobie comparativement aux zones aérobie, mixte et lactique.

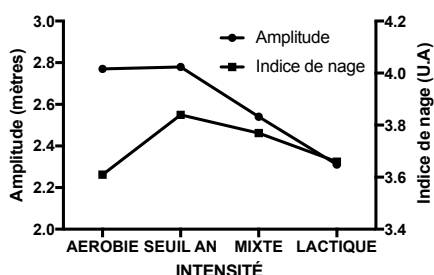


Figure 23. Evolution de la distance par cycle et de l'indice de nage dans les 4 zones d'intensité. Modélisation réalisée à partir de l'analyse de 7655 séries pour 123 nageurs. On observe que l'efficacité maximale est réalisée dans la zone du seuil anaérobie ou lactique. (Données rapportées par Hellard et Demarle, 2014)

De plus il est couramment observé au cours des tests incrémentaux que le coût énergétique est plus faible à des vitesses correspondantes au seuil lactique (fréquences gestuelles équivalentes, concentrations de lactate sanguin et consommation d'oxygène plus basses) qu'à des vitesses plus lentes correspondant à des zones aérobies. Il est probable que des modes de coordination en rattrapé comprenant de longs temps d'arrêt conduisent à d'importantes variations de vitesse

intra-cyclique et par conséquent à une augmentation du coût énergétique (Villas-Boas et al., 2009). Pour ces raisons, une intensité trop basse peut être néfaste sur le développement de la technique de nage tout en induisant une augmentation du coût énergétique inadaptée.

Dans les zones d'intensités élevées, mixtes et lactiques, la fatigue musculaire et l'augmentation des résistances à l'avancement avec la vitesse conduisent aussi à d'importantes dégradations de la technique de nage et par conséquent à une augmentation du coût énergétique. Au contraire, dans une discipline comme l'athlétisme il a été montré une grande stabilité du coût énergétique aux différentes allures de courses (Helgerud et al., 2010).

Ce qu'il faut retenir :

L'organisation de l'entraînement s'éloigne plus ou moins du schéma polarisé (80, 5, 15%) en fonction des disciplines sportives et des distances compétitives. Pour des épreuves compétitives d'environ 4 minutes les proportions d'entraînement au cours d'études observationnelles dans les trois zones pour des athlètes Internationaux ont été différentes selon les sports. Des proportions de 95, 2, 3% pour des rameurs ; 72, 7, 21% pour des skieurs de fond et 70, 20, 10% pour des cyclistes ont été rapportées dans des études de cas.

La recherche de la meilleure efficacité et d'une grande adaptabilité aux modifications permanentes des conditions de course sont aussi des constantes de l'entraînement à haut niveau. Les études expérimentales confirment la plus grande efficacité d'un entraînement à volume élevé à basse intensité associé à une proportion modérée d'entraînement à haute intensité. Dans ce modèle l'entraînement au seuil anaérobie ne dépasse pas 10-15%. Les schémas observés en natation ces 15 dernières années ne sont pas en accord avec ce modèle et sont plus orientés autour d'une planification équilibrée (45, 45, 10%).

L'efficacité de nage importante réalisée par les nageurs autour du seuil lactique est l'hypothèse principale permettant d'expliquer cette orientation de l'entraînement. En course à pied, à l'inverse de la natation - l'efficacité locomotrice semble être relativement stable à toutes les allures de course.

Cependant l'analyse de l'entraînement des nageurs sprinters Américains et Australiens et de certaines structures Françaises montre très récemment une orientation plus polarisée qui laisse entrevoir peut-être une voie possible de développement de l'entraînement en natation.

5. Les réponses à l'entraînement : entre fatigue et adaptations biologiques

La fatigue peut être définie comme « une réduction induite par l'exercice de la capacité du muscle à produire une force ou une puissance, que la tâche puisse être maintenue ou non » (Barry et Enoka, 2007). Elle peut se différencier par deux types d'origine (centrale ou périphérique) et par son niveau (aigüe ou chronique). La fatigue est donc multifactorielle et dépendante de la tâche à réaliser, c'est pourquoi elle demeure difficile à évaluer et les outils de son évaluation doivent être appropriés.

L'entraînement se construit autour d'un équilibre entre la fatigue générée par la charge d'entraînement et les adaptations physiologiques qu'il vise à induire. L'évaluation de la fatigue est donc prépondérante pour ajuster au mieux les charges d'entraînement.

5.1 Mécanismes généraux de l'adaptation

L'entraînement met en œuvre une des facultés fondamentales du corps humain : l'adaptation de court et moyen terme (Weineck, 1992).

Le modèle homéostatique

Lorsque l'on se réfère à l'entraînement, les théories de l'adaptation reposent en grande partie sur le modèle homéostatique (Kuipers et Keizer, 1988 ; Viru, 1984 ; Harré, 1973). L'homéostasie est le processus de régulation par lequel l'organisme maintient les différentes constantes du milieu intérieur entre les limites des valeurs normales (Larousse).

Lorsque le sportif s'entraîne, il rencontre des contraintes supérieures à ce qu'il connaît habituellement. L'organisme doit donc préserver la stabilité de son fonctionnement interne ; il met en œuvre des processus de compensation et de régulation qui conduiront à une transformation de l'organisme dans un cadre contraint par les limites de l'homéostasie.

Ces contraintes engendrent un déséquilibre au sein des cellules et des organes qui se traduit notamment par l'installation d'une fatigue. Après une période de récupération, l'homéostasie est rétablie, une régénération se produit et se matérialise par un renforcement des processus biologiques, en particulier énergétiques (Harré, 1973 ; Viru, 1984).

Les conditions de l'adaptation

Pour induire des adaptations de l'organisme après l'entraînement, plusieurs conditions sont requises pour que le corps s'adapte et se transforme. De nombreux facteurs participent à la mise en place des processus adaptatifs ou les contrarient. Ces derniers sont perturbés quand de trop nombreux facteurs de stress dépassent les capacités individuelles (Selye, 1956). Dans le domaine de l'entraînement, l'élévation trop forte ou trop brutale de la charge, le manque de récupération ou de sommeil, une mauvaise nutrition, des compétitions trop fréquentes ou les blessures peuvent affecter leur mise en place (Costill, 1986 ; Kindermann, 1986). Toutefois, si ces paramètres sont bien pris en compte, et que l'entraînement est bien géré, en cohérence avec la charge externe du sportif, les mécanismes d'adaptation peuvent s'installer.

Les mécanismes de l'adaptation

L'entraînement résulte en une grande variété de changements individuels, incorporant des variations de la forme du corps (hypertrophie musculaire, réduction de la masse grasse...), les capacités respiratoires et cardiovasculaires (Viru et Smirnova, 1995). Il existe également des changements des processus métaboliques, des structures cellulaires, aussi bien que des systèmes moléculaires, génétiques, hormonaux et nerveux. Ces effets ne se limitent pas à l'augmentation de la performance, mais ils sont aussi importants pour la construction de la résistance contre les facteurs pathologiques (Viru et Smirnova, 1995).

Amélioration de la régulation et du fonctionnement du système nerveux central
Amélioration de la capacité des systèmes endocriniens et de la sensibilité hormonale
Augmentation du potentiel d'énergie de l'organisme
Augmentation de la capacité de transport de l'oxygène
Amélioration des processus d'oxydation
Amélioration de l'économie métabolique et fonctionnelle
Amélioration de l'équilibre
Augmentation du fonctionnement et du nombre de pompes à Sodium et Potassium
Amélioration de l'activité immunitaire

Tableau 17. *Réponses physiologiques à l'entraînement physique et augmentation des processus adaptatifs (d'après Viru et Smirnova, 1995).*

Les effets musculaires de l'entraînement se produisent notamment par l'intermédiaire de la synthèse des protéines, qui servent de support au développement des organes et des métabolites sollicités par l'exercice physique (Viru, 1984 ; Booth, 1991 ; Mader, 1988). Après l'exercice, le nombre de molécules protéiques synthétisées augmentent. Elles remplacent ou complètent les structures cellulaires altérées par l'exercice, puis sont dégradées dans les structures cellulaires dédiées (Mader, 1988 ; Viru, 1992).

5.2 Adaptation et fatigue du système neuromusculaire

Au cours d'un effort, la diminution de la capacité à produire une force est due à différents processus physiologiques. L'origine de cette force, et du mouvement qui en résulte, provient d'un message nerveux émis par le Système Nerveux Central (SNC). Le message est transmis sous forme de potentiels d'actions neuronaux aux motoneurones. Ces derniers innervent les unités motrices au niveau de la jonction neuromusculaire. Ensuite, le potentiel d'action se propage et enclenche la contraction. La production de force est diminuée lorsque n'importe quel point de la chaîne de commande est affaibli.

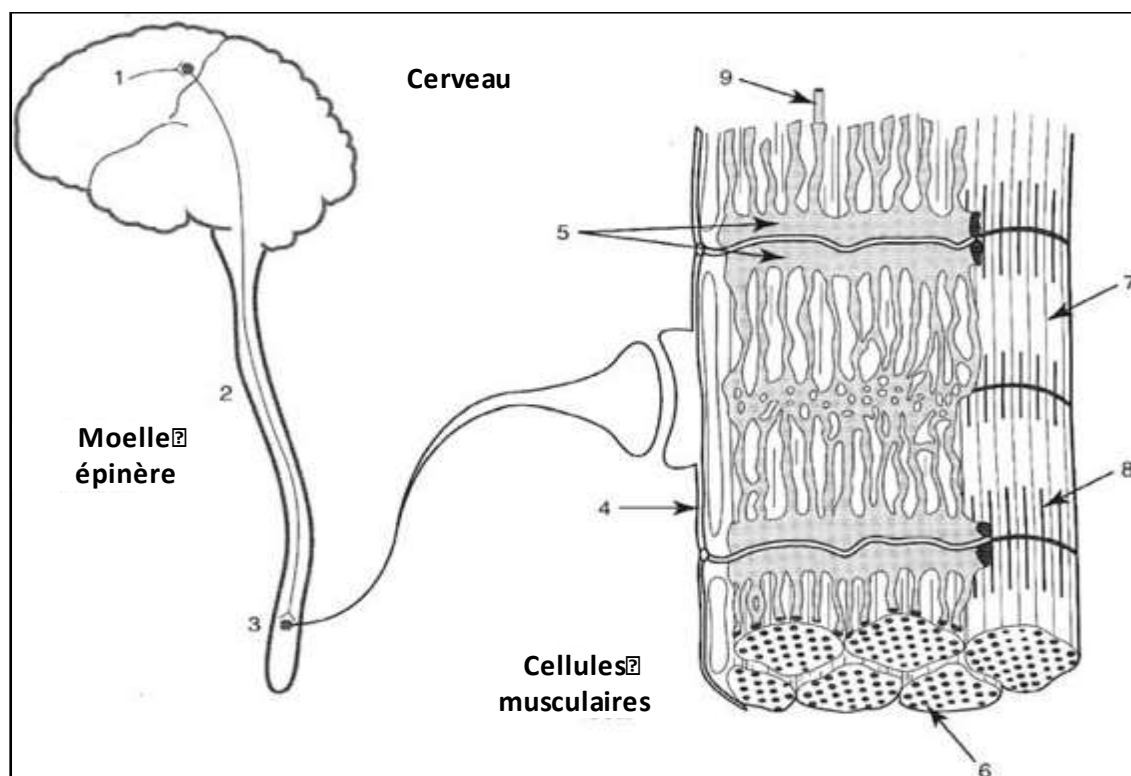


Figure 24. Sites qui peuvent contribuer à une fatigue neuromusculaire. La fatigue peut survenir au niveau de : 1 l'activation de l'aire primaire du cortex moteur ; 2 du cheminement de la commande du système nerveux central vers les motoneurones ; 3 l'activation des unités motrices et des muscles ; 4 la propagation neuromusculaire ; 5 le couplage excitation-contraction ; 6 la disponibilité des substrats métaboliques ; 7 du milieu intracellulaire ; 8 de l'appareil contractile ; 9 du flux sanguin (d'après Bigland-Ritchie, 1981).

Parmi tous les sites potentiels d'apparition de fatigue, nous pouvons relever deux types de localisation : les sites centraux (1 à 3 sur la figure 24) et les sites périphériques (4 à 9 sur la figure 24). La fatigue centrale se réalise en amont de la jonction neuromusculaire, alors que la fatigue périphérique se situe en aval de la jonction neuromusculaire.

La fatigue centrale

Elle peut trouver son origine au niveau spinal par un déclin de l'activité motoneuronale et/ou et au niveau supraspinal par une défaillance du cortex moteur (Gandevia, 2001) et se définit comme une baisse de l'activation neuronale. Au cours d'un effort, la capacité à activer volontairement le muscle (commande centrale) peut être diminuée à cause de la dégradation de l'excitation fournie par le cortex moteur (Gandevia, 1998 ; Taylor et al., 2006).

La fatigue supraspinale peut provenir d'un manque de motivation ou une altération des ordres moteurs venant du système nerveux central. Dans ce cas, toutes les unités motrices ne sont pas recrutées et la force n'est alors pas maximale. De plus, cette fatigue supraspinale peut également tirer son origine par une modification de la quantité de certains neurotransmetteurs comme la sérotonine, la dopamine, la noradrénaline et l'adrénaline. Ces substances sont libérées par les neurones cérébraux et permettent la création de mouvement (Meeusen et al., 2009). La fatigue spinale traduit une moindre excitabilité motoneurale qui s'explique par des changements au niveau des feedbacks sensoriels provenant du muscle qui provoquent des inhibitions pré-synaptiques.

La fatigue périphérique

La fatigue périphérique se situe après la jonction neuromusculaire et elle correspond donc à une diminution de la force produite dans les muscles. Elle peut provenir des altérations de l'excitation musculaire, jusqu'au niveau de formation des ponts d'actine et de myosine (Fitts, 1994). Elle correspond à une diminution de la capacité de travail du muscle à cause des altérations des mouvements ioniques Na^+ intra et K^+ extra-cellulaires, qui ne sont plus suffisamment régulés par les pompes sodium-potassium (Fowles et al., 2002). Cette fatigue provient également de l'accumulation de métabolites qui diminuent l'activité des ponts d'actine-myosine (Allen et al., 2008). Evidemment, la diminution des substrats énergétiques accélérera le processus de fatigue.

Le type de fatigue rencontrée est fortement dépendant de la nature de l'exercice (Enoka et al., 1992). Ces auteurs ont montré que la fatigue centrale prédomine lorsqu'il s'agit d'exercices continus et prolongés, et d'autant plus que l'intensité de contraction est faible.

5.3 Adaptation et fatigue du système nerveux autonome

Le système nerveux autonome

Le système nerveux autonome (SNA) est la partie du système nerveux central qui régule les fonctions autonomes de l'organisme. Il est impliqué dans certains mécanismes automatiques comme la digestion, la respiration, le rythme cardiaque. Il permet d'assurer l'homéostasie de ces appareils. Il se décompose en deux branches principales : le système orthosympathique et le système parasympathique. Ces deux branches contrôlent des actions souvent antagonistes.

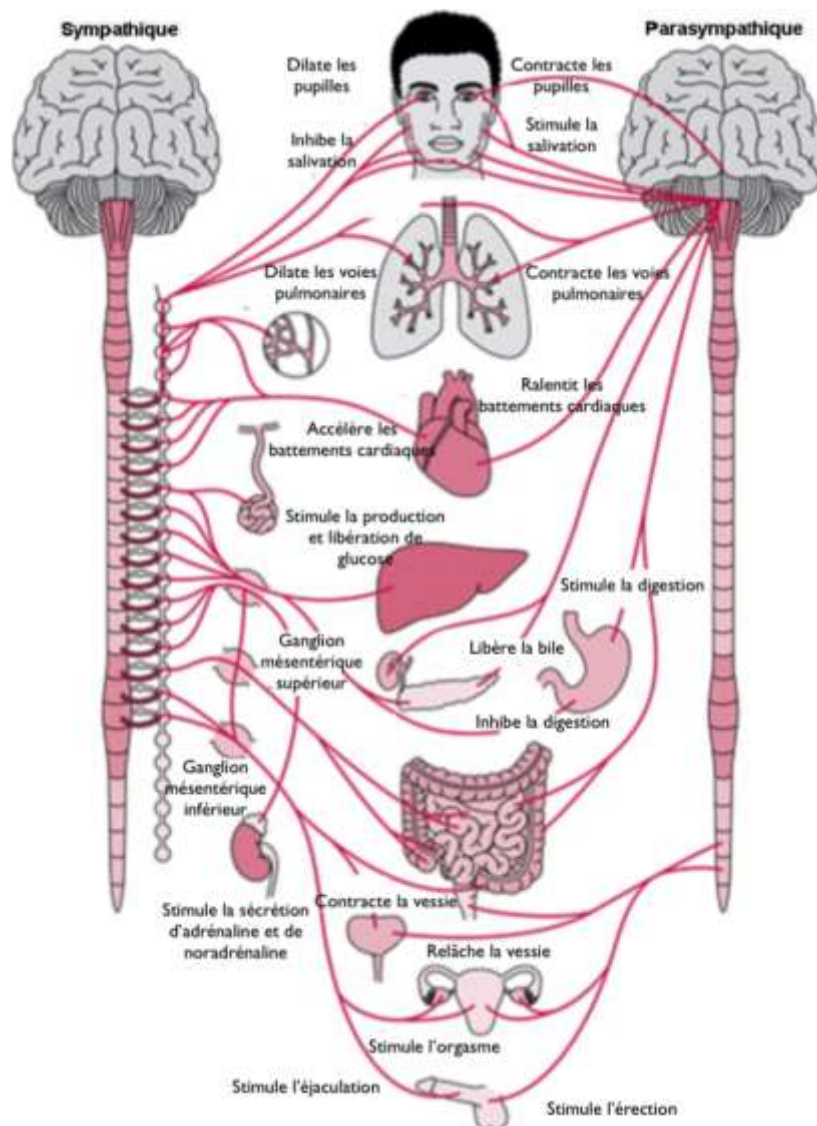


Figure 25. Représentation schématique de l'organisation générale de l'innervation végétative des systèmes orthosympathiques et parasympathiques (D'après Neal, 2002). Le système nerveux autonome présente de nombreux effets et actions sur le système cardiovasculaire.

Parmi toutes ses actions, le système parasympathique active le restockage des réserves d'énergie dans l'organisme et participe à la reconstruction cellulaire. Par l'intermédiaire du nerf vague, il diminue les fréquences cardiaque et respiratoire.

A l'inverse, le système orthosympathique est la branche stimulante du SNA. Il dirige le catabolisme pour préparer à l'action soudaine, est responsable de la dégradation des substrats énergétiques afin de produire de l'énergie, accélère la fréquence cardiaque et régule les résistances vasculaires périphériques en relation avec la tension artérielle (voir Figure 25).

Les adaptations du système nerveux autonome au cours de l'exercice

La première réponse du SNA lors de l'exercice est une tachycardie ou élévation du rythme cardiaque. Elle est due à une décroissance du tonus basal parasympathique suivie d'une augmentation de l'activité orthosympathique (Hainsworth, 1998 ; Aubert et al., 2003). Par leurs effets modulateurs sur les centres bulbaires orthosympathiques et parasympathiques, d'autres facteurs comme la position du corps (allongé/debout) (Mangin et al., 2001), l'environnement par la température (Matsumoto et al., 1999), l'humidité ou l'altitude (Bernardi et al., 1998), l'humeur (Mc Craty et al., 1995) ou le statut hormonal (Mc Cole et al., 2000) modulent également les paramètres vitaux tels que la fréquence cardiaque.

Sur des tests incrémentaux, les indices globaux de VFC (variabilité de la fréquence cardiaque) diminuent avec l'augmentation de l'intensité (Perini et al., 1990 ; Breuer et al., 1993). En natation, Di Michele et al. (2012) ont montré qu'il était possible de déterminer le seuil anaérobie en utilisant la mesure de VFC durant un test incrémental.

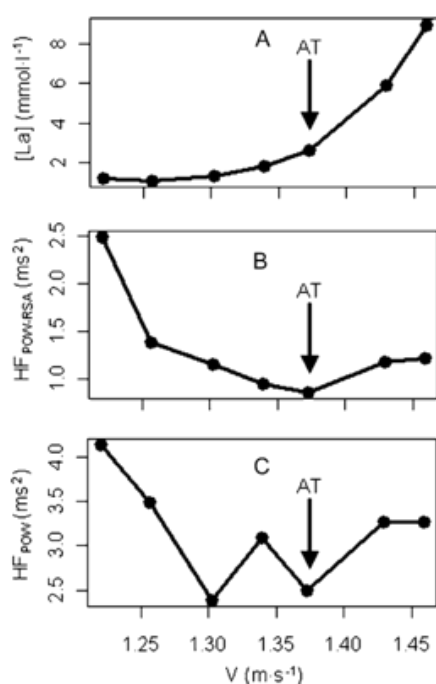


Figure 26. Détermination du seuil anaérobie (AT) sur un nageur lors d'un test incrémenté en 7 paliers en utilisant la lactatémie, la fraction de hautes fréquences relative à l'arythmie sinusale respiratoire, et la puissance spectrale HF. On observe une augmentation subite de la lactatémie (La), de $\text{HF}_{\text{POW-RSA}}$ et de HF_{POW} au cours du palier 5 traduisant l'apparition du seuil anaérobie (D'après Di Michele et al., 2012).

Les adaptations du système nerveux autonome à l'entraînement

L'entraînement induit des adaptations cardiovasculaires. A long terme, il permet notamment le ralentissement du rythme cardiaque à des niveaux d'efforts où la consommation d'oxygène est sous-maximale mais il ne modifie pas la fréquence cardiaque maximale, qui dépend essentiellement du génotype des canaux ioniques cardiomyocytaires et de l'âge du sujet (D'Souza et al., 2014). D'autres transformations peuvent être constatées : augmentation du volume sanguin, hypertrophie du ventricule gauche, déplacement de la balance sympatho-vagale (Uusitalo et al., 1996) vers une dominance du système parasympathique (Seals et Chase, 1989). La diminution de la fréquence cardiaque est renforcée par l'entraînement en endurance (Dixon et al., 1992 ; Furlan et al., 1993 ; Goldsmith et al., 1997 ; Macor et al., 1996 ; Portier et al., 2001 ; Iellamo et al., 2002).

Dans une étude de 2002, Iellamo et al. ont observé chez 7 rameurs de haut niveau, une baisse de la fréquence cardiaque associée à une augmentation de l'activité parasympathique après une période d'entraînement modéré, ayant succédé à une période de repos.

	Baseline	3 ^{ème} Mois (75%)	6 ^{ème} Mois (75%)	9 ^{ème} Mois (100%)
RR (ms)	1065 (996-1150)	1095 (1029-1133)*	1192 (1053-1317) *†	978 (923-1044)*‡
LF (ms ²)	1115 (811-1321)	1396 (606-1583)	1850 (578-3791)	1498 (1843-8092)
LF (nu)	52 (29-59)	42 (28-50)	29 (22-36)	63 (62-68)*‡
HF (ms ²)	998 (576-2858)	1139 (815-1651)	1367 (1115-6975)*†	454 (321-757)*‡
HF (nu)	32 (30-58)	51 (32-66)	60 (47-70)*†	26 (18-28)*‡
LF/HF	1,4 (0,4-2,0)	0,8 (0,4-1,8)	0,4 (0,3-0,8)	2,5 (2,4-3,5)*‡

Tableau 18. Intervalles RR et indices de l'analyse spectrale après plusieurs mois d'entraînement. Valeurs exprimées en médiane et intervalle interquartile. (D'après Iellamo et al., 2002). RR interval ; intervalle entre deux battements cardiaques, LF ; basses fréquences, LFnu ; basses fréquences en unités normalisées, HF ; hautes fréquences, HFnu, hautes fréquences en unités normalisées, LF/HF ; rapport des basses fréquences sur les hautes fréquences. Ce tableau montre une augmentation de l'activité parasympathique après 3, puis 6 mois d'entraînement avec une augmentation de 75% de la charge d'entraînement. En revanche, après 3 mois avec une augmentation de 100% de la charge d'entraînement, l'activité parasympathique chute considérablement et le domaine orthosympathique prédomine.

Ces résultats ont été également observés par Pichot et ses collaborateurs (2002) chez des athlètes de demi-fond, où l'activité orthosympathique a augmenté d'environ 31% après trois semaines d'entraînement, pendant que les indices parasympathiques diminuaient de 41%. Après une semaine de récupération avec un entraînement allégé, les variations se sont inversées : les indices parasympathiques ont augmenté de 46%, alors que les indices orthosympathiques ont baissé de 24%. Les observations de ces études montrent qu'un entraînement réalisé à trop

haute intensité ou associé à une trop forte charge d'entraînement mène à une prédominance de l'activité orthosympathique.

A l'inverse, une réduction de l'activité orthosympathique au repos semble refléter une adaptation cardiovasculaire positive à l'entraînement (O'Sullivan et Bell, 2000 ; Hedelin et al., 2001). Hedelin et al. ont montré qu'il existait une relation inverse entre la puissance des basses fréquences en position couchée avec une augmentation de $\dot{V}O_{2max}$ et de la puissance musculaire.

Toutefois, les résultats sur l'activité orthosympathique en position couchée, après l'entraînement sont contradictoires. Certains auteurs ont avancé que l'augmentation de la charge d'entraînement induisait une prédominance orthosympathique (Furlan et al, 1993 ; Pichot et al., 2002 ; Iellamo et al., 2002). Pourtant, une partie de ces auteurs conclut que cette prédominance orthosympathique indique une fatigue transitoire (Furlan et al, 1993 ; Pichot et al., 2002), alors qu'une autre partie pense que cette prédominance est le fait d'une adaptation neurovégétative en vue de la préparation de la performance sportive (Iellamo et al., 2002).

Ces observations s'expliquent également par la réduction du volume réalisé à intensité basse, qui impliquerait une baisse de l'activité parasympathique. Cette réduction de la charge engendrerait donc une prédominance orthosympathique. Cette hypothèse a d'ailleurs été réalisée à la suite d'une étude de cas chez un triathlète de haut niveau (Stanley et al., 2015).

De plus, certaines études ont montré que l'activité orthosympathique augmentait dans les jours précédant la compétition (Edmonds et al., 2013) et étaient en relation avec l'anxiété (Cervantes Blásquez et al., 2009 ; Mateo et al., 2012).

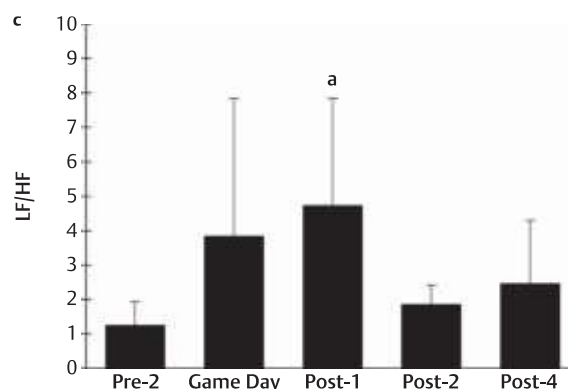


Figure 27. Evolution du ratio LF/HF au cours d'une semaine incluant un jour de match chez des joueurs de rugby de haut niveau (D'après Edmonds et al., 2013). L'augmentation de la valeur du rapport LF/HF après le jour de match (game day) traduit une augmentation de la prédominance orthosympathique.

Par ailleurs, il est important de préciser que bon nombre d'études portant sur les changements des indices de VFC n'ont pas évalué les réponses de performance en fonction de la charge d'entraînement prescrite. Aussi, la plupart de ces mesures sont souvent réalisées ponctuellement, avant et après le cycle d'entraînement, alors que l'utilisation de mesures VFC isolées a été remise en cause, en raison des fortes variations des valeurs de VFC jour après jour (Plews et al., 2012).

Ce qu'il faut retenir :

Bien que les méthodes de mesures et d'analyses diffèrent, la VFC est un outil pour observer des changements de la fonction cardiaque du système nerveux autonome.

L'augmentation de l'activité parasympathique est souvent corrélée à l'élévation du volume aérobie. Ce système facilite la récupération des sportifs et se trouve nécessaire pour la reconstruction cellulaire. Après une augmentation de l'intensité, on retrouve souvent une hyperactivité orthosympathique, qui semble importante pour se préparer à réaliser un effort maximal lors d'une compétition. Toutefois, une prédominance orthosympathique prolongée semble être à l'origine d'une augmentation de risques de blessures et de maladies.

La distribution de l'intensité joue un rôle prépondérant sur l'équilibre du système nerveux autonome. Ce travail de thèse cherchera à comparer les réponses neurovégétatives en fonction de l'intensité d'entraînement.

5.4 Adaptation et réponses hématologiques

Peu d'études ont investigué les changements hématologiques chez les nageurs de haut niveau et sur une longue période et présentent des résultats confus (Rushall et Busch, 1980 ; Mujika et al., 1998, Santhiago et al., 2009).

Rushall (1980) a montré une réduction des valeurs d'hémoglobine totale après une phase d'entraînement intense, puis une augmentation après la phase d'affûtage. Santhiago (2009) observa la même tendance pour l'hématocrite (voir tableau 19) sur un protocole similaire. Mujika (1998) a montré une augmentation de la concentration en hémoglobine après 12 semaines d'entraînement intense suivies de 4 semaines d'affûtage.

	T1	T2	T3	T4
Erythrocytes ($\times 10^{12} \cdot L^{-1}$)	$5,17 \pm 0,30$	$5,25 \pm 0,29$	$5,31 \pm 0,33$	$5,21 \pm 0,25$
Hémoglobine ($g \cdot dL^{-1}$)	$15,33 \pm 0,99$	$15,44 \pm 0,82$	$16,02 \pm 1,07$	$15,92 \pm 0,81$
Hématocrite (%)	$46,31 \pm 3,01$	$43,63 \pm 2,31^*$	$46,77 \pm 3,19^\dagger$	$47,75 \pm 2,42^\dagger$
VGM (fl)	$89,54 \pm 2,86$	$83,07 \pm 2,94^*$	$88,10 \pm 2,90^\dagger$	$91,73 \pm 3,14^\dagger$
CCMH ($g \cdot dL^{-1}$)	$33,06 \pm 0,52$	$35,33 \pm 0,38^*$	$34,19 \pm 0,27^*^\dagger$	$33,28 \pm 0,57^\dagger^\ddagger$
Volume plasmatique (%)		$4,40 \pm 2,29$	$-9,32 \pm 6,07^\dagger$	$-3,47 \pm 5,88^\dagger$

Tableau 19. Réponses des paramètres hématologiques des nageurs pendant un programme d'entraînement de 14 semaines. Note : T1 ; entraînement en endurance, T2 ; fin de l'entraînement en endurance, T3 ; fin de la phase spécifique, T4 ; fin de l'affûtage. (D'après Santhiago et al., 2009). MCV représente le volume globulaire moyen, et CCMH la concentration corpusculaire moyenne en hémoglobine.

Parallèlement, dans une étude sur des nageurs bien entraînés, Mackinnon et al., (1997) n'ont observé aucun changement sur la ferritine, l'hémoglobine, l'hématocrite, le nombre d'érythrocytes après 4 semaines d'entraînement intense.

Ce qu'il faut retenir :

Les différences de durée d'intervention, de charge d'entraînement, de niveau des nageurs donnent des résultats contradictoires. Au regard de la difficulté pratique du recueil des paramètres hématologiques, il semble que ses mesures ne soient pas appropriées pour évaluer les réponses physiologiques des nageurs. Afin que l'analyse de ces résultats puisse être davantage applicable, il serait nécessaire de contrôler ces marqueurs sanguins fréquemment. Dans notre travail de thèse, nous n'avons pas choisi d'investiguer ces marqueurs, afin de ne pas alourdir le protocole de recherche, tout en prenant le risque de ne pas savoir interpréter les résultats.

5.5 Adaptation et défenses immunitaires

De nombreuses études ont montré qu'une activité physique régulière pouvait augmenter l'efficacité de l'immunorégulation (Lotzerich et Uhlenbruck, 1991 ; Nehlsen-Cannarella et al., 1991 ; Nieman et al., 1991). En natation, très rares sont les études qui ont rapporté des résultats sur les effets de l'entraînement sur le système immunitaire.

En 2004, Gleeson et al. ont montré que malgré la suppression partielle des lymphocytes T juste après un effort à haute intensité, leurs fonctions immunitaires n'ont pas été modifiées après 5 mois d'entraînement intense.

Morgado et al. (2012) ont trouvé des résultats contradictoires où ils ont observé une diminution du nombre de monocytes, de neutrophiles et une augmentation des cellules dendritiques après 7 semaines d'entraînement intensif chez des nageurs de haut niveau.

Ces résultats laissent penser que les réponses immunitaires ont été altérées, ce qui pourrait expliquer l'augmentation de l'apparition des symptômes respiratoires observée pendant l'étude. Toutefois, il est possible que les cellules sanguines soient sorties du compartiment sanguin et aient été utilisées ailleurs dans l'organisme (organes, muscles).

L'année suivante la même équipe confirma ces résultats en montrant que les symptômes respiratoires augmentaient lorsque les valeurs des cellules NK (lymphocytes) diminuaient, pendant la saison hivernale, avec une forte charge d'entraînement. (Rama et al., 2013). Cependant, il est possible que la période hivernale ait entraîné une diminution des cellules NK plutôt que l'augmentation de la charge d'entraînement

	T0	T1	T2	T3
Monocytes	468	365*	429	405
Neutrophiles	4536	5855	3939	4811
Cellules dendritiques	49	44	56	54

Tableau 20. Nombre de monocytes, neutrophiles et cellules dendritiques observés à différentes périodes chez des nageurs de haut niveau : T0 ; base après une période de repos, T1 ; 7^{ème} semaine après une augmentation de la charge d'entraînement, T2 ; 24^{ème} semaine après une augmentation de la charge et de l'intensité d'entraînement, T3 ; 29^{ème} semaine après une période d'affûtage et de compétition. (D'après Morgado et al., 2012).

Ce qu'il faut retenir :

En résumé, un entraînement à intensité faible ou modérée permet de réduire les risques de blessures et de maladies alors qu'un entraînement trop intense augmente les risques infectieux à cause de changements négatifs sur la fonction immunitaire (Surkina et Gotovtseva, 1991).

Cependant, en natation, les rares études qui ont observé des changements de défenses immunitaires ne sont pas suffisantes pour contrôler et réguler la charge d'entraînement à l'aide de marqueurs biologiques. Une longue étude observationnelle sur des nageurs de haut niveau, confrontés à une très forte charge d'entraînement pourrait faciliter la compréhension des réponses immunitaires en natation.

5.6 Adaptation et régulation hormonale

De nombreuses études ont investigué l'influence des régulations hormonales après l'entraînement, en comparant les différences entre des athlètes en situation de surentraînement et des athlètes ayant réussi à s'adapter à une forte charge d'entraînement.

Plusieurs études ont investigué les changements du rapport cortisol/testostérone en fonction des variations de charge d'entraînement. Les résultats sont contradictoires car la plupart des études sur les nageurs de haut niveau n'ont rapporté aucun changement sur le niveau de cortisol et de testostérone après une période de forte charge ou de surentraînement (Hakkinen et al., 1987 ; Hooper et al., 1993 ; Mujika et al., 1996a et 1996b).

Les seules études qui ont montré une augmentation du taux de cortisol (Kirwan et al., 1988 ; Costill et al., 1991) ou une diminution du niveau de testostérone (Costill et al., 1991), étaient réalisées sur des nageurs ayant un volume total initial d'entraînement très faible (inférieur à 10 kilomètres par semaine).

Les réponses catécholaminergiques liées à l'entraînement semblent plus intéressantes. Plusieurs études ont mis en évidence des changements sur le rapport adrénaline/noradrénaline selon les variations de charge d'entraînement (MacKinnon et al., 1997 ; Atlaoui et al., 2006 ; Kirwan et al., 1988). Ces réponses sont à mettre en lien avec l'activité parasympathique et orthosympathique du système nerveux autonome. L'activité orthosympathique est associée à ces deux neurotransmetteurs alors que l'activité parasympathique engendre une sécrétion de l'acétylcholine.

Hooper et al., (1993), ont d'ailleurs montré chez des nageurs de haut niveau, en état de surentraînement, que le niveau de noradrénaline au repos, avait une tendance à être plus élevé que pour des nageurs non surentraînés durant le milieu de la saison. Pendant l'affûtage, cette différence était significativement plus haute pour les nageurs surentraînés.

Dans une étude d'une durée de 12 semaines chez 14 nageurs très bien entraînés, Atlaoui a récolté les concentrations d'adrénaline et de noradrénaline après chaque période de l'étude sur une durée de 24 heures : après 4 semaines d'entraînement intense, après trois semaines d'entraînement réduit précédant une compétition importante, et après 5 semaines d'entraînement à bas volume. Après les 4 semaines d'entraînement, le niveau de noradrénaline a été négativement corrélé au changement de volume total et de charge d'entraînement, alors qu'il a été positivement corrélé à la performance après les 3 semaines d'entraînement réduit.

Ces résultats montrent que les niveaux de noradrénaline peuvent être des marqueurs biologiques pour évaluer l'état de fatigue mais leurs variations restent difficilement interprétables.

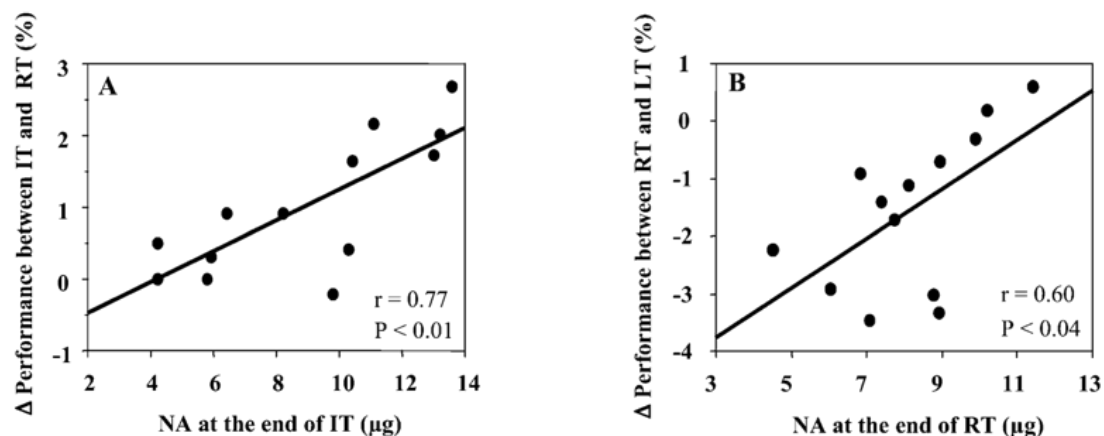


Figure 28. Relations entre (A) les changements de performance entre l'entraînement intense (IT) l'entraînement réduit (RT) et le niveau de noradrénaline à la fin de IT, (B) les changements de performance entre l'entraînement réduit et l'entraînement à bas volume (LT) et le niveau d'adrénaline après l'entraînement réduit. (D'après Atlaoui et al., 2006)

Ce qu'il faut retenir :

Les adaptations de l'organisme à l'entraînement sont fortement dépendantes du type d'exercice. Les différentes intensités de l'effort jouent chacune d'entre elles, un rôle différent sur les processus adaptatifs du corps humain. L'entraînement à haute intensité permet d'induire des réponses physiologiques assez rapidement, mais la charge ne doit pas être trop haute afin de ne pas engendrer un stress trop important sur l'organisme.

La fatigue est multifactorielle et doit être contrôlée par des moyens complémentaires. Dans le but de générer des aptations physiologiques, biologiques pour gagner en performance, des outils de suivi de l'entraînement sont indispensables pour l'entraîneur. Ces méthodes de mesures doivent être appropriées pour mesurer l'efficacité de l'entraînement.

Les différentes stratégies d'entraînement conduisent à des changements spécifiques où les réponses des nageurs sont toujours individuelles. Le choix des outils de contrôle aura une grande importance pour réguler l'entraînement.

6. Les outils (marqueurs/indices) de l'adaptation du nageur à l'entraînement : quelles solutions pour évaluer l'efficacité de l'entraînement ?

Durant sa carrière, le nageur traverse différentes périodes et son organisme connaît de nombreuses variations physiologiques, morphologiques, physiques. Ces changements sont notamment influencés par la quantité et la qualité de ses entraînements (intensité, volume, fréquence) mais également par son environnement (scolarité, culture familiale, etc...). Dans la mesure où l'impact de l'entraînement et de cette charge externe est immense, l'entraîneur doit se doter d'outils pour évaluer les adaptations du nageur dans une période donnée à partir d'indicateurs précis informant sur les processus de transformation en cours.

6.1 Indices des adaptations physiologiques.

En natation, il existe trois grands types de variables physiologiques qui sont souvent recueillies dans les études scientifiques et dans certains groupes d'entraînement. Classiquement, la lactatémie pendant et après l'effort est souvent mesurée pour évaluer l'intensité de l'entraînement. Dans le même esprit, la fréquence cardiaque est également contrôlée. Enfin, lorsque les outils sont disponibles, les échanges gazeux respiratoires sont estimés.

Variable	Description
$\dot{V}O_{2pic}$	Pic de consommation d'oxygène pour un effort donné
$\dot{V}O_{2max}$	Consommation maximale d'oxygène
$\% \dot{V}O_{2max}$	Pourcentage de la consommation maximale d'oxygène
LT1	Vitesse associée au premier seuil lactique
LT2	Vitesse associée au deuxième seuil lactique
La_{pic}	Concentration maximale en lactate sanguin
FC_{max}	Fréquence cardiaque maximale
$\% FC_{max}$	Pourcentage de la fréquence cardiaque maximale
E_{tot}	Dépense d'énergie totale
CE	Coût énergétique
VE	Ventilation

Tableau 21. Principales variables identifiées pour observer des adaptations physiologiques après l'entraînement en natation. (Synthèse personnelle).

6.2 Indices de la régulation autonome

Il existe plusieurs méthodes d'enregistrement des valeurs de variabilité de fréquence cardiaque. Dans le champ du sport de haut niveau, deux possibilités sont souvent envisagées : la mesure de nuit, mais qui dépend fortement des cycles du sommeil, ou bien la mesure le matin au réveil. Deux types d'analyses sont classiquement utilisés : le domaine temporel et le domaine fréquentiel, bien qu'il existe un troisième domaine plus compliqué à analyser, le domaine non linéaire (non présenté ici). La description des principaux indices de VFC est présentée dans le tableau suivant.

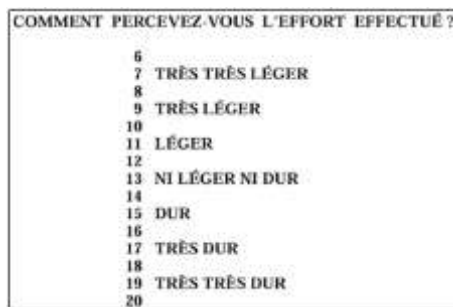
Mesure	Description
Domaine Temporel	
FC _{moy}	Fréquence cardiaque moyenne sur la période enregistrée
SDNN	Déviatiion standard de l'intervalle RR. Marqueur de la variabilité globale.
rMSSD	Moyenne quadratique des intervalles RR successifs. Marqueur parasympathique.
PNN50	Pourcentage des intervalles RR consécutifs supérieurs à 50 ms. Marqueur parasympathique.
Domaine fréquentiel	
LF	Puissance spectrale située entre l'intervalle de fréquence de 0,04 à 0,15 hertz. Marqueur de l'activité orthosympathique et parasympathique, incluant l'activité du baroreflexe.
HF	Puissance spectrale située entre l'intervalle de fréquence de 0,15 à 0,4 hertz. Marqueur de l'activité parasympathique.
LF/HF	Ratio entre la puissance LF et le puissance HF
LF _{nu}	Puissance spectrale de LF en unité normalisée (exprimée en pourcentage)
HF _{nu}	Puissance spectrale de HF en unité normalisée (exprimée en pourcentage)

Tableau 22. Principales variables identifiées pour observer les adaptations du système nerveux autonome par la mesure de variabilité de fréquence cardiaque. (Synthèse personnelle).

6.3 Indices de la fatigue perçue et du sommeil.

La fatigue perçue à l'effort (RPE)

Le premier auteur à avoir proposé une mesure quantitative de perception de l'effort durant une activité physique est Borg (1970). C'est une mesure globale de la fatigue perçue à l'effort par le sportif. Son échelle se situe entre 6 et 20 et est également associée à des mots d'appréciation, permettant de qualifier la fatigue perçue. Cette échelle est à mettre en relation avec les valeurs de FC qui se situent généralement entre 60 et 200 pulsations par minute.



COMMENT PERCEVEZ-VOUS L'EFFORT EFFECTUÉ ?	
6	
7	TRÈS TRÈS LÉGER
8	
9	TRÈS LÉGER
10	
11	LÉGER
12	
13	NI LÉGER NI DUR
14	
15	DUR
16	
17	TRÈS DUR
18	
19	TRÈS TRÈS DUR
20	

Figure 29. *Echelle de perception de l'effort proposé par Borg (1970)*

Foster (2001) a ensuite proposé une version modifiée de l'échelle de Borg, en établissant une échelle entre 1 et 10 pour donner plus de simplicité. Ces deux méthodes ont montré qu'il était possible de quantifier l'intensité d'entraînement grâce à ces échelles.

Cotation	Description
0	Repos
1	Très facile
2	Facile
3	Modéré
4	Légèrement difficile
5	Difficile
6	-
7	Très difficile
8	-
9	-
10	Similaire à ma compétition la plus difficile

Tableau 23. *Echelle RPE proposé par Foster et al. (2001).*

Le sommeil

Une récente revue de littérature de Fullagar et al. (2014) a montré que les perturbations du sommeil et les altérations sur la performance restaient encore à établir précisément. Deux études ont montré une diminution des performances après avoir connu une charge d'entraînement trop intense ayant entraîné des perturbations du sommeil mais ces études ont utilisé de simples questionnaires, où la perception du sommeil reste subjective (Jürimäe et al., 2004 ; Matos et al., 2001).

Des études ayant utilisé la polysomnographie ou l'actimétrie (Taylor et al., 1997 ; Fietze et al., 2009) ont montré seulement de très légères perturbations du sommeil après une forte charge d'entraînement mais la performance n'était pas diminuée. Toutefois, il est possible de décrire quelques variables à l'origine d'un mauvais sommeil.

Variable	Description
Temps d'endormissement	Environ 20 minutes
Durée de sommeil	Entre 7 et 9 heures (dépendante de l'heure de coucher et de réveil)
Nombre de réveils	Proche de zéro

Tableau 24. Principaux indicateurs d'une bonne qualité de sommeil (synthèse personnelle).

6.4 Indices globaux des adaptations biologiques

Le suivi sanguin

Bien que le suivi des paramètres hématologiques ne soit pas toujours aisé chez les nageurs de haut niveau, le monitoring de la composition sanguine peut prévenir une nutrition insuffisante, une charge d'entraînement trop sévère, susceptible de causer des blessures ou maladies (Morgado et al., 2012).

Variables	Description
Hématocrite (%)	Pourcentage de globules rouges dans le sang
Hémoglobine (g•dL ⁻¹)	Protéine responsable du transport de l'oxygène
Ferritine (µg•L ⁻¹)	Protéine qui régule le stockage du fer
Erythrocytes (x10 ¹² •L ⁻¹)	Globules rouges
VGM (fl)	Volume globulaire moyen des globules rouges
EPO (µL•L ⁻¹)	Hormone qui régule la production des globules rouges
Lymphocytes (nombre)	Globules blancs jouant un rôle important dans le système immunitaire

Tableau 25. Principales variables identifiées pour observer les adaptations hématologiques après un entraînement en natation. (Synthèse personnelle).

Le suivi hormonal

La réalisation d'un exercice important a des effets à court et long terme sur les réponses endocriniennes des individus (Viru et al., 1992). C'est pourquoi, le suivi des marqueurs hormonaux permet d'observer les effets de l'entraînement sur les régulations du système endocrinien à travers différents moments de la saison. Toutefois ces marqueurs se caractérisent par une forte variabilité et ne permettent pas de prédire la performance.

Variables	Description
Cortisol	Hormone stéroïde qui participe à la production d'énergie (augmentation de la glycémie, stimule la synthèse des catécholamines)
Testostérone	Hormone stéroïde qui participe au développement musculaire et stimule la production de protéines
Adrenaline	Hormone sécrétée en réponse à un état de stress ou une activité physique et son rôle
Noradrenaline	Précurseur métabolique de l'adrénaline et son rôle

Tableau 26. Principales variables identifiées pour observer les régulations hormonales après un entraînement en natation. (Synthèse personnelle)

La métabolomique

La métabolomique étudie l'évolution de l'ensemble des molécules présentes dans une matrice biologique en réponse aux différents stimuli métaboliques. Il est possible de définir cette discipline comme « la mesure quantitative des réponses métaboliques d'un organisme à un stimulus physiopathologique, environnemental ou à des modifications génétiques » (Fiehn et al., 2000). Son utilisation en nutrition est encore relativement récente mais cette approche est un outil puissant, très utile pour mieux caractériser le phénotype métabolique d'un individu et son évolution au cours du temps (Ramautar et al., 2013).

L'ensemble du métabolome regroupe un très grand nombre de métabolites possédant des propriétés physico-chimiques différentes. Les métabolites diffèrent par leurs poids moléculaires, les groupements fonctionnels qui les constituent, la volatilité, la polarité, etc...

Du fait de cette grande diversité, il est impossible d'étudier l'ensemble du métabolome avec une seule technique analytique. Il faudra choisir la technique utilisée en fonction des métabolites ciblés et de la question scientifique posée. La spectrométrie de masse peut être couplée à la chromatographie liquide (LC) ou gazeuse (GC) selon les propriétés des métabolites étudiés.

Les progrès réalisés dans le domaine du couplage de la chromatographie liquide et de la spectrométrie de masse haute résolution en font une technique de choix pour la métabolomique de par sa sensibilité, sa large couverture analytique (capacité à détecter des métabolites de différentes natures), sa grande gamme dynamique et sa capacité à générer des informations structurales pour l'identification de nouveaux biomarqueurs (Ismail et al., 2013).

De telles approches génèrent des données massives et complexes qui nécessitent des outils de traitement et d'intégration adaptés afin d'en extraire les informations biologiquement pertinentes et enrichir nos connaissances et notre compréhension des systèmes biologiques.

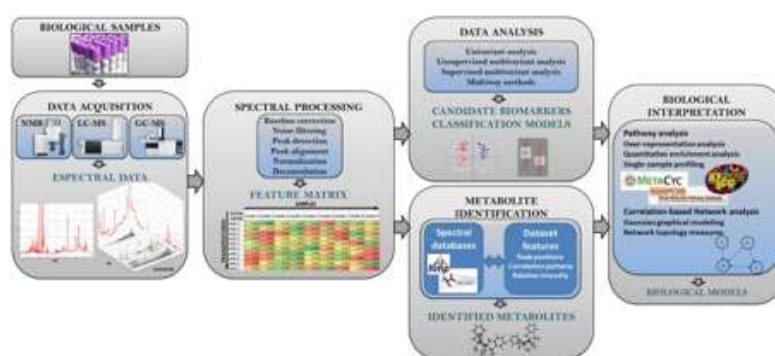


Figure 30. Workflow classique d'analyses en métabolomique non ciblée (Alonso et al., 2005). Cette figure présente les grandes étapes de l'analyse métabolomique : le recueil des échantillons biologiques, l'acquisition de données par la méthode choisie, le traitement des données, l'identification des métabolites, puis l'interprétation biologique.

Les données brutes acquises sont tout d'abord traitées par des logiciels d'extraction et d'alignement des données afin d'être transformées en matrice de données exploitables par les outils d'analyses statistiques. Chaque molécule ou métabolite détecté est représenté par des ions, caractérisés par leurs masses, leur temps de rétention, ainsi que l'intensité de leurs signaux. Ceux-ci sont extraits et regroupés dans les matrices de données.

L'approche métabolomique, reposant sur la comparaison différentielle d'empreintes, impose d'avoir recours à des outils statistiques. Des analyses statistiques univariées (ANOVA) et multivariées (descriptives ou explicatives, analyses en composantes principales) sont donc réalisées afin de permettre une visualisation rapide de l'ensemble des données collectées et de mettre en évidence des différences significatives entre les populations étudiées.

Enfin, l'identification des métabolites d'intérêt (biomarqueurs potentiels) représente l'aboutissement d'une étude métabolomique. Elle est réalisée par comparaison avec des bases de données et des analyses complémentaires pour valider les propositions putatives des bases.

HYPOTHESES DE TRAVAIL ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'ensemble des chapitres de la revue de littérature précédente a permis de comprendre quels sont les mécanismes mis en jeu pour la performance en natation. Depuis quelques années, différents travaux expérimentaux ainsi que plusieurs rapports d'entraîneurs internationaux dans des congrès techniques ont permis de décrire plusieurs modèles de périodisation en natation. Ces observations présentent des méthodes d'entraînement très différentes, pourtant associées à des performances similaires.

Notre première hypothèse suggère que les meilleurs nageurs français s'entraînent selon un type d'entraînement basé sur une forte partie réalisée autour du second seuil lactique. Cette approche semble culturelle chez la plupart des groupes d'entraînement. D'autre part l'analyse des contributions énergétiques des épreuves de 100 mètres et de 200 mètres met en évidence le caractère mixte (aérobie-anaérobie) de ces épreuves. Or étonnamment bien que ~50-60% des apports énergétiques pour les épreuves de 100 mètres sont d'origine anaérobie, l'analyse des quantifications des entraîneurs révèlent que seulement ~10 % est consacré à l'entraînement anaérobie.

Le premier objectif de notre travail est de réaliser une étude descriptive (étude 1) sur les stratégies de distribution des intensités d'entraînement chez les meilleurs nageurs français. Les rapports d'entraîneurs et les études observationnelles n'ont pas montré de stratégies d'entraînement optimales jusqu'à présent. Une meilleure description de ces stratégies d'entraînement devrait permettre de mieux comprendre les facteurs de la performance en natation. Une seconde étude (étude 2) viendra compléter l'analyse de ces déterminants physiologiques de la performance en natation afin d'identifier les liens possibles entre stratégies d'entraînement et réponses métaboliques.

La deuxième hypothèse de la partie expérimentale est d'identifier s'il est possible d'améliorer le niveau de performance en natation en optimisant la distribution de l'intensité à l'entraînement. Il est fort probable que les différents types d'entraînement induisent des réponses métaboliques spécifiques en compétition. Deux types de distribution de l'intensité renvoient à des pratiques d'entraîneurs chevronnés ayant obtenus des résultats au niveau Mondial et Olympique. Jusqu'à présent, le modèle polarisé a prouvé son efficacité dans les sports d'endurance mais n'a jamais été testé de manière expérimentale en natation, alors que le modèle au seuil semble être plus traditionnel chez les nageurs de haut-niveau, au regard des études observationnelles. Il peut être supposé qu'une intensification de l'entraînement pourrait amener à des améliorations de la performance sur 100 m, comme le montre les études expérimentales dans d'autres disciplines.

Le deuxième objectif de notre travail expérimental est de comparer les effets de performance et physiologiques en fonction de deux types d'entraînement d'une durée de six semaines chez 22 nageurs de très bon niveau (étude 3). Le principal apport en termes de connaissances scientifiques sera de comprendre les effets de la distribution de l'intensité à l'entraînement. Une seconde étude (étude 4) complètera l'analyse des effets de ces deux types d'entraînement sur les perturbations biologiques observées chez les nageurs. Nous supposons qu'une distribution différente de l'intensité génère des états de fatigue différents.

La revue de littérature a mis en évidence la nécessité d'élever la charge d'entraînement afin de maximiser les adaptations physiologiques et de repousser les limites humaines. Cependant, cette charge sévère augmente le risque de l'apparition d'une fatigue installée, suivie par une baisse des performances de manière prolongée. C'est pourquoi, nous émettons l'hypothèse que cette augmentation de la charge d'entraînement est associée à des modifications de la commande centrale, observable à l'aide d'outils de suivi de l'état de fatigue.

Le troisième objectif de nos recherches a été de décrire les changements de l'activité cardiaque du système nerveux autonome en fonction de l'intensité et de la charge d'entraînement. Les mesures de variabilité de fréquence cardiaque sont susceptibles de mettre en exergue l'impact de la charge d'entraînement sur l'état de fatigue, afin de réguler l'entraînement avec des stratégies adéquates (études 5 et 6).

Ce qu'il faut retenir :

La première étape de nos travaux vise à décrire les stratégies d'entraînement des meilleurs nageurs français, en termes de volume et d'intensité d'entraînement. Ces stratégies ont un impact sur les réponses métaboliques observées durant les épreuves de compétition, qu'il conviendra de caractériser en préambule aux études expérimentales suivantes.

La deuxième étape a pour but de comparer deux types d'entraînement, en comparant leurs effets sur la performance, les adaptations physiologiques et biologiques.

Enfin, la dernière étape consistera à évaluer l'état de forme des nageurs, en utilisant des outils de suivi adaptés, afin de maximiser les adaptations physiologiques sans installer un état de fatigue trop sévère et d'adapter l'entraînement aux réponses individuelles des nageurs.

**MATERIELS ET OUTILS
UTILISES LORS DES
TRAVAUX
EXPERIMENTAUX**

1. Variables métaboliques

Au cours de nos travaux expérimentaux, nous avons recueilli un ensemble de données conséquent, à l'aide d'un matériel spécifique. La majeure partie de ces données a été récoltée sur des variables métaboliques, visant à comprendre les changements physiologiques associés à l'entraînement.

1.1 Recueil des échanges gazeux et respiratoires

Durant les études 2, 3 et 4, les gaz expirés et la consommation d'oxygène ont été mesurés immédiatement après chaque course à l'aide d'un analyseur de gaz K4b2 (Cosmed) (Laffite et al. 2004). Le masque a été appliqué pendant 30 secondes sur le visage du nageur dès l'arrêt de la nage et à la sortie de la tête de l'eau. Les données cycle par cycle ont été enregistrées et moyennisées sur une durée de 20 secondes pour estimer une consommation d'oxygène pic ($\dot{V}O_{2pic}$, $L \cdot min^{-1}$ et $mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$).

Dans une première étude de 2004, Duffield et al. ont montré que le Cosmed K4b2 montrait une bonne répétabilité des mesures sur des tests-retests pour VE, $\dot{V}O_2$ et $\dot{V}CO_2$. Toutefois, la répétabilité avait une marge d'erreur de 4,01% sur un test de 10 minutes à allure lente, et de 4,17% sur un test à allure difficile mais de 12,06% sur un sprint de 1 minute. Ce résultat montre que lorsque les mesures sont réalisées sur une durée courte et pendant un exercice intense, la fiabilité diminue fortement. Darter et al. (2013) ont montré des résultats



similaires sur des efforts sous-maximaux sur un treadmill avec une précision de 6-7%. Reiss (2010) a également observé une fiabilité similaire avec une erreur standard entre 5 et 6 $mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$, soit environ 10%. Concernant la validité des mesures, l'étude de Duffield et al. (2004) a par ailleurs montré que l'appareil K4b2 surestimait les valeurs de $\dot{V}O_2$ par rapport à un carte métabolique d'environ 11 à 23%. Ces erreurs typiques de mesures sont bien supérieures aux progressions observées dans nos différents travaux et il est donc important de prendre avec précaution les interprétations à réaliser pour cette variable $\dot{V}O_2$.

1.2 Mesure de la lactatémie

Au cours des études 2, 3 et 4, la lactatémie a été mesurée à partir de prélèvements sanguins effectués sur l'index des participants, à différents moments de l'exercice. Une légère incision était réalisée sur l'index à l'aide d'une mini-lancette afin de prélever une petite goutte de sang. Pour chaque prélèvement, 3 μL de sang étaient collectés via une bandelette, puis analysés par un appareil Lactate Pro 2 (Arkray, Japon).

Pyne et al. (2000) ont d'abord montré que le lactate Pro avait un intervalle de différences des moyennes entre 0,06 et 0,52 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ sur une échelle de 1 à 18 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. En 2010, Tanner et al. (2010) confirment ces résultats en montrant que le Lactate Pro présente une erreur type qui se situe entre 2 et 4%. Enfin, en 2015, dans des conditions de tests similaires à notre étude (où un La_{pic} a été estimé), la précision du Lactate Pro 2 était $< 0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ pour des concentrations situées entre 1 et 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Bonaventura et al., 2015). Une légère tendance montrait que le lactate pro 2 sous-estimait les valeurs comparées à l'analyseur biologique (Radiometer ABL 700), surtout sur des valeurs dépassant les 15 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (ce qui fut rare dans nos travaux).

1.3 Mesure de la fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque a été enregistrée avec l'utilisation de cardiofréquencemètres Garmin (Garmin, USA). Une ceinture Garmin *HRM swim* dotée d'un émetteur était située sur le torse des nageurs et enregistrait directement les données dans sa mémoire interne. Une fois l'effort terminé, la ceinture se connectait avec la montre Forerunner 820XT (Garmin, USA) et permettait de transférer les données sur la plateforme Garmin Connect.



1.4 Mesure de la variabilité de la fréquence cardiaque

Au cours des études 5 et 6, l'activité du système nerveux autonome a été estimée par l'intermédiaire de mesure de la variabilité de fréquence cardiaque. Cette mesure était réalisée le matin au réveil et à jeun, après être passé aux toilettes. Le nageur disposait d'une ceinture émettrice Polar H7 (Kempele, Finlande) autour de son torse, après avoir mouillé l'émetteur de la ceinture et frotté légèrement sa peau, afin d'enlever les résidus. Le test consistait à s'allonger 7 minutes, puis se mettre debout pendant 6 minutes, sans bouger ni parler durant tout le test. Avant de commencer, le nageur connectait la ceinture avec l'application smartphone *Elite HRV*, afin de transférer et enregistrer les données. Après la fin du test, les données étaient transférées vers l'application puis envoyées par email pour l'analyse du test.

	Mesure	Description
Domaine temporel	FC _{moy}	Fréquence cardiaque moyenne sur la période enregistrée
	rMSSD	Moyenne quadratique des intervalles RR successifs. Marqueur parasympathique.
	LF	Puissance spectrale située entre l'intervalle de fréquence de 0,04 à 0,15 hertz. Marqueur de l'activité orthosympathique et parasympathique, incluant l'activité du baroréflexe.
Domaine fréquentiel	HF	Puissance spectrale située entre l'intervalle de fréquence de 0,15 à 0,4 hertz. Marqueur de l'activité parasympathique.
	LF/HF	Ratio entre la puissance LF et le puissance HF
	LF _{nu}	Puissance spectrale de LF en unité normalisée (exprimée en pourcentage)
	HF _{nu}	Puissance spectrale de HF en unité normalisée (exprimée en pourcentage)

Tableau 27. Principales variables identifiées pour observer des adaptations physiologiques après l'entraînement en natation. (Synthèse personnelle).

1.5 Mesures métabolomiques

Afin d'obtenir une vue globale des perturbations biologiques de l'ensemble de l'organisme, les réponses au stress de l'entraînement et de la récupération ont été étudiées par des analyses métabolomiques (étude 4). Nous avons d'abord recueilli des échantillons urinaires dans des tubes qui avaient été préalablement donnés aux nageurs. Le matin de chaque test, les nageurs ont uriné dans les tubes, puis les ont conservés au frais avant de nous les transmettre avant le début des tests. Dès la réception des échantillons, nous avons transféré les urines dans de petits tubes eppendorf de 15 ml. Ces échantillons ont été numérotés puis stockés dans un congélateur à -80 degrés.

Les tubes eppendorf ont ensuite été transmis au laboratoire d'analyses en utilisant un transporteur spécialisé dans la conservation du froid. Les analyses urinaires métabolomiques ont ensuite été réalisées par l'équipe de recherche « exploration du métabolisme » de l'INRA de Clermont-Ferrand. La spectroscopie de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) a été utilisée. Les échantillons urinaires ont été préparés en ajoutant $200\text{ }\mu\text{l}$ d'un tampon phosphate ($0,2\text{ mol.L}^{-1}\text{ KH}_2\text{PO}_4$, $0,8\text{ mol.L}^{-1}$) à $500\text{ }\mu\text{l}$ d'urine. A la suite d'une centrifugation à 8000 g durant 5 minutes, $10\text{ }\mu\text{l}$ de sodium trimethylsilyl (2,2,3,3- T_4) proprionate (TSP) et $50\text{ }\mu\text{l}$ D $_2$ O ont été ajoutés à $550\text{ }\mu\text{l}$ d'une précipitation. Les spectres étaient recherchés à l'aide d'un spectromètre Varian NMR 600-MHz. Le spectre était acquis à partir de 16 points de données et de 128 scans sur une fenêtre spectrale de 9 kHz. La suppression aqueuse était réalisée au cours du délai de relaxation (1 s) et du temps de mixage (200 ms). Tous les spectres urinaires ^1H NMR ont été référencés au TSP à 0.0 ppm et traités manuellement sous Chenomx (version 6) en utilisant une bande élargie de 0,2 Hz. Les spectres ont été intégrés selon des régions spectrales de 0,04 ppm en utilisant Chenomx (version 6). Les régions aqueuses (4,0-6,0 ppm) ont été exclues et les données ont été normalisées en sommes des intégrales des spectres.



Photo 4. Conservation des échantillons urinaires dans un réfrigérateur à -80 degrés Celsius.

2. Variables cinématiques

Malgré notre fort dévouement au recueil de variables physiologiques, principales composantes de notre travail de recherche, nous avons également cherché à comprendre l'incidence de l'entraînement avec la technique de nage. Pour cela, nous avons conduit quelques mesures sur les aspects cinématiques de la natation.

2.1 Mesure de la vitesse en natation

Pour toutes nos études, la vitesse a systématiquement été mesurée à l'aide d'un chronomètre manuel, toujours doublée par deux chronométrateurs.

2.2 Mesure du rapport fréquence amplitude en natation

Durant nos études expérimentales, nous avons utilisé plusieurs techniques pour mesurer les paramètres biomécaniques de course.

Durant notre étude 2, nous avons filmé les courses à l'aide d'un caméscope. Puis, une fois les vidéos transférées sur l'ordinateur, nous avons utilisé le logiciel fédéral d'évaluation de courses, nommé Espadon. Malheureusement, nous n'avons pas pu exploiter ces données lors de l'analyse des résultats de l'étude, causée par une perte de données importante liée à des problèmes logistiques lors de l'enregistrement des vidéos.

Pour notre étude 5, concernant un nageur champion du monde d'eau libre, nous avons utilisé une technologie récente et facile d'utilisation. Le système nommé TritonWear est un petit boîtier, qui se place derrière la tête, accroché sur les lunettes. Il enregistre plusieurs paramètres de courses (temps partiel, nombre de coups de bras, amplitude, fréquence, indice de nage, etc...) qui sont envoyés à un récepteur placé au bord du bassin. Ce récepteur transfère les données sur une tablette par connexion Bluetooth. Les données peuvent ensuite être récupérées sur une plateforme internet et téléchargées en format Excel. Ce système n'est pas encore validé sur le plan scientifique, il convient donc de prendre des précautions sur l'interprétation des données tirées de cette technologie.

3. Recueil des variables perceptuelles

Un recueil complémentaire de données a été nécessaire pour évaluer le niveau de fatigue ressentie par les nageurs durant nos différentes études. C'est pourquoi, nous avons utilisé plusieurs questionnaires de fatigue, permettant de retranscrire l'état de forme des nageurs, et de le mettre en lien avec les variables associées : adaptations physiologiques, performance, charge d'entraînement.

3.1 Questionnaires de l'état fatigue et des états de l'humeur

Au cours de l'étude 3, un questionnaire de l'état de fatigue et des états de l'humeur a été utilisé par les participants, de manière quotidienne, pendant toute la durée de l'étude. Ce questionnaire a été proposé par Noon et al. (2015). Plusieurs items étaient demandés avec une échelle se situant de 1 à 10 (du plus mauvais au meilleur état) :

- Motivation à s'entraîner
- Sensations au réveil
- Appétit
- Douleurs musculaires
- Qualité du sommeil la nuit précédente
- Qualité de récupération
- Niveau de fatigue

Le questionnaire RestQ-Sport a également été utilisé lors des tests de performance mais il n'a finalement pas servi à l'analyse des résultats.

3.2 Questionnaires de l'état du sommeil

Durant l'étude expérimentale (étude n°3), un questionnaire de qualité du sommeil a été utilisé afin d'évaluer l'impact des deux types d'entraînement sur le sommeil des nageurs. Le questionnaire utilisé a été celui de Vis-Morgen. Ce questionnaire devait être rempli tous les matins après le petit déjeuner et est composé de neuf questions qui renseignent la qualité du sommeil :

- Comment vous sentez-vous ce matin ?
- Comment avez-vous dormi cette nuit ?

- Quand vous êtes-vous couché hier soir ? (lumières éteintes)
- Combien de temps vous a-t-il fallu pour vous endormir ?
- Combien de fois vous êtes-vous réveillé ?
- Quand vous êtes-vous réveillé définitivement ce matin ?
- Quand vous êtes-vous levé ce matin ?
- Combien de temps avez-vous dormi en tout ?
- Avez-vous fait des cauchemars cette nuit ?
- Observations particulières ?

3.3 Questionnaire de symptômes respiratoires

Pour assurer le suivi des symptômes liés aux pathologies infectieuses, durant l'étude n°3, le questionnaire WURSS-11 a été utilisé tous les matins au réveil, après le petit déjeuner. C'est une version courte du WURSS-44 (Wisconsin Upper Respiratory Symptom Survey) (Barrett et al., 2005) qui permet d'évaluer les symptômes respiratoires quotidiennement avec moins d'items (Obasi et al., 2014) :

- Nez bouché
- Nez qui coule
- Enrouement
- Mal de gorge
- Gorge irritée
- Toux
- Maux de tête
- Congestion de la poitrine
- Eternuements
- Sentiment de fatigue
- Sentiment de maladie

PRESENTATION DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX

Etude n°1 : La distribution de l'intensité d'entraînement chez les meilleurs nageurs français

Résumé

Objectifs :

Présenter la distribution de l'intensité des nageurs français de niveau international. Elle a fait partie d'une étude plus large menée par des collaborateurs, sur l'optimisation des modèles de périodisation durant les 25 semaines précédant la compétition majeure de la saison.

Méthodes :

Dans cette étude, l'entraînement de 127 nageurs français a été quantifié sur une période de 20 saisons sportives. L'entraînement a été quantifié en 3 zones d'intensité durant les 25 dernières semaines précédant la compétition majeure de la saison.

Résultats :

La distribution de l'intensité était la suivante pour l'ensemble des nageurs : 42,07% en zone 1, 46,37% en zone 2 et 11,56% en zone 3. Un pic de charge a été observé 6 semaines avant la compétition. Les résultats soulignent également l'importance du travail à sec, avec un développement de la force important durant les périodes de forte charge (effort non quantifié en termes d'intensité d'entraînement dans cette étude).

Conclusion :

Les résultats de cette étude ont mis en avant les observations déjà remarquées auparavant, avec une forte partie de l'entraînement réalisée en zone 2, et une part relativement faible d'entraînement à haute intensité. Ces observations soulignent les différences de type d'entraînement qui existent avec d'autres disciplines et rappellent que la natation exige des contraintes spécifiques. La caractérisation des réponses métaboliques lors d'une épreuve maximale semble nécessaire, afin de voir en quoi la distribution de l'intensité à l'entraînement peut favoriser tel ou tel type d'adaptations.

AVALOS M, HELLARD P, LEFORT G, **PLA R**, MUJICA I, TOUSSAINT JF, PYNE DB. Training profiles in elite swimming : insight into periodization from a 20-year cohort. *Journal of Sports Science*. Soumis.

Introduction

Pour atteindre les plus hautes performances possibles sur les compétitions majeures, les entraîneurs périodisent la charge d'entraînement durant la saison (Maglischo, 2003 ; Turner, 2011 ; Afonso, 2017). Elle consiste à séquencer les différentes unités d'entraînement afin de maximiser les gains de performance, tout en limitant les baisses de performance liées aux blessures, au surentraînement ou au désentraînement (Maglischo, 2003 ; Turner, 2011, Issurin, 2016).

En natation, peu d'études observationnelles ont décrit cette périodisation, et rares sont celles qui ont présenté une distribution précise de la charge et de l'intensité d'entraînement. On retrouve deux schémas de distribution de l'intensité. Le premier présenté par Mujika et al. (1995 et 1996) rapporte un pourcentage moyen de 80/10/10 alors que le deuxième présenté par Hellard et al. (2006) et Avalos et al. (2003) rapporte un pourcentage moyen de 42% en zone 1, 47% en zone 2 et 11% en zone 3.

Dans les autres disciplines d'endurance, les études observationnelles des meilleurs sportifs de haut niveau rapportent des distributions différentes, où un entraînement polarisé est souvent adopté. Durant les quinze dernières années, les études expérimentales et observationnelles ont prouvé l'efficacité de ce modèle qui induisait de meilleures adaptations physiologiques associées à un stress moins important sur l'organisme (Seiler et al., 2006 ; Neal et al., 2013 ; Rønnestad et al., 2014 ; Muñoz et al., 2014). L'entraînement polarisé consiste à s'entraîner environ 80% en zone 1, 5% en zone 2 et 15% en zone 3 (Tønnessen et al. 2014 ; Stoggl et Sperlich, 2015).

Toutefois, récemment, certains entraîneurs internationaux de natation semblent décrire un entraînement qui se rapproche de l'entraînement polarisé (Barnier, 2012). Ces rapports indiquent un travail important réalisé à haute intensité, mais sans préciser le pourcentage d'entraînement réalisé en zone 3.

Dans le but de trouver ultérieurement un modèle idéal de distribution de l'intensité, le but de cette étude est d'investiguer le modèle actuel d'entraînement utilisé chez les meilleurs nageurs français.

Méthodes

Quantification de l'entraînement

Toutes les séances de natation ont été catégorisées en 3 niveaux d'intensité, en s'inspirant des travaux de Mujika (1995) : sous $2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (zone 1), entre 2 et $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (zone 2), au-dessus de $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (zone 3). Les séances de préparation à sec ont été enregistrées en minutes pour le développement de la force et la préparation physique générale.

Afin de normaliser les valeurs d'intensité, le volume d'entraînement à chaque niveau d'intensité a été exprimé comme le pourcentage du volume maximal à la même intensité réalisée au cours de l'étude. Une moyenne de chacune des valeurs pour chaque zone a été réalisée pour estimer la charge d'entraînement hebdomadaire (Avalos et al., 2003).

Résultats

Les résultats montrent une forte variabilité de la charge d'entraînement au cours des 25 semaines de la période d'étude. Un pic de charge a été observé 6 semaines avant la compétition majeure de la saison, avant que celle-ci ne retombe progressivement jusqu'à la compétition.

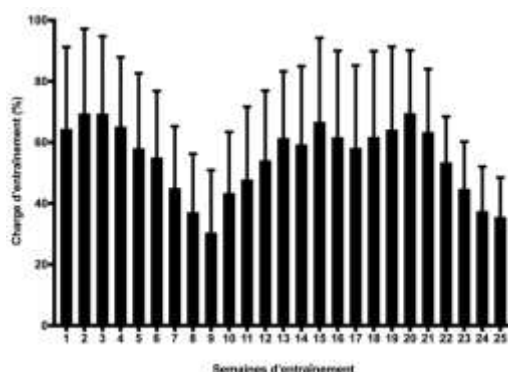


Figure 31. Evolution de la charge d'entraînement (exprimée en pourcentage de la charge hebdomadaire maximale d'entraînement observée durant l'étude) au cours des 25 semaines précédant la compétition majeure de la saison pour les 127 nageurs de l'étude.

Le tableau (tableau 28) suivant présente la distribution de l'intensité pour les nageurs, en fonction de leurs spécialités. Pour tous les groupes, on observe une part importante réalisée en zone 2 (environ 46%). Les sprinters ont tendance à s'entraîner moins dans cette zone 2, comparativement aux nageurs de moyenne distance, qui eux-mêmes s'entraînent moins en zone 2 que les nageurs de demi-fond. Le pourcentage réalisé en zone 3 est identique pour tous les groupes et se situe autour de 11%.

Epreuves	Zone 1 (%)	Zone 2 (%)	Zone 3 (%)
50-100 m	43,61 ± 2,88	44,52 ± 3,25	11,87 ± 0,58
200-400 m	41,81 ± 2,70	46,81 ± 3,20	11,39 ± 0,62
800-1500 m	38,31 ± 2,13	50,35 ± 2,60	11,34 ± 0,55

Tableau 28. Distribution de l'intensité pour chaque zone d'intensité pour les nageurs de l'équipe de France de natation en fonction de leur distance de spécialité.

Le travail à sec a été le plus conséquent durant les 6^{ème}, 7^{ème} et 8^{ème} semaines précédant la compétition majeure de la saison, avec une part relativement importante du développement de la force. Au cours des 4 dernières semaines, ce type de travail a été fortement réduit et a été accompagné d'un entraînement de préparation physique général constant.

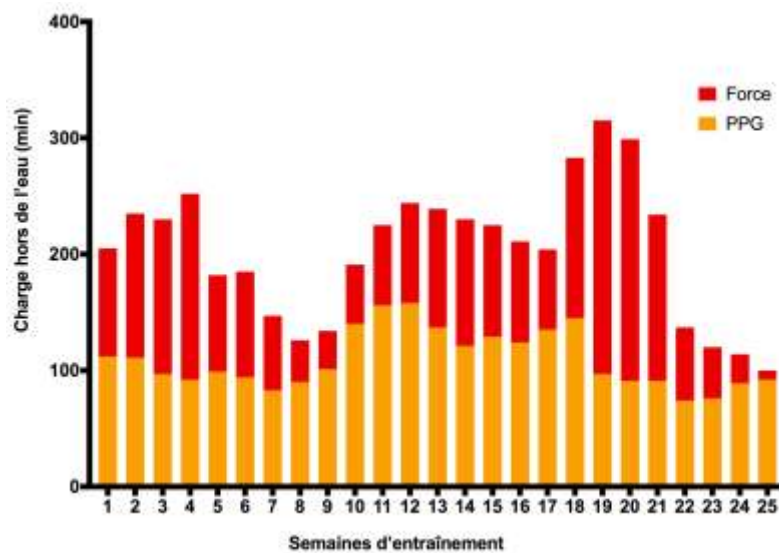


Figure 32. Evolution de la charge d'entraînement à sec (exprimée en minutes) au cours des 25 semaines précédant la compétition majeure de la saison pour les 127 nageurs de l'étude.

Discussion

La distribution de l'intensité dans les autres sports est fortement différente de celle observée dans cette étude. Ces études ont rapporté une proportion de 80% réalisée en zone 1 et de 15% réalisée en zone 2 (Seiler et Kjerland, 2006 ; Sandbaak et al., 2017). Dans notre étude, les observations faites par Hellard et al. (2006) et Avalos et al. (2003) ont été confirmées en indiquant un haut pourcentage d'entraînement nagé en zone 2. A haute intensité, la fatigue musculaire et les résistances à l'avancement augmentent fortement et impliquent une dégradation technique et une très forte hausse du coût énergétique (Zamparo et al., 2005).

D'un autre côté, les vitesses de nage inférieures à $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ sont beaucoup plus basses que celles observées en compétition. Pour ces vitesses, la coordination des bras induit des variations de vitesses intra-cycliques et entraîne une augmentation du coût énergétique (Vilas-Boas et al., 2009). Il est donc possible qu'une meilleure efficacité technique soit observée en zone 2, ce qui expliquerait la forte proportion de l'entraînement réalisé à cette intensité.

Conclusion

Nos observations ont confirmé que la distribution de l'intensité des meilleurs nageurs français se construit sur une forte proportion de l'entraînement réalisée en zone 2 (environ 45%), avec un faible part de l'entraînement réalisé à haute intensité (à peine plus de 10%). Au regard des études réalisées dans d'autres sports, une réduction du volume effectué en zone 2, contre une hausse du volume réalisé en zone 1 et 3 pourrait devenir une voie possible d'améliorations des performances.

Lien étude 1 – étude 2 :

Les résultats de cette étude confirment que la distribution de l'intensité des meilleurs nageurs français s'éloigne de celle observée dans d'autres sports. Culturellement, un travail très important est réalisé autour du seuil anaérobie et semble être utile pour mener à de hautes performances en natation.

Toutefois, avant de comparer ces deux modèles de distribution pour comprendre quels sont les effets engendrés par ces deux types d'entraînement en natation, il semble nécessaire de caractériser les réponses métaboliques des nageurs lors d'une épreuve maximale. Il paraît indispensable de bien connaître les exigences de cette discipline, en comprenant comment les réponses métaboliques peuvent être développées à l'entraînement.

Etude n°2 : Les réponses métaboliques au cours d'un 100 m nage libre chez des nageurs masculins de haut niveau

Résumé

Objectifs :

Comparer la dynamique des contributions de chaque système énergétique au cours des quatre portions consécutives d'une épreuve de 100 mètres nage libre à allure maximale.

Méthodes :

49 nageurs de compétition de haut niveau ont participé à cette étude. Ils devaient réaliser un 100 mètres à allure maximale, ainsi que trois épreuves (25 mètres, 50 mètres et 75 mètres) à une allure identique à celle du 100 mètres. Après chaque épreuve, la lactatémie a été collectée et la $\dot{V}O_2$ a été estimée durant les 20 secondes suivant l'exercice.

Résultats :

La contribution énergétique pour le 100 mètres a été de $51 \pm 8\%$ pour le système aérobie, $18 \pm 2\%$ pour le système anaérobie alactique, $31 \pm 9\%$ pour le système anaérobie lactique. La $\dot{V}O_2$ a augmenté du premier au deuxième 25 mètres : 3,5 à 4,2 L·min⁻¹, puis s'est stabilisée durant le deuxième 50 mètres. La lactatémie a augmenté graduellement de 25 mètres en 25 mètres. La puissance lactique était plus importante chez les nageurs plus âgés.

Conclusion :

Les nageurs les plus rapides sont caractérisés par une $\dot{V}O_2$ supérieure et nécessitent moins de temps pour atteindre cette $\dot{V}O_2$, qui survient approximativement à la moitié de la course (50 mètres). Les capacités anaérobies deviennent plus importantes avec l'âge. Ces résultats soulignent l'importance de développer de façon concomitante à l'entraînement, la puissance aérobie et la puissance anaérobie.

HELLARD P, PLA R, RODRIGUEZ FA, SIMBANA D, PYNE DB. Dynamics of the Metabolic Response During a Competitive 100-M Freestyle in Elite Male Swimmers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. Publiée. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0597>

Introduction

L'évaluation des capacités métaboliques et la contribution relative de chaque système énergétique dans les différentes épreuves de la natation, permet d'évaluer les effets des programmes d'entraînement (Capelli et al., 1998 ; Rodriguez et Mader, 2010). Cette évaluation est nécessaire pour les coaches et les accompagnateurs scientifiques pour monitorer l'entraînement des nageurs de haut niveau. Au sein de plusieurs groupes d'entraînement, la distribution de l'intensité est prescrite en fonction des changements des capacités métaboliques et physiologiques du nageur, durant toute sa carrière.

Les résultats observés sur les épreuves de 100 mètres indiquent des contributions différentes selon les études. Les parts de contribution aérobie-anaérobie ont été situées entre 33-67% (Capelli et al., 1998), 31-69% (Reiss et al., 2010) et 43-57% (Ribeiro et al., 1990). Une autre étude a combiné des mesures de terrain avec une simulation informatique du métabolisme du muscle et a estimé cette contribution à 41-59% (Rodriguez et Mader, 2003).

Ces résultats contradictoires peuvent s'expliquer par une différence de méthodes de recueil des données (mesure continue de la consommation d'oxygène pendant l'épreuve à l'aide d'un tuba vs extrapolation rétroactive vs nage dans une piscine à contre-courant). Pour les protocoles dans lesquels les échanges gazeux ont été mesurés en continu (Capelli et al., 1999 ; Reiss et al., 2010), une vitesse constante a été imposée et le matériel (tuba) utilisé empêchait d'atteindre des vitesses observées en compétition. Ces différences d'organisation de courses peuvent entraîner d'importantes modifications des réponses métaboliques (Jalab et al., 2011). C'est pourquoi, nous avons préféré utiliser la méthode dite de « rétroextrapolation », qui laisse libre le nageur de s'organiser de manière identique aux situations de compétition.

Il existe également des résultats contradictoires dus à la grande dispersion des âges et du niveau des nageurs étudiés. La croissance et la maturation affectent les réponses cardiovasculaires (Baxter-Jones et al., 1993 ; Kavouras et Troup, 1996) et les muscles squelettiques (Dotan et al., 2012). Durant la puberté, $\dot{V}O_{2\max}$ exprimé en valeur relative à la masse corporelle augmente modestement (Baxter-Jones et al., 1993 ; Jürimäe et al., 2007), mais des changements plus importants sont observés sur la puissance musculaire et la capacité anaérobie (Ferretti et al., 1994). Au niveau musculaire, les changements pubertaires sont associés à une augmentation de la dégradation de la phosphocréatine et une plus grande dépendance aux unités motrices glycolytiques (Dotan et al., 2012 ; Jürimäe et al., 2007). Sur des épreuves courtes de 1 à 2

minutes, les meilleurs nageurs ont un haut potentiel oxydatif (Sousa et al., 2016) et une forte puissance anaérobie (Baxter-Jones et al., 1993 ; Hawley et al., 1992).

A ce jour, aucune étude n'a comparé les réponses métaboliques sur un 100 mètres nagé à vitesse de course en fonction de l'âge et du niveau de performances. **Le but de cette étude est donc de mesurer la contribution relative des systèmes aérobie et anaérobie chez des nageurs juniors et seniors réalisant un 100 mètres dans des conditions de compétition afin de caractériser les exigences de cette épreuve au plus haut niveau.** Notre hypothèse principale suggère qu'il existe des profils différents selon l'âge et le niveau de performance. Il est probable que les nageurs les plus âgés et les plus rapides aient une capacité anaérobie plus importante et une contribution aérobie moins importante.

Méthodes

Participants

Quarante-neuf nageurs de niveau national ou international ont participé à l'étude. Le groupe comprenait 26 juniors [16 ± 1 ans, 65 ± 9 kg, 178 ± 8 cm, 510 ± 124 points Fédération Internationale de Natation (FINA); moyenne $\pm$ écart-type] et 23 seniors incluant 4 médaillés mondiaux (24 ± 5 ans, 78 ± 5 kg, 188 ± 7 cm, 640 ± 77 points FINA). Les 8 papillonnes, 8 dossistes, 8 brasseurs et 25 crawlleurs se sont entraînés 6 à 11 fois par semaines.

Protocole expérimental

Les tests ont été réalisés durant 4 jours consécutifs dans un bassin de 50 mètres. Chaque nageur a réalisé un 100 mètres à allure maximale dans sa nage de spécialité, après un échauffement standardisé. Les temps réalisés ont été [moyenne (90% IC)] : papillon : 61 s (59-63), dos : 60 s (58-62), brasse : 71 s (66-77) et nage libre : 56 s (55-58). Les jours suivants, chaque nageur a réalisé un 75 mètres, un 50 mètres et 25 mètres à la même allure que lors du 100 mètres nagé le premier jour. L'allure a été guidée avec trois méthodes complémentaires : chaque nageur disposait d'un métronome (Aqua Pacer Swimming) qui signalait l'allure tous les 12,5 m, un chercheur signalait l'allure chaque 50 mètres en tapant une perche en métal, un autre chercheur marchait le long du bassin pour garder l'allure d'un marqueur à un autre. Les nageurs ont été filmés pour mesurer leurs temps et leurs fréquence gestuelle chaque 25 m. Afin de comparer les performances dans les quatre nages différentes, toutes les performances ont été converties selon la table de cotation de la FINA.

Mesures métaboliques

Les échanges gazeux ont été mesurés immédiatement après chaque test utilisant un analyseur portable (K4b2, Cosmed, Italie) connecté à un masque oronasal. Le masque était appliqué sur le visage du nageur pendant une minute, dès que le nageur finissait sa course et sortait sa tête de l'eau. $\dot{V}O_2$ a été calculé après avoir moyenné les 20 secondes collectées après la sortie de la tête de l'eau (Costill et al., 1985). Le sang capillaire a été collecté au doigt et la concentration de lactate sanguin a été mesurée avant, puis 2, 4, 6 et 8 minutes après chaque test en utilisant un analyseur Lactate Pro (Arkray, Japon). Pour chaque test, la plus haute valeur de lactatémie a été retenue.

Calcul de la contribution métabolique

La dépense d'énergie totale pour l'épreuve du 100 mètres a été calculée en reprenant les équations présentées précédemment (voir page 34).

Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées par les co-auteurs de l'article cité ci-dessus. Des régressions multiples pas à pas ont été appliquées à chaque variable physiologique dépendante afin de quantifier leur effet sur les variables indépendantes (age, niveau et nage). Pour tous les tests, le niveau de significativité a été fixé à $p < 0,05$. Le logiciel de traitement utilisé a été la version 3.3.3 de R.

Résultats

Consommation d'oxygène et performance

Pour chacun des groupes, $\dot{V}O_2$ a augmenté de 19% (15 ; 24%) [moyenne (90% CI)] : entre le premier 25 mètres et le deuxième 25 mètres avant de se stabiliser au 75 et au 100 mètres. La lactatémie a augmenté graduellement de 25 mètres en 25 mètres (Figure 33).

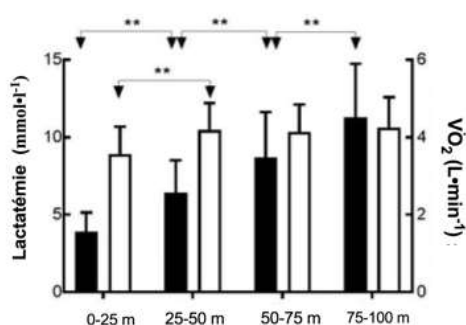


Figure 33. Evolution des valeurs de lactatémie (bandes noires) et de consommation d'oxygène (bandes blanches) après 25, 50, 75 et 100 mètres pour l'ensemble des nageurs.

Les temps et les fréquences gestuelles observées durant les 25, 50 et 75 mètres ont été identiques à ceux recueillis lors du 100 mètres à allure maximale. La vitesse a diminué de $17 \pm 7\%$ entre le premier et le deuxième 25 mètres et de $4 \pm 5\%$ entre le troisième et le quatrième 25 mètres.

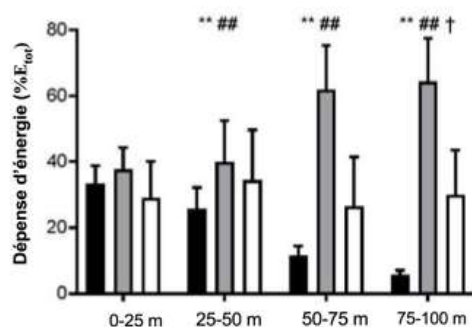


Figure 34. Evolution de la vitesse (bandes noires) et de la fréquence gestuelle (bandes blanches) après 25, 50, 75 et 100 mètres pour l'ensemble des nageurs.

Réponses métaboliques

L'énergie anéarobie alactique a diminué du premier au dernier 25 mètres (12 ± 2 , 8 ± 1 , 4 ± 1 , 2 ± 1 kJ, moyenne $\pm$ écart-type), alors que l'énergie aérobie a augmenté du 50 au 100 mètres (13 ± 4 , 23 ± 3 , 25 ± 3 kJ). L'énergie anaérobie lactique a été similaire tout au long de la course (12 ± 7 , 13 ± 9 , 12 ± 9 , 13 ± 9 kJ). La dépense d'énergie totale a diminué du premier au deuxième 25 mètres (39 ± 7 vs 34 ± 10 kJ), augmenté du deuxième au troisième 25 mètres (34 ± 10 vs 39 ± 9 kJ, $p < 0,01$), puis s'est stabilisée sur le dernier 25 mètres (39 ± 9 ; 40 ± 9 kJ). La contribution du système anaérobie alactique sur la dépense d'énergie totale a diminué de 25 mètres en 25 mètres, alors que la part aérobie a augmenté de manière substantielle après le 75 mètres.

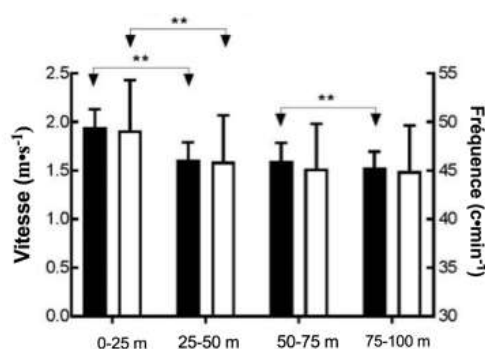


Figure 35. Evolution de la dépense d'énergie (en pourcentage de la dépense d'énergie totale) : alactique (bandes noires), lactique (bandes blanches), aérobie (bandes grises) après 25, 50, 75 et 100 mètres pour l'ensemble des nageurs de l'étude.

La dépense d'énergie totale et la puissance de chaque système énergétique a été fortement associée à l'âge (figure 36). Les valeurs absolues de lactatémie, de $\dot{V}O_2$, de puissance alactique et de puissance lactique ont été substantiellement plus hautes chez les seniors. En termes de contribution relative, les seniors ont eu une plus grande part de dépense anaérobie et une plus petite part de dépense aérobie que les juniors.

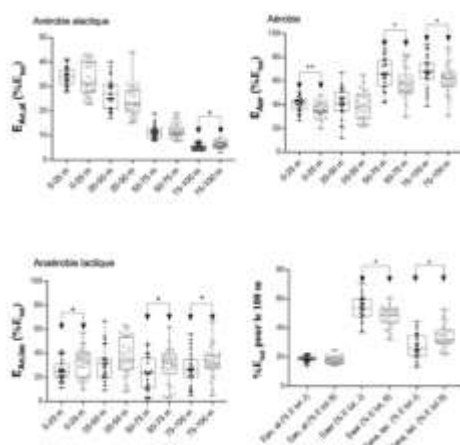


Figure 36. Evolution de la contribution de chaque système énergétique après 25, 50, 75 et 100 mètres pour les juniors (points noirs) et les seniors (points gris).

Mais de plus amples relations ont été évidentes concernant le niveau de performance (figure 37). Le groupe de niveau national à international a connu des valeurs absolues plus hautes de lactatémie, de $\dot{V}O_2$, de dépense d'énergie totale, de puissance alactique et lactique que les nageurs de niveau régional. Ils ont également eu une contribution anaérobie plus importante, et une contribution aérobie moins importante que les nageurs régionaux.

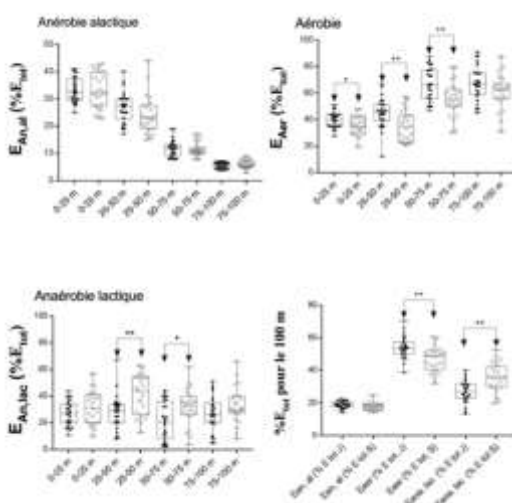


Figure 37. Evolution de la contribution de chaque système énergétique après 25, 50, 75 et 100 mètres pour les nageurs régionaux (points noirs) et internationaux (points gris).

Discussion

Les valeurs de $\dot{V}O_2$ observées ($4,2 \pm 0,8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) sont similaires à celles rapportées dans la littérature sur des nageurs de niveau similaire (Capelli et al., 1998 ; Zamparo et al., 2011 ; Barbosa et al., 2006) mais plus hautes que pour des nageurs de moins bon niveau (Reiss et al., 2010 ; Jalab et al., 2011). Les valeurs de lactatémie observées à la fin du 100 mètres sont également similaires à celles rapportées précédemment (Capelli et al., 1998 ; Rodriguez et al., 2003). La vitesse de course et la fréquence gestuelle ont baissé durant le 100 mètres, comme cela a déjà été observé lors de compétitions (Seifert et al., 2007). Par ailleurs, la dépense d'énergie totale augmente du premier 25 au deuxième 50 mètres, avant de retomber d'environ 20% lors du deuxième 50 mètres. Ces changements sont probablement liés à la rapide déplétion de la phosphocréatine musculaire et de la rapide augmentation de $\dot{V}O_2$. Ce pattern est cohérent avec les adaptations métaboliques observées durant des exercices maximaux d'une durée similaire (Rodriguez et Mader, 2010).

Ces données ont montré une rapide augmentation des valeurs de $\dot{V}O_2$, qui ont atteint leurs valeurs maximales au 50 mètres. Cette augmentation semble plus rapide que celle observée par Jalab et al. (2011) chez des nageurs de niveau inférieur, qui atteignaient leur $\dot{V}O_{2\text{pic}}$ lors du 75 mètres. La haute vitesse des meilleurs nageurs de notre étude induit un ajustement rapide de $\dot{V}O_2$, avec une fraction de $\dot{V}O_{2\text{pic}}$ atteinte très rapidement. Cette vitesse d'ajustement a déjà été observée dans d'autres sports durant des exercices à intensité maximale (Barstow, 1994). La cinétique de $\dot{V}O_2$ est plus rapide lorsque l'intensité de l'exercice, pour peu qu'il soit supramaximal, augmente, et en conséquence dans le cas où les valeurs de lactatémie sont également hautes (Barstow, 1994). En plus, dans notre étude, la vitesse du premier 25 mètres était plus importante que celle observée dans l'étude de Jalab et al. (2011) et dans d'autres études où le départ se faisait au bord du mur sans le plongeon, menant à une demande énergétique plus importante.

Jusqu'au 75 mètres, la dépense aérobie et anaérobie alactique suivent le modèle établi des systèmes énergétiques durant un exercice maximal (Rodriguez et Mader, 2010 ; Di Prampero et Ferretti, 1999 ; Gastin, 2001). Du début à la fin du 100 mètres, la contribution alactique diminue et la contribution aérobie augmente, alors que la contribution lactique reste stable. Cette stabilisation n'est pas cohérente avec l'augmentation de puissance lactique d'environ 50% entre 10 et 40 secondes lors d'un effort maximal d'une minute (Di Prampero et Ferretti, 1999).

Il est possible que dans cette étude, les nageurs n'ont pas sur-sollicité la glycolyse anaérobie à cause de l'allure guidée qui leur était imposée et qui a pu atténuer les réductions de puissance et d'amplitude de nage à la fin de la course (Olesen et al., 1994).

Les nageurs seniors ont obtenu des valeurs de lactatémie, de $\dot{V}O_2$ et de dépense d'énergie plus hautes que les juniors. Chez les hommes, les changements anthropométriques lors de la puberté sont associés à une augmentation du potentiel énergétique (augmentation de la taille, du muscle, de la masse corporelle, de la force et de la puissance anaérobie) (Ferretti et al., 1994). Pour le même coût énergétique, l'amélioration des capacités métaboliques durant la puberté permet une amélioration des performances. Cette augmentation est accrue chez des sportifs et continue après la puberté, lorsque ces derniers élèvent progressivement leur charge et leur volume d'entraînement (Ingjer, 1992). Cette hausse de la contribution anaérobie chez les seniors confirme la plus grande dépendance au système glycolytique après la puberté (Dotan et al., 2012).

Cette étude a également mise en évidence la forte relation entre la performance sur 100 mètres et la puissance maximale aérobie. La forte demande aérobie est identifiée comme déterminante dans les sports de moyenne et de longue distance (Ingjer, 1992). Pour les épreuves plus courtes, les résultats se contredisent : certains auteurs ont rapporté que les valeurs de $\dot{V}O_{2pic}$ ou de $\dot{V}O_{2max}$ sont de bons prédicteurs de la performance (Sousa et al., 2016 ; Costill et al., 1985 ; Alves et al., 2009), alors que d'autres n'ont pas observé de relations (Zamparo et al., 2000). Nos résultats confirment que la production d'énergie aérobie est importante (Costill et al., 1985), mais que l'interaction des autres voies ou filières métaboliques joue également un rôle (Gastin, 2001).

Les plus hautes valeurs de $\dot{V}O_2$ ont été observées après le 50 mètres chez les nageurs les plus rapides, et seulement après la fin du 100 mètres chez les nageurs les plus lents. Les meilleurs nageurs montrent un ajustement très rapide de la $\dot{V}O_2$ qui leur permet de réduire l'amplitude de la dette d'oxygène et de réduire leur dépendance à la glycolyse anaérobie au début de l'épreuve (Alves et al., 2009). Ce rapide ajustement est un indice du potentiel oxydatif et a été relié comme un indicateur de performance en natation (Barstow, 1994). Cette rapide augmentation de $\dot{V}O_2$ diffère avec les résultats d'études précédentes, qui ont rapporté une augmentation continue de la $\dot{V}O_2$ jusqu'à la fin du 100 mètres (Capelli et al., 1998 ; Ribeiro et al., 1990 ; Rodriguez et al., 2016 ; Gastin, 2001). Il est fort probable que les conditions d'expérimentation entrent en jeu (niveau des nageurs, allure guidée, etc...) et donnent des résultats différents. Dans notre étude, la vitesse lors du premier 25 mètres est supérieure à toutes celles observées précédemment, ce

qui peut expliquer la rapide montée de $\dot{V}O_2$. De plus, la baisse de vitesse après les 3 derniers 25 mètres est supérieure à celle observée dans les études où l'allure était constante (Capelli et al., 1998 ; Ribeiro et al., 1990 ; Rodriguez et al., 2016 ; Gastin, 2001), ce qui peut expliquer la stabilisation de $\dot{V}O_2$ comparée à l'augmentation croissante des autres études.

Les résultats de notre étude ne soutiennent pas l'assertion que la baisse de $\dot{V}O_2$ à la fin du 100 mètres est corrélée à une inhibition de l'activité mitochondriale causée par une acidose excessive ou une déplétion des stocks de phosphocréatine (Hirvonen et al., 1992). Les mesures de lactatémie $< 13 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ chez les nageurs plus âgés et plus rapides sont beaucoup plus basses que celles généralement observées chez les nageurs de 100 mètres. Bien que les valeurs de lactatémie étaient similaires entre les meilleurs et les moins bons nageurs, ces derniers ont montré une augmentation progressive de $\dot{V}O_2$ durant l'épreuve. Toutefois, il est probable que l'augmentation de la concentration de lactate musculaire contribue à une baisse de puissance, d'amplitude et de vitesse de nage à la fin du 100 mètres (Ribeiro et al., 2017 ; Seifert et al., 2007).

Conclusion

Les données obtenues dans cette étude peuvent devenir utiles pour déterminer les capacités métaboliques chez des nageurs juniors et seniors. Les contributions relatives observées ont été de 18% pour le système anaérobie alactique, 31% pour le système anaérobie lactique, 51% pour le système aérobie. Durant la course, la contribution alactique a diminué, la contribution aérobie a augmenté et la contribution lactique est restée stable. Les seniors avaient des valeurs de lactatémie, de $\dot{V}O_2$, de dépense d'énergie totale, alactique et lactique plus hautes que les juniors. Les meilleurs nageurs exprimaient un potentiel oxydatif plus important, avec des valeurs de $\dot{V}O_2$ et de puissance aérobie plus hautes, et mettaient moins de temps pour atteindre leurs plus hautes $\dot{V}O_2$.

Lien étude 2 – étude 3 :

Les programmes d'entraînement peuvent donc être construits en fonction de la période de la carrière du nageur. Les entraîneurs doivent prendre en compte la forte augmentation de la puissance anaérobie durant la période pubertaire. En lien avec la faible augmentation des capacités aérobie, la contribution anaérobie augmente avec l'âge.

Selon le profil du nageur, l'entraîneur peut alors adapter son entraînement pour maximiser l'une ou l'autre voie métabolique. La distribution de l'intensité à l'entraînement devrait avoir un impact important sur le développement de ces capacités métaboliques et engendrera des résultats différents selon cette distribution.

Etude n°3 : Distribution de l'intensité à l'entraînement en natation : comparaison d'un modèle au seuil avec un modèle polarisé

Résumé

Objectifs :

Comparer les effets de performance, physiologiques et de fatigue entre un entraînement polarisé et un entraînement au seuil.

Méthodes :

22 nageurs ont pris part à cette étude. Le protocole utilisé a été conduit sous forme de cross-over où les 22 nageurs ont suivi aléatoirement les deux types d'entraînement durant deux périodes de six semaines. L'intensité d'entraînement a été quantifiée en trois zones de type 80/5/15% pour le groupe polarisé et de type 65/25/10 pour le groupe seuil.

Résultats :

Les résultats ont montré une amélioration de 0,97% des performances après l'entraînement polarisé, contre une augmentation de 0,09% après l'entraînement au seuil. Aucune différence significative n'a été rapportée concernant les adaptations physiologiques entre les deux groupes. Toutefois, l'entraînement polarisé a engendré moins de fatigue perçue et un meilleur état de récupération perçu.

Conclusion :

Ces observations ont montré qu'un modèle polarisé en natation pouvait permettre d'améliorer les performances des nageurs après une période de six semaines, avec des gains légèrement supérieurs à un entraînement au seuil. Cet entraînement polarisé a engendré moins de fatigue perçue aux nageurs, tout en ayant permis d'élever le pourcentage nagé à haute intensité (15 vs 10%). Cette hausse n'a pas entraîné d'adaptations physiologiques significatives, en revanche, nous pouvons supposer qu'elle ait permis d'induire des adaptations techniques positives.

PLA R, LE MEUR Y, AUBRY A, TOUSSAINT JF, HELLARD P. Effects of a 6-week period of polarized or threshold training on performance and fatigue in elite swimmers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. Publiée.

<https://doi:10.1123/ijsp.2018-0179>

En natation, la charge d'entraînement représente l'un des principaux paramètres sur laquelle les entraîneurs s'appuient pour améliorer la performance de leurs nageurs. Depuis une vingtaine d'années, plusieurs études observationnelles (Avalos et al., 2003 ; Hellard et al., 2017 ; Mujika et al., 1995) et rapports d'entraîneurs dans des congrès internationaux ont permis de décrire le type d'entraînement prescrit aux meilleurs nageurs internationaux (Barnier, 2012 ; Vergnoux, 2014).

Deux grands types de distribution de l'entraînement ont été présentés. Le premier consiste à s'entraîner majoritairement en zone 1 (environ 90% du volume total d'entraînement) et le reste en zone 2 et 3 (Mujika et al., 1995). L'autre type d'entraînement a été observé chez les nageurs français internationaux ces dix dernières années et se construit sur une forte part de l'entraînement réalisée en zone 2 (entre 30 et 40%) (Avalos et al., 2003 ; Hellard et al., 2017).

Au niveau expérimental, plusieurs études sur des nageurs de niveau moyen ont montré que l'élévation du volume réalisé à haute intensité (zone 3) permettait d'induire des adaptations physiologiques et des gains de performances significatifs (Nugent et al., 2017). Une étude d'Arroyo-Toledo a comparé deux modèles d'entraînement avec des distributions d'intensité différentes chez des nageurs de niveau régional (Arroyo-Toledo et al., 2013). Les meilleures progressions ont été observées chez les nageurs du groupe où l'entraînement était plus faible en volume mais plus important à haute intensité.

Depuis une quinzaine d'années, plusieurs études ont montré que les meilleurs sportifs du monde s'entraînaient selon un modèle polarisé (Munoz et al., 2014 ; Tonnessen et al., 2015 ; Mujika et al., 2014). Cet entraînement consiste à s'entraîner majoritairement en zone 1 (80%), associé à une part relativement importante réalisée en zone 3 (15%). La zone 2 est très peu utilisée avec ce modèle. Les études expérimentales ont confirmé l'efficacité de cette distribution de l'intensité, avec une amélioration des performances de 4 à 8% et des capacités physiologiques de 5 à 10% (Neal et al., 2013 ; Munoz et al., 2014 ; Stoggl et Sperlich, 2014 ; Helgerud et al., 2007 ; Laursen et Jenkins 2002) après 6 à 52 semaines d'entraînement.

Le but de cette étude est d'étudier les effets d'un entraînement traditionnel dit « au seuil » en natation, principalement basé sur le développement du seuil anaérobie, avec un fort pourcentage de travail autour de cette zone 2. Ce type d'entraînement contredit les dernières recherches sur la distribution de l'intensité chez les sportifs de haut niveau, où

un entraînement majoritairement concentré sur un travail aérobic (environ 80%) associé à un entraînement à allures de course (environ 15%) induit de meilleures performances. Une comparaison de ces deux types d'entraînement permettra de voir les différentes réponses de performance et physiologiques.

Méthodes

Participants

33 nageurs de niveau national ont participé à cette étude. Durant les 6 mois précédant l'étude, tous les sujets s'entraînaient entre 15 et 18 heures par semaine, au cours de 8 ± 2 séances hebdomadaires. Les nageurs ont été exclus s'ils ont eu des blessures ou maladies nécessitant un traitement médical ou ayant manqué l'entraînement durant plus d'une semaine. La cohorte finale a été de 22 nageurs (9 crawlleurs, 5 brasseurs, 4 papillonneurs and 4 dossistes).

Design de l'étude

Un cross-over intra-sujets a été utilisé. La durée totale de l'étude a été de 28 semaines. Afin de minorer les effets retardés de l'entraînement antérieur, une période pré-expérimentale a été constituée d'une semaine d'arrêt complet de l'entraînement, d'une semaine d'entraînement modéré, et d'une période de trois semaines d'entraînement identique. Des tests de familiarisation ont été réalisés, pour accoutumer les sujets aux mesures réalisées. L'étude a été composée de deux périodes de six semaines (P1 et P2) auxquelles les sujets ont été aléatoirement assignés. Initialement, 33 nageurs ont intégré l'étude. 16 ont été placés dans le groupe polarisé et 17 dans le groupe seuil lors de la première période. Finalement, 22 nageurs ont participé à l'intégralité de l'étude. C'est pourquoi, pour P1, 13 participants ont fait partie du groupe seuil et 9 du groupe polarisé. Les deux groupes ont été inter-changés lors de P2.

Entraînement

A partir d'un test de 5 x 200m, tous les entraînements ont été catégorisés en 3 niveaux d'intensité, en s'inspirant des travaux de Mujika (1995) : sous $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (zone 1), entre 2 et $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (zone 2), au-dessus de $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (zone 3). Au cours de chaque session d'entraînement la précision des intensités a été contrôlée par des mesures de lactatémie, correspondant aux valeurs observées lors du premier pré-test. Tous les participants ont suivi le même entraînement pendant 6 semaines.

Tests de performance, physiologiques et questionnaires de fatigue

L'ensemble des tests physiologiques et de performance ont été mesurées lors de pré-tests et de post-tests pour chaque période de six semaines d'intervention. Avant chaque session de mesures les nageurs ont conservé le même régime alimentaire durant 4 jours (les aliments ingérés ont été consignés dans un carnet alimentaire prescrit par une nutritionniste) et a été reproduit avant chaque session de tests. La session d'entraînement la veille du pré-test a été standardisée, avec un exercice aérobic léger de 90 minutes. La durée entre le repas et le test a été identique pour chaque test. Les participants n'ont pas ingéré de caféine ou d'alcool au moins 3 heures avant chaque session de tests.

Test progressif

Un test incrémenté en crawl pour déterminer V_{O2max} a été réalisé. Il consistait à réaliser un 5 x 200 m jusqu'à épuisement avec un incrément de $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et une minute de repos entre chaque palier. A l'arrivée de chaque palier, la lactatémie sanguine a été collectée avec un lactate pro 2 (Arkray). Les prélèvements capillaires ont été effectués au doigt. Après le dernier palier, les analyses de gaz ont été réalisées immédiatement à l'aide d'un analyseur de gaz K4b2 (Cosmed), connecté à un masque oronasal (Hans Rudolph). Le masque a été appliqué au nageur dès que sa tête était sortie de l'eau pendant 30 secondes. Les 20 premières secondes ont servi à l'analyse (Laffite et al., 2004).

Test maximal de performance

L'échauffement a été standardisé. Après 30 minutes de repos, les sujets ont réalisé un 100 m à allure maximale dans leur nage de spécialité dans des conditions similaires à celles des compétitions. A l'arrivée de l'épreuve, la lactatémie sanguine et la consommation d'oxygène a été mesurée comme décrit précédemment.

Suivi des états de l'humeur et de la qualité du sommeil

Les nageurs devaient répondre à un petit questionnaire de bien-être comme décrit par Noon et al. (2015), tous les matins avant le petit-déjeuner, durant les six semaines d'intervention. Afin de contrôler leurs perceptions de bien-être sur 7 items : motivation à s'entraîner, qualité de la nuit précédente, qualité de la récupération, appétit, sentiment de fatigue, niveau de stress et niveau de douleurs musculaires. Pour rendre l'utilisation plus facile chez un jeune public, ce questionnaire a été réalisé après une période d'apprentissage contrôlée grâce à une application téléphonique où les nageurs devaient déplacer un curseur (sur une échelle de 1 à 100).

Analyses statistiques

Les données ont été analysées en utilisant des statistiques inférentielles (Hopkins et al., 2009). Toutes les données ont été *log-transformées* avant l'analyse afin de réduire les biais des erreurs de non-uniformité. L'amplitude des changements (en pourcentage) de performance a été interprété en utilisant le coefficient de variation entre les deux pré-tests (1,6%) avec des valeurs de 0,5% (petit), 1,4% (modéré), 2,6% (important), 4,0% (très important) and 6,4% (extrêmement important) établies comme critères de différences sur les changements de performance entre les tests (Hopkins et al., 1999). Pour tous les autres paramètres, le *smallest worthwhile change* (SWC) a été utilisé, il a été défini comme le plus petit changement utile basé sur les tailles d'effets de Cohen (0.2 x écart-type entre athlètes) (Cohen, 1988). Les valeurs de seuil ont été de : 0,2 (trivial), > 0,2 (petit), > 0.6 (modéré), > 1.2 (important), > 2.0 (très important), and > 4.0 (extrêmement important) (Hopkins et al., 2009). Le pourcentage de chances d'observer des différences plus ou moins grandes a été évalué qualitativement comme suit : <1%, presque certainement pas; 1%–5%, très probablement pas; 5%–25%, peu probable; 25%–75%, possible; 75%–95%, probable; 95%–99%, très probable; and > 99%, presque certain. Si les chances d'avoir un effet positif et négatif étaient toutes les deux > 5%, la vraie différence a été estimée comme pas claire.

Résultats

Le volume total en kilomètres et la charge d'entraînement n'ont pas été significativement différents entre POL et SEUIL (Tableau 29). La distribution de l'intensité pour POL était de (81/4/15) et pour SEUIL (65/25/10), et a montré une part d'entraînement en zone plus importante réalisée en zone 2 pour le groupe SEUIL.

	Unités	Base	POL	SEUIL
Volume total	Km par semaine	37 ± 3	42 ± 4	42 ± 4
Volume en Zone 1	% du volume total	70 ± 6	81 ± 3	66 ± 5*
Volume en Zone 2	% du volume total	20 ± 4	4 ± 1	25 ± 2*
Volume en Zone 3	% du volume total	10 ± 2	15 ± 2	9 ± 3*

Tableau 29. Volume total réalisé avant la période d'intervention (base) et après les six semaines d'entraînement polarisé (POL) et au seuil (SEUIL). Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type.

Une probable petite amélioration de la performance a été observée pour le groupe POL (0,97% ± 1,02% ; moyenne ± 90% intervalle de confiance), alors que les changements de performance pour le groupe SEUIL ont été incertains (0,09% ± 0,94%) (Tableau 30). Les améliorations de

performance du groupe POL se sont trouvées possiblement plus importantes que pour le groupe SEUIL ($0,89\% \pm 1,31\%$). Il n'y a pas eu d'effet sexe.

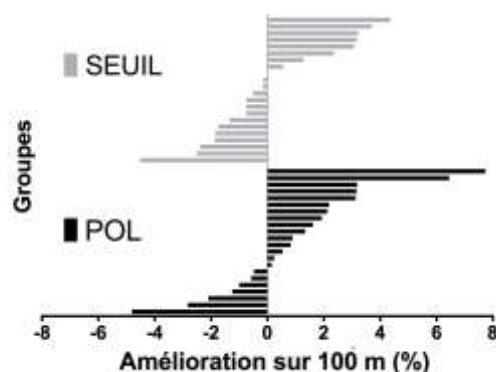


Figure 38. Evolution des performances sur 100 mètres (en pourcentage) pour chaque individu et pour chaque groupe d'intervention. (15 nageurs ont amélioré leur performance à l'issu des 6 semaines d'entraînement polarisé, alors que seulement 9 nageurs ont amélioré leur performance à l'issu des 6 semaines d'entraînement au seuil).

Les changements de valeurs de lactatémie après la période d'intervention ont été incertains pour les groupes POL ($12,4 \pm 4,2\%$ vs. $12,9 \pm 3,7\%$ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) et SEUIL ($11,8 \pm 3,6\%$ vs. $12,5 \pm 3,6\%$). Aucune différence entre POL et SEUIL n'a été observée ($2,0 \pm 14,4\%$). Une possible petite augmentation a été observée pour le groupe SEUIL pour les valeurs de V4 ($0,7 \pm 1,6$) et de $\dot{V}\text{O}_2$ ($5,8 \pm 9,8\%$). Pour le groupe POL, les résultats ont été incertains.

		Moy $\pm$ ET	Moy $\pm$ ET	%moy $\pm$ IC	% Chance	$\Delta\%$ moy $\pm$ 90% IC	% Chance
100m (s)	POL	$68,7 \pm 8,0$	$68,1 \pm 8,0$	$-1,0 \pm 1,0$	1/19/80	$0,89 \pm 1,31$	4/25/70
	SEUIL	$68,4 \pm 8,3$	$68,4 \pm 8,6$	$-0,1 \pm 0,9$	14/64/22		
La_{max} (mmol·L⁻¹)	POL	$12,4 \pm 4,2$	$12,9 \pm 3,7$	$7,4 \pm 10,9$	1/59/46	$2,0 \pm 14,4$	11/65/23
	SEUIL	$11,8 \pm 3,6$	$12,5 \pm 3,6$	$5,3 \pm 9,5$	2/62/36		
V4 (m·s⁻¹)	POL	$1,32 \pm 0,07$	$1,33 \pm 0,08$	$0,89 \pm 1,3$	1/64/35	$-0,72 \pm 1,60$	38/58/5
	SEUIL	$1,32 \pm 0,06$	$1,34 \pm 0,06$	$1,61 \pm 1,0$	0/15/85		
$\dot{V}\text{O}_{2\text{pic}}$ (ml·min⁻¹·kg⁻¹)	POL	$56,0 \pm 11,3$	$55,9 \pm 13,6$	$-0,9 \pm 7,5$	17/74/9	$-5,8 \pm 9,8$	58/39/3
	SEUIL	$56,4 \pm 12,4$	$58,7 \pm 9,7$	$5,2 \pm 6,5$	1/44/55		

Tableau 30. Valeurs moyennes ($\pm$ écart-type) du temps sur 100 mètres, de lactatémie, de vitesse associée à 4 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, de $\dot{V}\text{O}_{2\text{pic}}$ pour le groupe polarisé et le groupe seuil. Le pourcentage de chance de résultats nocif/trivial/bénéfique est également présenté.

Les questionnaires des états de l'humeur perçue ont montré que la qualité de récupération du groupe POL était probablement meilleure que celle du groupe SEUIL durant les trois dernières semaines de la période d'intervention.

Variable	Groupe	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Fatigue	POL	69 ± 24	65 ± 18	64 ± 27	59 ± 25	63 ± 23*	66 ± 21
	SEUIL	63 ± 26	65 ± 27	63 ± 31	59 ± 24	53 ± 27	57 ± 31
Récupération	POL	40 ± 17	42 ± 16 [#]	44 ± 15 [#]	41 ± 13 ^{*##}	44 ± 16 ^{*##}	51 ± 17 ^{*#}
	SEUIL	43 ± 17	40 ± 19	41 ± 18	35 ± 17	35 ± 18	43 ± 18

Tableau 31. Valeurs moyennes ($\pm$ écart-type) de la fatigue perçue et de la qualité de récupération perçue pour le groupe polarisé (POL) et le groupe seuil (SEUIL) tout au long des 6 semaines d'intervention. Différences observées entre POL versus SEUIL, *probables, **très probables. Différences observées des changements de POL versus ceux de SEUIL depuis la semaine 1, [#]probables, ^{##}très probables.

Discussion

Les petits gains en performance observés après l'entraînement polarisé confirment la possible efficacité de ce type d'entraînement chez des nageurs de haut niveau. Ces résultats sont en accord avec des études précédentes chez des triathlètes (Mujika, 2014), des cyclistes (Neal et al., 2013) et des rameurs (Ingham et al., 2008). Mais contrairement à ces études, l'amélioration des performances n'a pas été associée à des améliorations physiologiques. Ces études ont rapporté des améliorations de $\dot{V}O_{2max}$ (Ingham et al., 2008 ; Sandbakk et al., 2013 ; Stoggl et Sperlich, 2014 ; Helgerud et al., 2007) et de V_4 (Neal et al., 2013 ; Ingham et al., 2008 ; Stoggl et Sperlich, 2014 ; Helgerud et al., 2007), alors que nous n'avons pas trouvé de relations significatives dans notre étude.

Les questionnaires ont montré que les nageurs du groupe POL ressentait un meilleur état de récupération que ceux du groupe SEUIL. Pour ce groupe, la qualité de récupération a diminué jusqu'à la cinquième semaine, et leur niveau de fatigue perçue était supérieure à celui du groupe POL. La fatigue perçue augmente généralement avec l'élévation de la charge d'entraînement (Gonzales-Boto et al., 2008). Chez des nageurs, Chatard et al., (2003) en utilisant un court questionnaire de fatigue, ont montré que les scores de fatigue étaient fortement corrélés à la performance : les nageurs ayant rapporté les plus hauts scores de fatigue avaient réalisé les performances les moins bonnes. Dans notre étude, il est possible que les nageurs du groupe SEUIL aient accumulé trop de fatigue pour améliorer leur performance. La durée courte de l'affûtage ne leur a sans doute pas permis de récupérer après une haute part de l'entraînement réalisée à moyenne ou haute intensité (35% en zones 2 et 3). D'un autre côté, les nageurs du groupe POL ont bénéficié d'un meilleur état de récupération et il a été associé à des performances meilleures. Ce processus soutient l'hypothèse que cette approche induit une fatigue moins importante que l'entraînement au seuil.

L'amélioration des performances dans le groupe POL a été accompagnée d'un entraînement à haute intensité plus important dans ce groupe que dans le groupe seuil (15% vs 9%). Une récente étude a souligné l'importance de s'entraîner autour des intensités de course (Kenneally et al., 2017). Un entraînement qui incorpore une large part d'entraînement à haute intensité semble faciliter les adaptations techniques, en améliorant la fréquence de nage tout en conservant une bonne amplitude et améliore la puissance maximale aérobie et anaérobie (Termin et Pendergast, 2000).

Ces résultats montrent qu'une approche basée sur la proportion d'entraînement réalisée à allures de courses est intéressante pour distribuer de manière optimale l'intensité à l'entraînement. Les entraîneurs doivent prendre en considération les potentiels impacts positifs sur la technique et les adaptations physiologiques avec une telle approche.

Nous avons observé de petits effets sur la performance et aucun sur les adaptations physiologiques. Il aurait été intéressant d'observer ces effets sur une période d'intervention plus longue, avec une augmentation supérieure de la charge d'entraînement et avec une durée d'affûtage plus grande.

En effet, dans la plupart des études qui ont comparé l'entraînement polarisé et l'entraînement au seuil, l'augmentation de la charge était beaucoup plus importante (après une période de repos ou après une période de charge légère). Dans notre étude, la charge n'a augmenté que de 10% pendant la période d'intervention, puisque les nageurs s'entraînaient déjà fortement avant l'étude. C'est sans doute pour cette raison que seulement 55% des nageurs ont amélioré leur performance à l'issue de l'intervention.

La majorité des études ayant montré des adaptations physiologiques après l'entraînement avaient une durée d'au moins 9 semaines (Munoz et al., 2014 ; Ingham et al., 2008 ; Stoggl et Sperlich, 2014). Dans notre étude, le pic de charge se situait une semaine avant les posts-test, ce qui a probablement augmenté la fatigue biologique, comme cela a déjà été observé chez des nageurs de même niveau (Mujika et al., 1996 ; Thomas et Busso, 2005).

Enfin, la durée d'affûtage était de 3 à 5 jours, alors que la littérature recommande une durée de 2 à 3 semaines (Mujika et al., 1996 ; Atlaoui et al., 2006). Cet affûtage aurait sans doute permis de voir des gains de performance plus importants.

Enfin, dans cette étude, les nageurs ont réalisé un test de performance sur 100 mètres. Il serait intéressant de voir si les résultats auraient été les mêmes sur une distance supérieure. De plus,

nous n'avons pas pu collecter les paramètres biomécaniques, qui sont pourtant influencés par la distribution de l'intensité à l'entraînement (Wakayoshi et al., 1993 ; Termin et Pendergast, 2000).

Conclusion

Cette étude a permis de comparer les effets d'un entraînement polarisé avec un entraînement au seuil sur la performance, les adaptations physiologiques et la fatigue perçue. Une légère amélioration a été observée pour les nageurs du groupe POL, contrairement aux nageurs du groupe SEUIL. Cette amélioration a été associée à une plus grande part de l'entraînement réalisé en zone 3, qui représente l'allure de course. Cette zone semble favoriser les adaptations techniques à court terme, et peut être des adaptations physiologiques à plus long terme. Les nageurs du groupe POL ont également rapporté une meilleure récupération que les nageurs du groupe SEUIL. Ces derniers ont sans doute subi une fatigue plus importante causée par la somme totale du volume nagé en zones 2 et 3. Les trois jours d'affûtage n'ont pas été suffisants pour leur permettre une récupération suffisante. Ces résultats rappellent l'importance de monitorer l'entraînement durant les périodes de fortes charges.

Lien étude 3 – étude 4 :

L'entraînement polarisé semble être une option supplémentaire pour les entraîneurs qui permet d'induire des gains en performance, sans laisser une fatigue importante. Il favorise le travail à haute intensité et la récupération. Ce constat vient contrecarrer les études observationnelles rapportant un entraînement orienté autour d'un fort travail réalisé autour du seuil anaérobie en natation.

Malgré qu'aucune différence significative pour les adaptations physiologiques ne soit apparue entre les deux types d'entraînement, il a été observé que les nageurs du groupe polarisé ont ressenti une fatigue moins importante que ceux du groupe seuil. Au-delà des réponses métaboliques au cours des tests de performance, il semble intéressant d'investiguer d'autres changements de l'organisme, en particulier au niveau biologique. Des analyses métabolomiques permettant d'observer les changements de milliers de métabolites dans l'organisme pourraient être une technique adaptée, afin de mettre en relation le type d'entraînement, la fatigue et les perturbations biologiques associées.

Etude n°4 : Exploration des perturbations biologiques chez des nageurs de haut niveau selon le type d'entraînement et l'état de fatigue

Résumé

Objectifs :

Explorer les changements des métabolites de l'organisme après une période de six semaines, en fonction du type d'entraînement et de l'état de fatigue.

Méthodes :

22 nageurs ont participé à cette étude. Le protocole utilisé a été conduit sous forme de cross-over où les 22 nageurs ont suivi aléatoirement deux types d'entraînement : polarisé (POL) et seuil (SEUIL) durant deux périodes de six semaines. L'état de fatigue a été estimé par l'utilisation de questionnaire de fatigue perçue. Une approche métabolomique non ciblée par spectrométrie de masse a permis l'identification de milliers de molécules dans l'organisme.

Résultats :

Les résultats de cette étude mettent en avant plusieurs changements biologiques associés à des états de fatigue et au mode d'entraînement. Plusieurs métabolites de l'organisme ont connu des variations significatives durant la période d'intervention tels que des dérivés de la tyrosine, la carnitine et la progestérone. Ces métabolites ont déjà été remarqués comme des marqueurs de la fatigue après un exercice physique et ces changements montrent qu'il est possible d'identifier des métabolites discriminants, selon l'entraînement et la fatigue.

Conclusion :

Ces résultats ont renforcé les conclusions de l'étude précédente, en montrant que la fatigue perçue pouvait s'expliquer par des perturbations biologiques, qui engendraient principalement une fatigue centrale de l'organisme. Des outils de contrôle de l'état de fatigue centrale semblent nécessaires pour réguler la charge d'entraînement.

PLA R, PUJOS E, DURAND S, BRANDOLINI M, CENTENO D, TOUSSAINT JF, HELLARD P. Non-targeted metabolomics analyses by mass spectrometry to explore metabolic stress after six training weeks in elite swimmers. *Journal of Sports Science*. *Soumis*.

Introduction

L'analyse du métabolisme des sportifs de haut niveau est un challenge. L'entraînement des athlètes de haut niveau peut entraîner des altérations sur leur profil métabolique, largement dépendant par le type, la durée et l'intensité de l'entraînement (Al-Khelaifi et al., 2018). Dans cette voie, plusieurs marqueurs (hormonaux, immunitaires, tests de performance, tests psychologiques et biochimiques) sont utilisés pour monitorer la charge d'entraînement et détecter le syndrome de surentraînement (Meeusen et al., 2013). Toutefois, certaines études ont mis en évidence que ces types de tests n'étaient pas suffisants pour détecter des changements physiologiques avant et après une période d'entraînement alors que la métabolomique permettait d'observer des variations plus claires (Yan et al., 2009). Il semble alors essentiel d'obtenir une compréhension plus large des changements du profil métabolique d'un athlète en réponse à l'entraînement.

La métabolomique est une technologie récente qui étudie de petites molécules (métabolites) du système biologique et utilise principalement deux techniques d'analyses pour établir le profil métabolomique : la spectrométrie de masse (MS) et la spectroscopie (NMR). La métabolomique a été définie comme "la mesure de réponses métaboliques multivariées du système cellulaire" (Nicholson et al., 2003). Deux approches complémentaires peuvent être distinguées : l'approche non ciblée, qui est principalement dédiée à la découverte de nouveaux biomarqueurs, et l'approche ciblée qui permet la quantification de métabolites identifiés *a priori*. L'approche non ciblée a permis de découvrir de nouveaux biomarqueurs dans plusieurs champs scientifiques comme : la pharmacologie, la nutrition humaine, la toxicologie... Cette approche inclut généralement plusieurs étapes : la collecte et la préparation des échantillons (urinaires ou sanguins), l'analyse via MS ou NMR, le traitement des données et l'identification des métabolites discriminants et l'interprétation biologique. Dans notre étude, des collaborateurs ont permis de réaliser une approche métabolomique non ciblée, en réalisant une analyse d'échantillons urinaires en utilisant une chromatographie couplée à une spectrométrie de masse.

La métabolomique est susceptible de donner plusieurs applications potentielles en recherche du sport. Quelques études ont investigué des potentiels biomarqueurs de la performance. Santone et al., (2014) ont étudié les variations de métabolites avec des échantillons salivaires après des états de stress et de fatigue. Leurs résultats ont montré qu'il était possible de clusteriser les meilleurs et les moins bons athlètes. D'autres travaux (Neal et al., 2013 ; Yan et al., 2009) se sont intéressés sur les réponses de performance et les adaptations physiologiques sur une

période d'entraînement spécifique. Le but de leurs études était d'améliorer la compréhension des adaptations physiologiques et leur influence sur l'optimisation de l'entraînement. La métabolomique permet aussi d'étudier les relations entre la nutrition et l'activité physique. Quelques études ont expliqué les bénéfices de certains micronutriments. Elles ont mis en évidence que certaines boissons ou certains aliments permettent de limiter l'apparition de fatigue après une forte charge d'entraînement (Knab et al., 2013 ; Nieman et al., 2013 ; Miccheli et al., 2009). La métabolomique est également utilisée par les laboratoires anti-dopage pour confirmer ou infirmer l'utilisation de substances interdites (Palermo et al., 2017 ; Marios et al., 2015).

Cette étude avait pour but d'identifier les marqueurs biologiques susceptibles d'expliquer la fatigue perçue en fonction du type d'entraînement. La méthode d'analyse avait pour objectif d'observer les perturbations biologiques associées à la fatigue et au type d'entraînement, sans *a priori*. L'identification de métabolites pourrait permettre de connaître de nouveaux marqueurs biologiques de l'exercice et de déterminer les causes de la fatigue ressentie après l'entraînement.

Méthodes

Participants

33 nageurs de niveau national ont participé à cette étude. Durant les 6 mois précédant l'étude, tous les sujets s'entraînaient entre 15 et 18 heures par semaines, au cours de 8 ± 2 séances hebdomadaires. Les nageurs ont été exclus s'ils ont eu des blessures ou maladies nécessitant un traitement médical ou ayant manqué l'entraînement durant plus d'une semaine. La cohorte finale a été de 22 nageurs (9 crawlleurs, 5 brasseurs, 4 papillonneurs and 4 dossistes).

Design de l'étude

Un cross-over intra-sujets a été utilisé. Afin de minorer les effets retardés de l'entraînement antérieur, une période pré expérimentale a été constituée d'une semaine d'arrêt complet de l'entraînement, d'une semaine d'entraînement modéré, et de trois semaines d'entraînement identique. L'étude a été composée de deux périodes de six semaines (P1 et P2) auxquelles les sujets ont été aléatoirement assignés. Pour P1, 13 participants ont été assignés au groupe seuil et 9 au groupe polarisé. Les deux groupes ont été inter-changés lors de P2.

Suivi des états de l'humeur et de la qualité du sommeil

Les nageurs devaient répondre à un petit questionnaire de bien-être comme décrit par Noon et al. (2015), tous les matins avant le petit-déjeuner, durant les six semaines d'intervention. Afin de contrôler leurs perceptions de bien-être sur 7 items : motivation à s'entraîner, qualité de la nuit précédente, qualité de la récupération, appétit, sentiment de fatigue, niveau de stress et niveau de douleurs musculaires. Pour rendre l'utilisation plus facile chez un jeune public, ce questionnaire a été réalisé après une période d'apprentissage contrôlée grâce à une application téléphonique où les nageurs devaient déplacer un curseur (sur une échelle de 1 à 100). Ces questionnaires ont permis de clusteriser 3 groupes de nageurs, en définissant 3 groupes de fatigue : 1 ; groupe très fatigué, 2 ; groupe fatigué, 3 ; groupe en forme.

Recueil des urines

Les participants ont été instruits de collecter leurs urines au réveil, le matin des tests de performance. Ensuite, le chercheur a transféré les tubes Falcon de 15 mL dans des aliquots Eppendorf de 1,5 ml. Les échantillons ont été stockés à -80°C avant les analyses biologiques.

Spéctrométrie de masse et traitement des données

Après l'envoi des échantillons d'urine, le laboratoire INRA de Clermont-Ferrand, s'est occupé des analyses de spectrométrie de masse, puis des analyses statistiques (décrites dans un chapitre précédent).

Résultats

Les données ont rapporté l'identification de 2673 et 1943 ions pour les modes positif et négatif respectivement. Après la correction des effets liés à l'ordre d'injection et au bruit causé par la perte de certains échantillons, les matrices d'intensité ont contenu 2207 ions pour le mode positif et 1287 ions pour le mode négatif.

Pour ces analyses métabolomiques, à cause de la complexité du protocole de l'étude, plusieurs analyses ont été réalisées pour examiner les effets potentiels. Les analyses PCA n'ont pas révélé de facteurs majeurs qui peuvent être considérés ou analysés plus en détails dans le contexte de cette étude. Des analyses PLS-DA n'ont pas non-plus permis de sortir des modèles valides.

Aucun effet n'a été observé sur la saison : aucun ion discriminant n'a été observé entre les deux phases de pré-tests, ce qui démontre l'absence d'artefacts dans le protocole.

Les modèles mixtes réalisés sur les données de chaque post-test ont montré des effets significatifs (avec des ajustements de Benjamin-Hochberg) sur les classes de fatigue et/ou le type d'entraînement pour 3 ions en mode négatif et 9 ions en mode positif (voir Tableau 32).

Métabolites	FAT	ENT	INT		FAT1	FAT2	FAT 3	SEU	POL
	<i>p-values</i>			<i>Mode</i>	<i>Moyenne ± écart-type</i>				
4-phenylbutanic acid-O-sulphate	0,0025	0,1437	0,3758	NEG	8 ± 12	5 ± 5	36 ± 27	6 ± 6	8 ± 13
p-cresol sulfate	0,002	0,0166	0,105	NEG	49 ± 35	57 ± 69	53 ± 28	63 ± 73	53 ± 33
Tyrosine methyl ester	0,1162	0,0376	0,173	NEG	6 ± 4	3 ± 3	14 ± 18	5 ± 6	3 ± 3
Inconnu	0,0022	0,0091	0,0502	NEG	10 ± 3	21 ± 38	9 ± 3	19 ± 40	14 ± 12
Inconnu	0,002	0,0091	0,0502	NEG	20 ± 7	45 ± 93	15 ± 10	44 ± 99	28 ± 29
4-phenylbutanic acid-O-sulphate	0,002	0,1369	0,3758	NEG	25 ± 34	13 ± 13	105 ± 77	16 ± 17	23 ± 39
Tyrosine methyl ester 4 sulfate	0,1036	0,0166	0,1541	NEG	29 ± 23	13 ± 16	68 ± 88	25 ± 31	13 ± 14
Inconnu	0,9772	0,0001	0,0024	POS	2959 ± 1982	2682 ± 3417	11244 ± 3643	3418 ± 4320	2461 ± 2387
Inconnu	0,0383	0,0166	0,0502	NEG	3 ± 2	2 ± 1	8 ± 9	3 ± 3	2 ± 2
6-keto-decanoylcarnitine	0,0013	0,0001	0,0024	POS	21531 ± 8214	21732 ± 11363	66593 ± 71980	28737 ± 25611	21932 ± 11345
6-keto-decanoylcarnitine	0,0009	0,0001	0,0024	POS	4033 ± 1648	4148 ± 2127	12966 ± 13763	5518 ± 4848	4089 ± 2103
Pregnanediol-3-glucuronide	0,0241	0,0166	0,105	NEG	36 ± 44	18 ± 37	6 ± 2	52 ± 118	11 ± 11

Tableau 32. Identification des métabolites discriminants en fonction du type d'entraînement (ENT) et de l'état de fatigue (FAT).

Ce tableau présente les différentes intensités des ions identifiés comme discriminants de l'état de fatigue, du type d'entraînement, et de l'interaction entre ces deux facteurs. 10 métabolites ont été identifiés comme discriminants (deux sont des doublons puisqu'ils ont été séparés sur la chromatographie). Parmi ces 10 métabolites, 4 composés n'ont pas pu être identifiés à cause d'une structure ionique encore inconnue. Les changements d'intensité de ces ions ne sont donc pas interprétables au niveau biologique.

Le 4-phenylbutanic acid-O-sulphate présente une intensité beaucoup plus importante pour le groupe non-fatigué.

Le p-cresol sulfate a une intensité supérieure pour le groupe au seuil et pour les nageurs moyennement fatigués.

La tyrosine methyl ester présente une intensité plus élevée pour le groupe au seuil, et une tendance également plus élevée pour les nageurs non-fatigués.

Le 6-keto-decanoylcarnitine obtient des valeurs bien plus élevées chez les nageurs non-fatigués, avec également une intensité légèrement supérieure chez le groupe au seuil.

Le pregnanediol-3-glucuronide présente des valeurs bien supérieures pour le groupe fatigué et pour le groupe au seuil.

Discussion

Des modèles mixtes réalisés sur l'intensité des métabolites de chaque post-test ont permis d'identifier quelques métabolites associés aux différents états de fatigue et du type d'entraînement. Parmi ces métabolites, on en retrouve au moins trois qui sont souvent étudiés lors d'exercices physiques et sont associés au mécanisme de fatigue centrale. Il s'agit de dérivés de la tyrosine, de la carnitine et de la progestérone.

Le premier métabolite identifié comme discriminant est un dérivé de la tyrosine. Cet acide aminé est un précurseur de neurotransmetteurs tels que la dopamine et la noradrénaline (Wurtman et al., 1974). Un niveau élevé de tyrosine est attendu lorsque l'effort augmente et que le corps a besoin de libérer ces neurotransmetteurs (Neri et al., 1995). À terme, la disponibilité en tyrosine se réduit et est associée à un stress mental important (Banderet et Lieberman, 1989). Dans notre étude, il est probable que le niveau de stress physique et mental ait été supérieur pour l'entraînement au seuil (pourcentage d'entraînement à moyenne et haute intensité plus élevé). En réaction à ce stress, il est possible qu'une sécrétion de tyrosine se soit produite pour libérer de la noradrénaline. Cette hypothèse peut se soutenir au regard des résultats, qui démontrent une tendance (non significative) à produire davantage de tyrosine pour le groupe le moins fatigué. Les nageurs ayant sécrété davantage de tyrosine connaîtraient une fatigue perçue moins importante. Ces résultats soutiennent l'idée de supplémentation en tyrosine pour améliorer la performance pour des exercices difficiles (Tumilty et al., 2011).

Un autre résultat montre des changements concernant la 6-keto-decanoylcarnitine, dérivé de la carnitine. La carnitine joue un rôle majeur pour le transport des acides gras dans les mitochondries, afin de produire de l'énergie lorsque ce conjugué acide gras – carnitine se trouvera dans la matrice mitochondriale (Fritz et Marquis, 1965). Plusieurs études ont montré que la L-carnitine permet d'améliorer la performance sportive, réduire la fatigue, faciliter la récupération et qu'une ingestion de complexes de carnitine était recommandée (Sung et al., 2016). De toute évidence, les résultats de notre étude mettent en avant une modification des voies de production d'énergie. Il est probable que les nageurs les moins fatigués du groupe seuil

aient connu une sécrétion plus importante de carnitine. La préférence pour le métabolisme lipidique entraîne une inhibition de la glycolyse et favorise la disponibilité en glycogène offrant une meilleure protection contre les lésions musculaires (Green, 1991).

Un autre résultat a mis en évidence les changements de niveau de pregnanediol. Ce métabolite est associé au niveau de progestérone dans l'organisme (Stanczyk et al., 1997). Dans notre étude, nous avons observé des niveaux supérieurs de pregnanediol pour les nageurs les plus fatigués et pour ceux s'entraînant au seuil. Comme montré récemment par Ycaza Herrera et al. (2016) chez des cyclistes, il est envisageable qu'un stress sur l'organisme soit associé à un niveau plus important de progestérone. Cette hormone est convertie en cortisol pour réagir au stress, et il est alors possible que cette sécrétion de cortisol ait été accrue lors de l'entraînement à moyenne et haute intensité (Hoehn et Marieb, 2010), ce qui expliquerait la fatigue importante ressentie par les nageurs. Cette interprétation est à prendre avec précaution (d'autant plus que la cohorte comprenait des hommes et des femmes) mais il est possible que l'entraînement au seuil exacerbe le dysfonctionnement des glandes surrénales, dû au trop haut volume réalisé à une intensité moyenne ou élevée.

Conclusion

Ces résultats ont confirmé qu'une approche métabolomique non ciblée permet d'identifier des métabolites discriminants en fonction du type d'entraînement et de l'état de fatigue. Dans cette étude, il semble que le type d'entraînement a surtout eu un effet sur la fatigue centrale des nageurs. L'identification de trois métabolites discriminants des états de fatigue démontre l'apparition de perturbations biologiques associées au type d'entraînement.

Lien étude 4 – étude 5 :

Cette étude a mis en évidence que le type d'entraînement et l'état de fatigue pouvaient engendrer des changements biologiques en une durée de 6 semaines. Les résultats ont montré que l'intensité de plusieurs métabolites a considérablement changé au cours de la période d'intervention. Ces métabolites étaient associés à une fatigue centrale de l'organisme.

Cette fatigue centrale peut également être évaluée par l'analyse de l'activité cardiaque régulée par le système nerveux autonome. Une étude de cas observant les variations de l'équilibre du SNA en fonction de la charge d'entraînement quotidienne d'un nageur champion du monde apportera de nouvelles réponses sur l'influence des stratégies d'entraînement sur la fatigue.

Etude n°5 : Etude de cas : influence de la charge d'entraînement sur la régulation du système nerveux autonome chez un nageur champion du monde d'eau libre

Résumé

Objectifs :

Présenter la charge d'entraînement d'un nageur champion du monde d'une épreuve d'ultra-endurance, et des effets qu'elle peut induire sur l'équilibre du système nerveux autonome.

Méthodes :

Durant une période de 19 semaines, précédant les championnats du monde d'eau libre 2017, l'entraînement du nageur a été quantifié en trois zones d'intensité. Un test de variabilité de fréquence cardiaque (en position couchée, puis debout, avec analyse temporelle et fréquentielle) a été effectué quotidiennement. Des analyses statistiques ont permis d'observer les relations entre la charge d'entraînement et l'activité du SNA.

Résultats :

Les résultats de cette étude présentent une charge d'entraînement extrême, rarement rapportée dans la littérature. Ce haut volume d'entraînement est caractérisé par un volume important nagé entre les seuils aérobie et anaérobie. Durant les phases de stage à haut volume, c'est l'activité parasympathique qui est prédominante. Alors qu'avec la baisse du volume d'entraînement et le maintien de l'intensité pendant les phases d'affûtage, c'est le système orthosympathique qui est prédominant.

Conclusion :

Cette étude montre que les limites de charge d'entraînement sont atteintes pour un tel nageur. Le temps d'activité est énorme et cette charge d'entraînement peut être régulée par une distribution de l'intensité différente selon les cycles d'entraînement. Le suivi de la variabilité de fréquence cardiaque semble apporter des indicateurs reflétant l'équilibre de la fonction cardiaque du SNA, afin de monitorer la charge d'entraînement.

PLA R, AUBRY A, MERINO M, RESSEGUIER N, TOUSSAINT JF, HELLARD P. Training organization, physiologic profile and HRV changes of an open water world champion. *International Journal of Sports Medicine*. Soumis.

Introduction

Les études de cas qui ont décrit les caractéristiques physiologiques et l'organisation de l'entraînement chez des sportifs d'ultra-endurance en course à pied (Jones, 1998), en triathlon (Mujika, 2014), en ski de fond (Bell et al., 2017) et en cyclisme (Solli et al., 2017) ont rapporté des valeurs extrêmes pour certaines variables physiologiques : $\dot{V}O_{2\max} > 80 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, une vitesse au seuil individuel anaérobie $> 80\% \dot{V}O_{2\max}$, une ventilation maximale $> 150 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. Pour atteindre de telles valeurs, l'entraînement doit pousser l'adaptation à ses limites via des charges d'entraînement extrêmement élevées en volume, intensité et fréquence (Seiler, 2010).

Dans ces études de cas, les sportifs ont réalisé plus de 1500 heures annuelles, avec une moyenne de 14 ± 2 séances par semaine (Solli et al., 2017 ; Mujika, 2014 ; Bell et al., 2017). De très hauts volume d'entraînement ont été observés chez des cyclistes, 24 000 km (Mujika, 2012), des athlètes, 10 000 km (Jones, 2006), et des nageurs, 3 500 km (Vergnoux, 2014), correspondant à 28 ± 3 heures par semaine. Une triathlète olympique a effectué 796 séances en 50 semaines durant la saison Olympique (Mujika, 2014). Ces charges extrêmes d'entraînement incluent des périodes spécifiques tels que des stages d'une durée de 2 à 5 semaines où la charge d'entraînement est extrêmement élevée. De tels pics de charges sont parfois associés à un état de surmenage non fonctionnel (Decroix et al., 2016, Hedelin et al., 2000), et sont caractérisés par une baisse des performances à court terme sans l'apparition de symptômes sévères de fatigue (Meeusen et al., 2013).

L'eau libre est une discipline très jeune parmi les épreuves d'ultra-endurance. Elle comporte 3 épreuves majeures : 5 km, 10 km et 25 km, avec une durée d'environ 1, 2 et 5 heures respectivement. Sa popularité s'est accrue depuis que l'épreuve du 10 km est entrée au programme des Jeux Olympiques en 2008 (Vogt et al., 2013). De rares études se sont penchées sur les caractéristiques des nageurs d'eau libre de haut niveau (Van Heest et al., 2004). Quelques auteurs (Baldassarre et al., 2017, Hellard et al., 2014) ont avancé que leurs principales capacités étaient de soutenir un effort intense avec un haut pourcentage de $\dot{V}O_{2\max}$ (85-90%) pendant plusieurs heures, avec une bonne efficacité de nage (maintenir l'amplitude tout en étant capable de faire varier sa fréquence) et un coût énergétique réduit (Zamparo et al., 2005). En eau libre, le 25 km, avec une durée d'environ 5 heures, nécessite de soutenir une bonne amplitude avec une lactatémie faible, et une capacité d'élévation de la fréquence pour être capable d'augmenter sa vitesse à la fin de la course (Hellard et al., 2014). Les rapports des nageurs d'eau de haut

niveau indiquent un haut volume d'entraînement (74-86 km, avec plus de 24 heures par semaine), 10 séances par semaine, avec une distribution de l'intensité de 74-89% en zone 1, 10-28% en zone 2 et 1-8% en zone 3 (Baldassarre et al., 2017). Ces données confirment une charge externe extrême tant en volume qu'en intensité et en fréquence, caractérisée notamment par une distribution pyramidale de l'intensité (Stoggl et Sperlich, 2015). Un corpus de travaux a souligné l'importance du contrôle des réponses adaptatives des athlètes soumis à des charges d'entraînement extrêmes afin de prévenir la fatigue, le surmenage non fonctionnel, les maladies et les blessures, et d'augmenter les capacités physiologiques (Hedelin et al., 2000 ; Le Meur et al., 2013 ; Meeusen et al., 2013 ; Foster, 1998 ; Lehmann et al., 1993).

Parmi l'ensemble des indices utilisés pour contrôler l'adaptation des athlètes à des charges d'entraînement et de compétition élevées et fréquentes (questionnaires, dosages biologiques) la variabilité de la fréquence cardiaque est l'une des plus informatives et facile à mettre en oeuvre. Les indices de VFC donnent des informations sur l'équilibre du SNA avec l'analyse de l'activité parasympathique et orthosympathique (Plews et al., 2013, 2017 ; Schmitt et al., 2013). Quelques études ont montré une baisse de l'activité parasympathique et une hausse de l'activité orthosympathique durant des états de surentraînement chez des sportifs de niveau international (Pichot et al., 2002 ; Uusitalo et al., 2000 ; Iellamo et al., 2002 ; Aubert et al., 2003 ; Baumert et al., 2006). Cette augmentation est due à un entraînement trop intense et une élévation des facteurs de stress (Israel, 1976 ; Kuipers et Keizer, 1988). D'autres résultats ont démontré une augmentation de l'activité parasympathique qui a été interprétée comme un état de fatigue extrême (Le Meur et al., 2013, Lehmann et al., 1998). Cet état de surentraînement est souvent observé chez des sportifs d'endurance et se caractérise par une suppression de la régulation orthosympathique et des fréquences cardiaques plus basses à chaque intensité de l'effort (Le Meur et al., 2013). Certains changements des indices VFC comme une baisse de la puissance HF sont associés à un risque accru de l'apparition de tous types de fatigue, ou une augmentation de la puissance LF qui est associée à un plus haut risque de dommages musculaires (Hellard et al., 2011).

De plus, la VFC permet d'observer les variations de l'état de forme durant des périodes spécifiques. Hug et al. (2014) ont montré qu'une réduction de la charge d'entraînement pouvait induire une diminution de l'activité parasympathique à la fin d'une période d'affûtage chez des marathonniens. Edmonds et al. (2013) ont observé des résultats similaires pour des joueurs de rugby, avec une prédominance de l'activité orthosympathique avant un match. D'autres auteurs ont avancé que l'inhibition des mécanismes vagues est réduite durant cette période, alors que

l'activité sympathique pourrait permettre de préparer le système cardiovasculaire à des variations rapides et larges du rythme cardiaque, du débit sanguin, de la redistribution sanguine pour des compétitions très exigeantes (Iellamo et al., 2002). Pour le monitoring de l'entraînement, l'analyse quotidienne des indices VFC est indispensable car sinon on passe à côté de beaucoup d'informations comme des séances dures, une demi journée de repos.

Le but de cette étude a été d'étudier l'impact de la charge d'entraînement sur les variations de la régulation du système nerveux autonome chez un nageur champion du monde d'eau libre. L'opportunité de suivre les réponses de l'activité cardiaque du SNA en relation avec l'intensité de l'entraînement au quotidien avait pour but de mieux comprendre comment la distribution de l'intensité jouait un rôle sur les mécanismes d'installation de la fatigue centrale. Nous supposons que les périodes de haute charge entraînent une diminution globale de l'activité du système nerveux autonome et que les périodes de récupération mènent à une prédominance de l'activité orthosympathique.

Méthodes

Participant

Un nageur eau libre de haut niveau (23 ans, 1,91m, 82,7 kg, 8,1% de masse grasse, $\dot{V}O_{2max}$, 58,5 mL•min⁻¹•kg⁻¹). Il fait partie de l'équipe de France eau libre depuis 2012, il est devenu champion d'Europe du 25 km en 2014 et 2016, champion du monde du 25 km en 2017.

Tests physiologiques

Durant la période d'étude de 19 semaines, le nageur a réalisé plusieurs tests physiologiques.

Test incrémenté 5 x 200 m

Ce protocole a déjà été présenté dans l'étude 3. En plus, la fréquence cardiaque a été mesurée à l'aide d'une ceinture Garmin Swim HRM (Garmin, Etats-Unis).

10 km contre-la-montre

Le nageur a réalisé un 10 km dans un bassin de 50 mètres afin de mesurer ses capacités physiologiques au cours de cet effort. Le test consistait à réaliser le meilleur temps possible. Des échantillons capillaires sanguins ont été collectés au doigt durant les 45 s de repos après chaque pause du test : après 500 m, 3500 m, 7000 m, 8500 m et 10 000 m. Après le dernier palier, les analyses de gazs ont été réalisées immédiatement à l'aide d'un analyseur de gaz K4b2 (Cosmed), connecté à un masque orthonasal (Hans Rudolph). Le masque a été appliqué au

nageur dès que sa tête était sortie de l'eau pendant 30 secondes. Les 20 premières secondes ont servi à l'analyse. La fréquence cardiaque a été mesurée à l'aide d'une ceinture Garmin Swim (Garmin, Etats-Unis). Les paramètres biomécaniques comme la fréquence gestuelle et l'amplitude ont été estimés en utilisant un Tritonwear (Tritonwear, Canada).

Quantification de l'entraînement

L'entraînement a été quantifié pendant les 19 semaines précédant les championnats du monde eau libre. Le nombre de séances par semaines a été de 10 ± 1 séances dans l'eau, avec une séance de développement de la force. Trois demi journées étaient dédiées au repos (mercredi après-midi, samedi après-midi et dimanche matin). Toutes les séances d'entraînement ont été dirigées par le même entraîneur, qui a partagé son cahier d'entraînement avec le physiologiste. La distribution de l'intensité a été quantifiée comme proposée par Mujika et al. (1995) : volume nagé sous $< 2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ de lactatémie (Zone 1), volume entre 2 et $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (Zone 2), et volume $> 4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (Zone 3). Cette quantification a été réalisée en utilisant un test incrémenté 10 x 400 m avec un recueil des lactatémies. Le volume d'entraînement hebdomadaire pour chaque intensité a été exprimé en pourcentage du volume maximal de la zone d'intensité, observé au cours de l'étude (Avalos et al., 2003). La moyenne de la charge d'entraînement est la moyenne du pourcentage de ces 3 zones d'intensité.

La période d'entraînement a été constituée de 8 mésocycles. Une période d'une semaine avant l'étape de coupe du monde d'Abu Dhabi caractérisée par un faible volume d'entraînement associée à un travail à haute intensité relativement important. Une première période d'affûtage de deux semaines pour préparer une compétition importante en bassin caractérisée par un faible volume d'entraînement et un travail à haute intensité relativement important. Une période de stage de trois semaines caractérisée par un haut volume et un important travail autour de V4. Une période d'entraînement spécifique de quatre semaines caractérisée par une charge d'entraînement moyenne et des séries longues réalisées à allure de course. Une nouvelle période d'affûtage de trois semaines qui s'est achevée avec les championnats de France eau libre caractérisée par une forte réduction du volume d'entraînement. Une période de transition d'une semaine caractérisée par un faible volume d'entraînement et aucun exercice réalisé à haute intensité avant de partir sur une nouvelle période de stage de trois semaines caractérisées par un haut volume et un important travail autour de V4. Enfin, une période de préparation terminale de deux semaines qui s'est achevée avec les championnats du monde d'eau libre caractérisée par une réduction du volume d'entraînement et une hausse du travail à haute intensité.

Enregistrement des données de VFC

Le protocole de test VFC a été réalisé et inspiré de la description de Schmitt et al. (2013). Chaque test a été réalisé le matin juste après le réveil (Task Force, 1996). La même routine a été utilisée pour tous les tests. Le test dure 7 minutes en position couché, puis 6 minutes en position debout. Les intervalles RR ont été enregistrés à l'aide d'un émetteur de fréquence cardiaque (Polar H7, Polar Electro Oy, Finlande) et transmis par Bluetooth à une application smartphone (Elite HRV). Les enregistrements des intervalles RR ont été analysés lors des 256 dernières secondes de chaque position. La fréquence respiratoire n'a pas été guidée. Tous les enregistrements RR ont été visuellement inspectés et les éventuels artefacts ont été corrigés (Edmonds et al., 2013). Les données ont toujours été inspectées par le même chercheur. La puissance spectrale a été calculée par des transformations rapides de Fourier à l'aide du logiciel Kubios (version 2.0, Université de Kuopio, Finlande). Les domaines fréquentiels et temporels ont été analysés.

Analyses statistiques

Les analyses ont été réalisées par le département statistiques de Santé Publique d'Aix-Marseille Université. Une analyse descriptive des indices de VFC a été réalisée, en utilisant les moyennes et écart-types, ou bien les médianes et intervalles interquartiles. Ces indices ont été ensuite décrit et comparé selon les variables d'entraînement (intensité, cycle). Des tests de Kruskal-Wallis ont été utilisés pour des variables qualitatives qui étaient non-binaires.

Pour chaque zone d'intensité, quatre groupes ont été séparés selon le pourcentage moyen du volume quotidien sur la période étudiée (entre 0 et 50%, entre 50 et 100%, entre 100 et 150%, plus de 150%).

Résultats

Caractéristiques physiologiques

Les données montrent une ventilation maximale de $170 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ et des paramètres physiologiques à la fin du 10 km qui atteignent des plus hautes valeurs que lors du test incrémenté (tableau 33).

	10 km	5 x 200 m
Durée (min)	119.3	13
Vitesse au dernier 200m ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.56	1.68
$\dot{V}\text{O}_{2\text{pic}}$ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	4.67	4.59
$\dot{V}\text{O}_{2\text{pic}}$ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$)	58.5	56.4
VE ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	170	168
FC _{max}	175	178
La _{pic} ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	4.0	8.5
Fréquence ($\text{c}\cdot\text{min}^{-1}$)	34.0	41.0
Amplitude (m)	2.63	2.55

Tableau 33. *Caractéristiques physiologiques d'un nageur champion du monde du 25 km durant un 10 km contre-la-montre et un test incrémenté 5 x 200 m*

La lactatémie $[\text{La}]_b = 2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ correspondant à un temps de 63,2 s au 100m et une lactatémie $[\text{La}]_b = 4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ correspondant à 62,0 s par 100m (Tableau 32).

Lap	Temps (min:sec)	La ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	4:33,22	0,9
2	4:28,09	0,9
3	4:26,18	0,9
4	4:23,80	1,3
5	4:21,15	0,9
6	4:19,37	0,8
7	4:15,83	1,0
8	4:12,10	2,0
9	4:11,80	2,3
10	4:07,96	4,3

Tableau 34. *Temps et lactatémie sur un test incrémenté 10 x 400 m, départ 5 minutes*

Charge d'entraînement

Durant la période d'étude, la moyenne du nombre d'heures d'entraînement hebdomadaire a été de 28 ± 4 heures, correspondant à 85 ± 21 km par semaine. La distribution de l'intensité a été la suivante : 39 ± 8 % en zone 1, 53 ± 8 % en zone 2, 8 ± 4 % en zone 3. La première partie de la période d'entraînement a été caractérisée par un plus haute partie réalisée en zone 1 (entre 40 et 50%) que sur la deuxième partie (entre 30 et 40%).

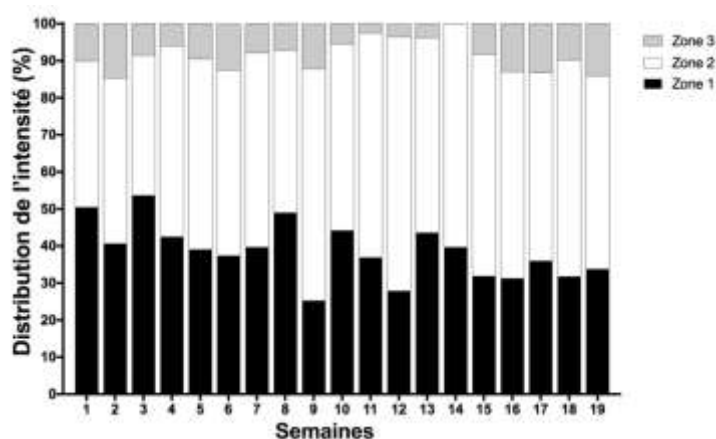


Figure 39. Distribution de l'intensité d'entraînement au cours des 19 dernières semaines de préparation aux championnats du monde.

La période d'étude a été caractérisée par deux pics de charge durant les deux stages, avec une augmentation de 40% de la charge totale et un volume maximal atteignant 120 km par semaine réalisés en 14 séances hebdomadaires. Une charge un peu plus légère a été observée la semaine précédant les stages. La période d'affûtage décrit une baisse progressive de la charge d'entraînement durant les 3 semaines précédant les championnats du monde.

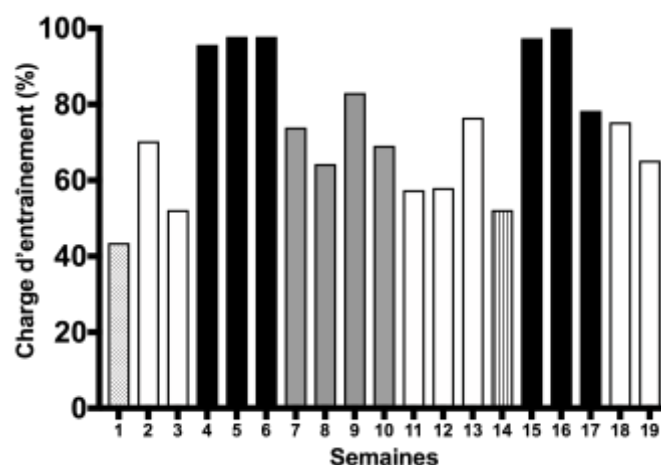


Figure 40. Evolution de la charge d'entraînement au cours des 19 dernières semaines de préparation aux championnats du monde.

Indices VFC

Distribution de l'intensité

En position couchée, une augmentation continue du volume total d'entraînement et du volume réalisé en zone 2 a montré des valeurs plus hautes pour les indices de l'activité parasympathique ($p < 0,05$ pour rMSSD et HF). La puissance d'énergie totale (LF+HF) a également été associée à une augmentation du volume réalisé en zone 2 ($p < 0,05$). Aucun résultat significatif n'a été observé pour les zones 1 et 3 ($p > 0,05$).

		HR (bpm)	RMSSD (ms)	LF (ms ²)	HF (ms ²)	LF/HF	LF+HF (ms ²)
VT	0 to 50%	51 (49-53)	44 (39-52)	1538 (938-1852)	561 (313-710)	2,7 (2,2-3,0)	2099 (1532-2583)
	50 to 100%	52 (49-55)	47 (38-57)	1501 (885-2761)	531 (406-822)	3,1 (2,0-4,8)	2240 (1341-3578)
	100 to 150%	51 (50-53)	50 (47-53)	2224 (1809-2614)	673 (599-742)	3,4 (1,9-3,8)	2958 (2368-3341)
	> 150%	51 (49-55)	56 (42-66)	1856 (1378-2677)	866 (524-1101)	2,6 (1,8-3,5)	2729 (1877-3851)
	p-value	0,590	0,019	0,041	0,014	0,285	0,030
Z1	0 to 50%	52 (50-53)	45 (41-55)	1618 (1198-2282)	594 (369-818)	2,8 (2,3-3,8)	2145 (1871-3084)
	50 to 100%	52 (49-55)	47 (36-53)	1353 (842-2716)	520 (359-748)	2,5 (1,6-4,8)	2135 (1257-3160)
	100 to 150%	51 (49-54)	54 (43-60)	2050 (1628-2722)	676 (513-972)	2,9 (2,0-3,6)	2779 (2082-3812)
	> 150%	51 (49-55)	53 (41-61)	1790 (1061-2551)	679 (544-1024)	3,0 (1,7-3,8)	2393 (1514-3658)
	p-value	0,960	0,081	0,122	0,114	0,890	0,139
Z2	0 to 50%	52 (50-53)	43 (40-51)	1607 (1010-2244)	531 (312-637)	2,7 (2,3-5,4)	2071 (1523-2966)
	50 to 100%	52 (50-55)	45 (36-53)	1673 (910-2349)	588 (363-674)	3,1 (2,5-4,2)	2315 (1292-3149)
	100 to 150%	51 (49-54)	52 (43-60)	1731 (1189-2625)	723 (500-934)	2,3 (1,7-3,5)	2431 (1803-3714)
	> 150%	50 (48-54)	58 (50-66)	2273 (1592-2926)	897 (564-1101)	2,8 (2,0-3,7)	3184 (2333-3968)
	p-value	0,192	0,001	0,138	0,002	0,186	0,037
Z3	0 to 50%	51 (49-54)	48 (41-56)	1673 (1003-2565)	600 (449-849)	2,7 (1,8-3,8)	2389 (1598-3497)
	50 to 100%	49 (48-53)	55 (51-65)	1896 (1290-2497)	853 (634-988)	2,8 (2,1-3,6)	2749 (1968-3675)
	100 to 150%	51 (50-55)	48 (37-57)	1731 (1269-2241)	633 (421-892)	2,8 (1,9-3,5)	2639 (1665-3040)
	> 150%	53 (50-54)	50 (40-60)	1960 (1205-2739)	613 (386-893)	3,0 (2,1-4,3)	2584 (1788-3647)
	p-value	0,419	0,480	0,883	0,588	0,783	0,857

Tableau 35. Médianes (intervalles interquartiles) pour les paramètres VFC en position couchée selon le niveau d'intensité (exprimée comme le pourcentage du volume moyen quotidien réalisée dans la zone observée). Chaque indice VFC a été comparé avec la variable d'entraînement de la veille : VT ; volume total, Z1 ; zone 1, Z2 ; zone 2, Z3 ; zone 3.

En position debout, l'augmentation du volume en zone 1 à des plus hautes valeurs de HF ($p < 0,05$). Egalement, le ratio LF/HF a baissé continuellement avec l'augmentation du volume passé en zone 1, montrant l'importante réduction de la prédominance orthosympathique ($p < 0,05$). La baisse de LF_{nu} et l'augmentation de HF_{nu} a confirmé cette observation. Aucun changement significatif n'a été observé pour les autres variables.

		HR (bpm)	RMSSD (ms)	LF (ms ²)	HF (ms ²)	LF/HF	LF+HF (ms ²)
VT	0 to 50%	75 (72-81)	11 (9-12)	477 (284-730)	13 (9-19)	36 (26-53)	490 (294-741)
	50 to 100%	75 (71-79)	13 (10-14)	523 (333-752)	15 (9-28)	35 (21-53)	533 (339-782)
	100 to 150%	73 (70-74)	11 (10-14)	540 (344-816)	20 (7-31)	29 (19-50)	552 (254-886)
	> 150%	76 (70-82)	12 (9-14)	441 (288-664)	20 (11-30)	26 (14-39)	485 (354-692)
	p-value	0,388	0,556	0,675	0,348	0,117	0,777
Z1	0 to 50%	75 (71-80)	11 (10-13)	433 (276-552)	12 (8-19)	28 (23-52)	449 (288-564)
	50 to 100%	75 (71-80)	12 (10-14)	530 (332-861)	15 (9-28)	37 (25-54)	541 (338-880)
	100 to 150%	74 (70-78)	12 (9-14)	509 (323-664)	15 (8-30)	36 (19-47)	526 (360-696)
	> 150%	75 (69-83)	13 (10-14)	504 (383-665)	24 (19-35)	21 (9-30)	549 (402-724)
	p-value	0,799	0,578	0,591	0,033	0,042	0,496
Z2	0 to 50%	73 (70-79)	11 (10-13)	502 (283-884)	15 (9-20)	29 (22-47)	518 (293-900)
	50 to 100%	75 (70-81)	12 (10-15)	501 (366-679)	13 (9-35)	35 (19-51)	525 (373-823)
	100 to 150%	73 (71-78)	12 (10-14)	523 (322-754)	19 (11-29)	28 (19-45)	548 (351-784)
	> 150%	79 (75-81)	9 (9-13)	423 (316-629)	13 (8-23)	37 (24-51)	438 (324-650)
	p-value	0,073	0,136	0,511	0,462	0,723	0,442
Z3	0 to 50%	75 (71-80)	12 (9-13)	505 (331-743)	16 (8-28)	34 (23-53)	521 (338-766)
	50 to 100%	73 (71-76)	12 (10-14)	599 (308-745)	21 (11-27)	29 (18-48)	634 (317-771)
	100 to 150%	74 (73-81)	11 (9-17)	509 (337-967)	11 (8-50)	36 (21-46)	523 (344-1195)
	> 150%	73 (68-82)	12 (10-15)	431 (275-577)	20 (11-33)	25 (13-42)	485 (316-594)
	p-value	0,476	0,756	0,796	0,388	0,098	0,902

Tableau 36. Médianes (intervalles interquartiles) pour les paramètres VFC en position couchée selon le niveau d'intensité (exprimée comme le pourcentage du volume moyen quotidien réalisée dans la zone observée). Chaque indice VFC a été comparé avec la variable d'entraînement de la veille.

Changements de la saisonnalité (jour de la semaine et mésocycle)

En position debout, la FC change au fil des jours de la semaine : elle augmente du samedi (médiane : 71 bpm, intervalle interquartile : 68-74 bpm) au mercredi (79, 74-83), puis redescend jusqu'au samedi suivant (Figure 41).

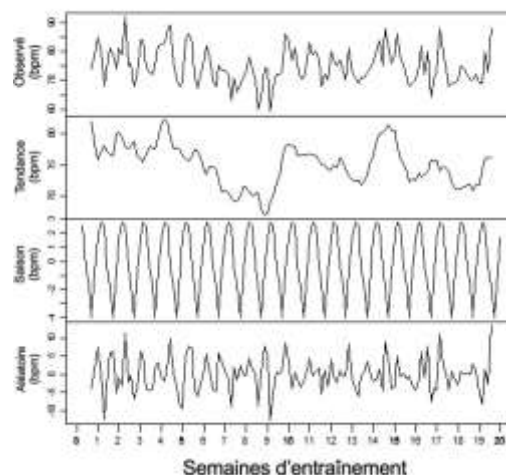


Figure 41. Evolution de la fréquence cardiaque en position debout au cours des 19 semaines d'étude selon 4 effets différents (observé, tendance, saison, aléatoire).

Pour les mésocycles, l'activité orthosympathique a été plus importante dans les périodes d'affûtage, alors que l'activité parasympathique a montré des valeurs plus hautes pendant les phases à fort volume d'entraînement, en position couchée (Tableau 37).

	<i>p-value</i>	GEN	AFF1	STA1	SPE	AFF2	TRA	STA2	AFF3
FC (bpm)	0,006	54 (53-57)	53 (51-55)	50 (49-54)	49 (47-51)	51 (50-52)	52 (51-54)	54 (50-55)	53 (50-53)
rMSSD (ms)	0,004	41 (34-45)	47 (39-53)	60 (47-68)	52 (44-58)	47 (38-59)	39 (36-52)	56 (44-63)	49 (40-54)
LF (ms ²)	0,410	2034 (1203-2317)	1795 (1032-2734)	2200 (1116-2665)	1530 (957-1790)	1963 (1241-3473)	865 (814-1111)	1868 (1419-2929)	1927 (1488-2165)
HF (ms ²)	0,002	401 (252-657)	544 (382-644)	1071 (599-1386)	625 (518-908)	535 (450-699)	287 (254-372)	832 (501-991)	594 (344-816)
LF/HF	0,001	4.1 (3.1-5.4)	3.1 (2.3-5.5)	2.0 (1.6-2.4)	2.7 (1.5-3.1)	3.3 (2.5-5.1)	3.2 (3.0-3.3)	2.8 (2.0-3.4)	3.4 (2.4-4.8)
LF+HF (ms ²)	0,227	2380 (1556-2992)	2574 (1396-3470)	3521 (1831-4035)	2386 (1598-2826)	2692 (1719-3999)	1141 (1113-1427)	2810 (1877-4056)	2367 (1994-2916)

Tableau 37. Médianes (intervalle interquartile) pour les indices VFC en position couchée Durant les différents cycles de la période d'étude.

En position debout, des résultats similaires ont été observés.

	<i>p-value</i>	GEN	AFF1	STA1	SPE	AFF2	TRA	STA2	AFF3
HR (bpm)	0,042	79 (74-83)	75 (74-82)	76 (70-83)	72 (70-74)	74 (72-79)	80 (76-85)	75 (71-80)	73 (70-75)
rMSSD (ms)	0,038	9 (7-10)	12 (11-14)	13 (10-14)	13 (11-16)	12 (9-14)	12 (12-12)	10 (9-13)	11 (11-14)
LF (ms ²)	0,163	339 (246-516)	539 (416-946)	417 (269-546)	540 (331-1003)	496 (325-1037)	477 (428-649)	431 (264-710)	537 (317-672)
HF (ms ²)	0,153	9 (7-12)	16 (11-29)	22 (13-35)	17 (8-40)	16 (9-31)	16 (11-21)	19 (10-26)	15 (8-22)
LF/HF	0,094	32 (25-42)	42 (28-47)	20 (9-32)	28 (19-59)	36 (29-51)	35 (30-54)	27 (20-40)	38 (25-55)
LF+HF (ms ²)	0,209	348 (254-532)	544 (435-964)	517 (322-594)	600 (337-1020)	504 (333-1061)	486 (443-659)	447 (278-744)	545 (324-692)

Tableau 38. Médianes (intervalle interquartile) pour les indices VFC en position debout durant les différents cycles de la période d'étude.

Domaine temporel vs analyse spectrale

Durant la période de l'étude, en position couchée, $rMSSD_{\text{quotidien}}$ et $HF_{\text{quotidien}}$ ont été très fortement corrélés : $r = 0,91$ ($0,87-0,93$; $p < 0,001$). $rMSSD$ avait un coefficient de variation (CV) plus petit ($CV = 27,85$) que HF ($CV = 55,66$).

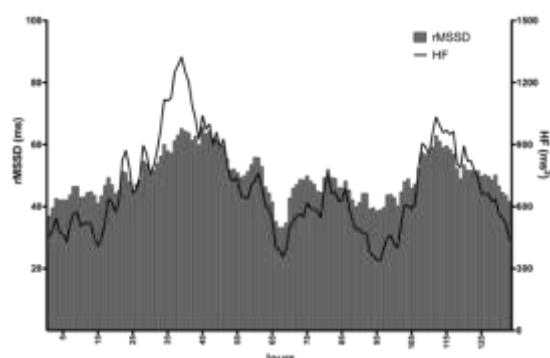


Figure 42. Evolution des indices $rMSSD$ et HF au cours de la période, en position couchée.

Discussion

Les résultats de cette étude présentent les caractéristiques physiologiques d'un nageur champion du monde eau libre. Les valeurs de $\dot{V}O_{2pic}$ sont inférieures à celles observées chez d'autres sportifs d'endurance : 70,0 pour un skieur de fond (Solli et al., 2017), 72,8 pour un athlète (Jones, 1998), 84,0 pour un cycliste (Bell et al., 2017), ou pour des autres nageurs : 76,8 $mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ (Fernandes et al., 2003). Cependant, les vitesses associées à $La = 2 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ ($1,58 \text{ m} \cdot s^{-1}$) et $La = 4 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ ($1,61 \text{ m} \cdot s^{-1}$) n'ont jamais été observées chez des nageurs de haut niveau. L'analyse de l'allure via GPS dans les courses d'eau libre met en évidence une variabilité de la vitesse très importante qui oscille en continu entre les zones aérobie, au seuil anaérobie et de la $\dot{V}O_{2max}$ (Vandenbogaerde et al., 2018) et une capacité pour les nageurs les plus performants à élever leur vitesse dans le dernier quart de la course (Rodriguez et Veiga, 2017, Saavedra et al., 2018, Hellard et al., 2014, Zamparo et al., 2005). L'importante variabilité des vitesses en compétition est associée à une dérive progressive de la ventilation et à une augmentation du coût énergétique durant la course (Zamparo et al., 2005) qui impose aux nageurs de s'adapter en modulant leurs modalités techniques telles que l'augmentation de la fréquence gestuelle et la diminution de la distance par cycle (Hellard et al., 2014, Zamparo et al., 2005). Les valeurs très élevées des vitesses au seuil et à $\dot{V}O_{2max}$, associées à des concentrations de lactate faibles (Hellard et al., 2014) permettraient alors de faire face à ces

variabilités techniques et physiologiques afin de maintenir la vitesse la plus élevée possible et la technique la plus efficiente tout au long de la course.

Un tel volume d'entraînement : 85 km en moyenne par semaine et jusqu'à 120 km correspondant à 28 heures par semaine, n'a jamais été rapporté dans la littérature pour des nageurs de longue distance. D'autres rapports sur des nageurs d'eau libre de haut niveau ont indiqué : 74,1 km par semaine pour une championne Olympique et 78,1 km pour un nageur d'ultra-endurance (Baldassarre et al., 2017).

La distribution de l'intensité montre un entraînement avec une large partie réalisée en zone 2. Les rapports de sportifs de haut niveau tels que des rameurs, triathlètes, skieurs de fond et des marathoniens ont indiqué des proportions inférieures d'entraînement autour du seuil anaérobie (moins de 5% pour la plupart) (Mujika, 2014 ; Solli et al., 2017 ; Sandbaak et al., 2016). Peu d'études présentent des distributions similaires où des marathoniens de haut niveau, des cyclistes d'ultra-endurance et un marcheur adoptent un entraînement avec une large partie réalisée en zone 2 (Arcelli et Canova, 1999, Manunzio et al., 2016, Pugliese et al., 2014). La première hypothèse qui pourrait expliquer une prévalence plus élevée de l'entraînement au seuil en natation comparativement aux autres disciplines est que la charge cardiaque serait moins importante, due à la position allongée et une masse musculaire impliquée plus faible que pour les activités terrestres (moindre utilisation des jambes à intensité sous-maximale) (Dixon et Faulkner, 1971 ; Stenberg et al., 1967). La seconde hypothèse est que le meilleur indice de nage (vitesse*amplitude) est atteint autour du seuil anaérobie durant les tests incrémentés chez des nageurs de compétition (Dekerle et al., 2005). A cette intensité, les nageurs de longue distance démontrent une capacité à réduire leur coût énergétique avec une bonne coordination des bras qui leur permet de maximiser l'efficacité de nage (Seifert et al., 2010).

L'augmentation du volume pour des vitesses de nage entre $La = 2 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ et $La = 4 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ a été associée à une augmentation de l'activité parasympathique. Ce résultat contraste les études précédentes qui ont plutôt montré une augmentation de la régulation parasympathique à la suite d'un entraînement à basse intensité $< 2 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$. (Aubert et al., 2001, Iellamo et al., 2002, Seiler et al., 2007 ; Stanley et al., 2015 ; Plews et al., 2014). En natation, l'utilisation d'une plus petite masse musculaire (Astrand et Saltin, 1961) et l'altération hémodynamique associée à la position horizontale du corps (Stenberg et al., 1967) pourrait permettre d'activer son système parasympathique après des efforts plus intenses en natation.

En position debout, nos résultats mettent aussi en évidence une réduction de l'activité orthosympathique et une élévation de l'activité parasympathique après l'augmentation du volume nagé en zone 1. Il est possible que la baisse de la dominance orthosympathique s'explique par la diminution de l'activité des catécholamines suite à un programme d'entraînement en endurance (Aubert et al., 2003). Une autre hypothèse de cette baisse d'activité sympathique pourrait être associée à des changements d'un ensemble de réflexes autonomes cardiovasculaires, avec notamment un masquage des baroréflexes artériels à cause de l'impact de l'augmentation du volume sanguin sur les barorécepteurs à basse pression (O'Sullivan et Bell, 2000). Enfin, plusieurs auteurs ont déjà montré une augmentation de l'activité parasympathique après un entraînement en endurance chez des athlètes bien entraînés, associé à l'augmentation du tonus vagal (Iellamo et al., 2002 ; Dixon et al., 1992), de la sensibilité du baroréflexe (Iellamo et al., 2002) et une diminution de la pression artérielle diastolique (Portier et al., 2001).

La décomposition en séries temporelles des relevés VFC des 138 jours précédant le titre de champion du monde ont permis de mettre en évidence des changements jour par jour. Les résultats montrent une augmentation de la FC de samedi à mercredi, puis une redescente jusqu'au samedi suivant. Il est possible que la demie-journée de récupération facilite la réduction de l'activité orthosympathique durant le reste de la semaine. Plusieurs études ont déjà rapporté l'importance de contrôler la qualité de l'effort et/ou du repos avant les analyses de VFC (James et al., 2002 ; Bernardi et al., 1997 ; Edmonds et al., 2013), puisque des efforts à haute intensité peuvent engendrer une hyperactivité orthosympathique jusqu'à 4 jours après la séance.

L'activité parasympathique a été plus importante durant les stages, incluant une forte hausse du volume d'entraînement. Cette observation a déjà été montrée dans plusieurs études, où HF en position couchée augmente après une phase d'entraînement de l'endurance (Al-Ani et al., 1996, Hedelin et al., 2001, Lee et al., 2003, Yamamoto et al., 2001). Stanley et al. (2015) ont présenté des résultats très similaires chez un triathlète de haut niveau avec une augmentation de l'activité parasympathique durant les blocs d'entraînement à forte charge et une augmentation de l'activité orthosympathique durant les phases d'affûtage et de compétition.

Nos résultats ont également montré une hausse de l'activité orthosympathique durant les périodes d'affûtage. A l'instar d'autres études, (Stanley et al., 2015, Hug et al., 2014, Edmonds et al., 2013, Garet et al., 2004), la réduction du volume d'entraînement avec le maintien ou la hausse de l'intensité pourrait conduire à une plus grande stimulation orthosympathique. Durant

cette période où la charge est réduite, le volume plasmatique peut diminuer et la stimulation aérobie baisse (Mujika et al., 2000), ce qui pourrait mener à une réduction de l'activité parasympathique. La prédominance orthosympathique pourrait refléter une adaptation cardiovasculaire liée à une possibilité de mobilisation cardiovasculaire maximale au cours d'efforts maximaux (Iellamo et al., 2002).

Ces résultats montrent la complémentarité des indices VFC lorsqu'ils sont recueillis dans les deux positions (couchée et debout) et avec les deux méthodes d'analyses (temporelle et fréquentielle) (Edmonds et al., 2013 ; Schmitt et al., 2015 ; Portier et al., 2001 ; Pichot et al., 2002 ; Dixon et al., 1992, Bernardi et al., 1997 ; Task Force, 1996). Le ratio LF/HF semble être un bon indicateur de l'équilibre orthosympathique-parasympathique. De plus, en position couchée, une forte corrélation a été observée entre rMSSD et HF. Cependant, comme cela a déjà été montré dans d'autres études, rMSSD montre une variabilité plus faible que HF, et rMSSD semble alors être un indice plus fiable pour interpréter les changements au jour le jour (Brembilla-Perrot et al., 1988). La position couchée n'est pas suffisante pour fournir une information complète sur l'activité cardiaque (Schmitt et al., 2015). Comme proposé par Farah et al. (2016), la précision des paramètres fréquentiels semble être inférieure à celle des indices temporels et l'analyse du rMSSD en position debout est plus pratique pour les gens qui veulent simplifier leur interprétation, parce que les valeurs présentent des amplitudes plus grandes et les variations sont plus faciles à détecter (Le Meur et al., 2013).

Cette étude comporte quelques limites. En premier lieu, l'analyse de VFC n'a pas été mise en relation avec des données de performances, ce qui aurait permis de mieux comprendre l'importance de l'activité orthosympathique et parasympathique sur la performance. Aussi, les indices de VFC auraient pu être corrélés avec des indices de fatigue perçue, afin de voir si les sensations du nageur étaient identiques aux observations des indices de VFC. D'autres études de cas pourront investiguer les indices de VFC sur des sportifs de haut niveau pour mieux comprendre les relations entre la fonction autonome du cœur et l'organisation de l'entraînement.

Enfin, les indices de VFC sont très sensibles et connaissent une variabilité très forte. Le simple suivi de ces indices n'est pas suffisant et doit être complété avec d'autres méthodes de suivi de l'état de fatigue.

Conclusion

En eau libre, une très forte charge d'entraînement est nécessaire pour atteindre des performances maximales. L'organisation de l'entraînement peut être optimisée par le contrôle fréquent de tests physiologiques et les analyses de VFC qui sont sensibles aux variations de la charge d'entraînement :

- L'activité parasympathique augmente avec le volume total d'entraînement et d'autant plus durant les stages d'entraînement, où le développement de l'endurance est accru. Elle a également été corrélée avec l'augmentation du volume passé en zone 2.
- L'activité orthosympathique augmente durant les périodes d'affûtage et est réduite après une augmentation du volume aérobie.

Les deux positions couchée et debout indiquent des changements de VFC qui dépendent de la distribution de l'intensité et soulignent l'importance de contrôler l'équilibre du système nerveux autonome.

Cette étude rapporte des données uniques sur l'entraînement d'un nageur champion du monde d'eau libre, incluant des informations nouvelles sur les capacités physiologiques, le volume et l'intensité d'entraînement d'un tel sportif. Une analyse de VFC quotidienne en position couchée et debout, avec des analyses temporelles et fréquentielles représente un outil utile pour monitorer la charge d'entraînement durant la saison. Les stages, les périodes de récupération et d'affûtage mènent à des organisations d'entraînements différentes et il semble alors essentiel de suivre les adaptations du nageur.

Lien étude 5 – étude 6 :

Cette étude a mis en évidence l'influence de la variation de la charge d'entraînement (volume, fréquence et intensité d'entraînement) sur l'état de récupération d'un nageur, en utilisant des tests de variabilité de la fréquence cardiaque. Des résultats différents ont été obtenus selon la période de la saison, en lien avec la distribution de l'intensité à l'entraînement.

En natation, les compétitions sont nombreuses et peuvent être utilisées pour maximiser les adaptations physiologiques. Il semble alors opportun d'investiguer les changements de l'équilibre du SNA avant, au cours et après une compétition de plusieurs jours.

Etude n°6 : Changements des indices VFC avant et après une période de compétition chez des nageurs internationaux

Résumé

Objectifs :

Evaluer l'impact d'une période d'affûtage (baisse du volume d'entraînement), puis d'une période de compétition (succession d'épreuves à très haute intensité) sur l'équilibre du système nerveux autonome chez des nageurs de niveau international.

Méthodes :

Des enregistrements d'indices VFC issus d'analyses temporelles et fréquentielles ont été analysés 5 jours avant le début des championnats de France (T1), le premier jour de la compétition (T2) et le jour suivant la compétition (T3) chez 7 nageurs de niveau international.

Résultats :

Après l'affûtage, en position couchée, les changements ont été de +1,76 (99% de chances d'augmentation pour Ln LF, +1,22 (97%) pour Ln LF+HF, +0,38 (74%) pour Ln rMMSD, +0,41 (72%) pour Ln HF et +0,57 (92%) pour Ln LF/HF. En position debout, les changements ont été de +1,76 (98%) pour Ln LF, +1,22 (98%) pour Ln LF+HF, +0,38 (92%) pour Ln rMMSD, +0,41 (94%) pour Ln HF et + 0,57 (incertain) pour Ln LF/HF. Après la phase de compétition, en position couchée, les changements ont été de -0,53 (80%) pour Ln rMSSD, -0,68 (68%) pour Ln HF, -0,66 (84%) pour LF+HF. En position debout, les changements ont été de -1,29 (97%) pour LF/HF.

Conclusion :

Ces résultats soulignent l'augmentation de tous les indices VFC après 5 jours d'affûtage, alors qu'une chute de l'activité parasympathique est observée après 4 jours de compétition. Ces données suggèrent que les indices VFC peuvent être des indicateurs utiles pour observer les adaptations cardiovasculaires durant l'affûtage et après des efforts successifs réalisés à haute intensité chez des nageurs de haut niveau.

PLA R, AUBRY A, TOUSSAINT JF, HELLARD P, SCHMIDT C. Effects of taper and competition period on heart rate variability indices in international swimmers.

International Journal of Sports Physiology and Performance. Soumis.

Beaucoup d'entraîneurs ont besoin de savoir comment leurs athlètes s'adaptent physiologiquement durant la période qui précède une compétition. L'affûtage vise à diminuer la fatigue, tout en évitant les désadaptations liées à la baisse du volume d'entraînement (Bosquet et al., 2007). Ces effets sur la performance sont très variables selon les individus (Mujika et al., 1996, Thomas et Busso 2005). Mais, dans le but d'optimiser l'entraînement, il est également essentiel d'observer la fatigue après la compétition. Dans la littérature, plusieurs indices de fatigue ont été décrits après une ou plusieurs journées de compétition comme la réduction du temps de sommeil (Sargent et Roach, 2016), l'augmentation du taux de cortisol (Balsalobre-Fernández et al., 2014), une diminution de la puissance anaérobie (Isacco et al., 2017), une augmentation des douleurs musculaires (Byrne et al., 2004). C'est pourquoi, il s'avère nécessaire d'adapter la récupération en fonction de la fatigue connue.

Le monitoring VFC semble être un bon moyen pour observer les impacts de la charge d'entraînement et des adaptations liées à l'entraînement (Plews et al., 2013). Plusieurs études de cas ont indiqué que des sportifs de haut niveau utilisaient ce type d'analyse pour réguler leur charge d'entraînement (Buccheit et al., 2010 ; Iellamo et al., 2002 ; Stanley et al., 2015 ; Plews et al., 2012 ; Plews et al., 2014). Quelques indices indiquent une augmentation de l'activité parasympathique alors que d'autres indiquent une activité orthosympathique, informant donc les variations de la balance sympathovagale en fonction de la charge d'entraînement. Certaines études sur des athlètes de haut niveau ont montré qu'une réduction du volume d'entraînement pouvait induire une prédominance orthosympathique (Stanley et al., 2015 ; Hug et al., 2014 ; Edmonds et al., 2013). Alors que d'autres études, ont mis en évidence une augmentation de l'activité orthosympathique juste après un effort à haute intensité, notamment lors d'une compétition (James et al., 2002 ; Bernardi et al., 1997 ; Edmonds et al., 2013).

Durant les compétitions, les nageurs doivent répéter des efforts maximaux qui affectent leur récupération (Hinzpeter et al., 2014). L'affûtage permet de préparer l'organisme en induisant des effets positifs comme une amélioration du coût énergétique (D'acquistio et al., 1992), l'augmentation de la fréquence cardiaque (Houmard et Jones, 1994), du niveau d'hémoglobine et d'hématocrite (Yamamoto et al., 1988) et de la puissance musculaire (Costill et al., 1985). Comme conseillé par Mujika et Thomas dans d'autres disciplines, Avalos et al. (2003) ont suggéré que la durée d'affûtage devait être adaptée pour chaque individu, et a montré que les nageurs masculins sprinters devaient avoir un temps d'affûtage plus important que les jeunes

filles de moyenne distance. D'autre part, Hellard et al. (2013) ont montré qu'au cours de la carrière d'un nageur, l'affûtage devait être plus long après une augmentation de la charge d'entraînement durant la période précédant l'affûtage. Peu d'études ont rapporté des résultats sur la fatigue induite après une compétition de natation, mais ont rappelé l'importance du type de récupération (Hinzpeter et al., 2014) et d'un restockage des apports d'énergie (Burke et Mujika, 2014). A notre connaissance, aucune étude a investigué les changements VFC après une compétition de natation.

Quelques études ont investigué les relations entre indices VFC et natation (Koenig et al., 2014). La plupart s'est concentrée sur les changements de l'équilibre de la balance autonome pendant l'affûtage (Cervantes-Blaquez et al., 2009 ; Fortes et al., 2017), après une session d'entraînement (Clemente-Suarez et al., 2017 ; Garet et al., 2004), ou en lien avec la performance (Merati et al., 2015, Atlaoui et al., 2007, Schmitt et al., 2006). Atlaoui et al. (2007), après 3 semaines de volume d'entraînement plus faible, ont montré une corrélation positive entre les indices parasympathiques et la performance chez des nageurs de haut niveau, et une corrélation négative avec les indices orthosympathiques. De manière opposée, pour des nageurs paralympiques ou prépubères soumis à de faibles charges d'entraînement, les études n'ont pas rapporté de changements entre les phases d'entraînement (Edmonds et al., 2015 ; Vinet et al., 2005). Hellard et al. ont aussi montré qu'une baisse de HF implique une augmentation de tous les types de fatigue alors qu'une élévation de LF augmente le risque de blessures musculaires (Hellard et al., 2011).

L'hypothèse de notre étude est qu'un court affûtage associé à une baisse du volume d'entraînement, puis un cycle compétitif très intense doivent entraîner des changements importants des indices de VFC chez des nageurs de haut niveau. Cette étude permettra de compléter les connaissances sur l'impact de l'intensité sur l'état de fatigue.

Méthodes

Participants

Cette étude a inclus un groupe d'entraînement de la FFN. Initialement, 8 nageurs devaient prendre part à l'étude, cependant, à cause d'une blessure pour un nageur, seulement les enregistrements de 7 nageurs ont pu être réalisés. Durant les 4 mois précédant l'étude, tous les participants se sont entraînés 24 à 26 heures, avec 10 ± 1 séances de natation par semaine, et 3 ± 1 séances de développement de la force.

Collecte des données

Durant cette étude, les enregistrements VFC ont été réalisés à 3 reprises. Le premier enregistrement a été réalisé 5 jours avant le début des championnats nationaux en petit bassin (T1). Le deuxième enregistrement a été réalisé avant le début de la compétition, le premier jour des championnats nationaux (T2). Durant ces 5 jours, le volume d'entraînement a été réduit de 40% et les sessions d'entraînement étaient majoritairement constituées d'allure à basse intensité, avec quelques sollicitations à haute intensité sur des sprints courts. Le dernier enregistrement a été réalisé le lendemain des 4 jours de compétition (T3). Les 4 jours de compétition étaient composés d'au moins 2 épreuves par jour à intensité maximale, associées à des sessions d'échauffement et de récupération, incluant principalement un entraînement à intensité basse.

Le protocole de test VFC a été réalisé et inspiré selon la description de Schmitt et al. (2013). Chaque test a été réalisé le matin juste après le réveil (Task Force, 1996). La même routine a été utilisée pour tous les tests. Le test dure 7 minutes en position couché, puis 6 minutes en position debout. Les intervalles RR ont été enregistrés à l'aide d'un émetteur de fréquence cardiaque (Polar H7, Polar Electro Oy, Finlande) et transmis par Bluetooth à une application smartphone (Elite HRV). Les enregistrements des intervalles RR ont été analysés lors des 256 dernières secondes de chaque position. La fréquence respiratoire n'a pas été guidée. Tous les enregistrements RR ont été visuellement inspectés et corrigés par le même chercheur. La puissance spectrale a été calculée par des transformations rapides de Fourier à l'aide du logiciel Kubios (Kuopio, Finlande). Les domaines fréquentiels et temporels ont été analysés.

Analyses statistiques

Les données ont été analysées en utilisant des statistiques inférentielles (Hopkins et al., 2009). Toutes les données ont été *log-transformées* avant l'analyse afin de réduire les biais des erreurs de non-uniformité. L'amplitude des changements (en pourcentage) de tous les indices VFC a été interprétée en utilisant le *smallest worthwhile change* (SWC), qui a été défini comme le plus petit changement utile basé sur les tailles d'effets de Cohen (0.2 x écart-type entre athlètes) (Hopkins et al., 2009). Les valeurs de seuil ont été de : 0,2 (trivial), > 0,2 (petit), > 0.6 (modéré), > 1.2 (important), > 2.0 (très important), and > 4.0 (extrêmement important) (Cohen, 1988). Le pourcentage de chances d'observer des différences plus ou moins grandes a été évalué qualitativement comme suit : <1%, presque certainement pas; 1%–5%, très probablement pas; 5%–25%, peu probable; 25%–75%, possible; 75%–95%, probable; 95%–99%, très probable;

and > 99%, presque certain. Si les chances d'avoir un effet positif et négatif étaient toutes les deux > 5%, la vraie différence a été estimée comme pas claire.

Résultats

Compétition

Les 7 participants ont nagé 10 ± 3 épreuves durant les 4 jours de compétition. Tous les nageurs sauf un ont participé à une Finale A, et 4 nageurs se sont classés sur au moins un podium. Six des sept nageurs ont ensuite participé à une compétition internationale.

Indices VFC

Après l'affûtage

En position couchée, une augmentation importante a été observée pour Ln LF (ES $\pm 90\%$ IC: $1,76 \pm 0,85$) et pour Ln LF+HF ($1,22 \pm 0,83$). De petites augmentations ont été observées pour Ln rMSSD ($0,38 \pm 0,50$), Ln HF ($0,41 \pm 0,65$) et Ln LF/HF ($0,57 \pm 0,45$). Enfin, une possible petite baisse pour Ln FC a été observée ($-0,24 \pm 0,36$) (Tableau 39).

Après les championnats de France

En position debout, une augmentation modérée a été observée pour Ln LF ($0,77 \pm 0,44$), Ln HF ($0,86 \pm 0,70$) et Ln LF+HF ($0,79 \pm 0,43$). Une petite augmentation a été observée pour Ln rMSSD ($0,53 \pm 0,40$) et une petite augmentation pour Ln FC ($-0,41 \pm 0,38$).

Position	Indice VFC	T1 Moy $\pm$ ET	T2 Moy $\pm$ ET	% Chance	Qualité de l'effet
Couché	FC	57 $\pm$ 7	55 $\pm$ 6	3/39/58	Possible petite baisse
	rMSSD	55 $\pm$ 28	88 $\pm$ 46	74/22/3	Possible petite hausse
	LF	1550 $\pm$ 551	4824 $\pm$ 3023	99/0/0	Quasi-certaine hausse importante
	HF	1781 $\pm$ 1196	2864 $\pm$ 2479	72/22/6	Possible petite hausse
	LF/HF	1,7 $\pm$ 1,71	2,78 $\pm$ 3,1	92/7/1	Probable petite hausse
	LF+HF	3331 $\pm$ 1151	7688 $\pm$ 5213	97/2/1	Très probable hausse importante
Debout	FC	93 $\pm$ 8	88 $\pm$ 12	1/15/84	Possible petite baisse
	rMSSD	20 $\pm$ 8	27 $\pm$ 11	92/8/1	Possible petite hausse
	LF	1346 $\pm$ 1059	2406 $\pm$ 1171	98/2/0	Très probable hausse modérée
	HF	84 $\pm$ 46	189 $\pm$ 116	94/5/1	Probable hausse modérée
	LF/HF	14,18 $\pm$ 5,43	15,35 $\pm$ 7,82	44/29/7	Pas clair
	LF+HF	1430 $\pm$ 1104	2595 $\pm$ 1235	98/2/0	Très probable hausse modérée

Tableau 39. Indices VFC avant et après 5 jours d'affûtage en position couchée et debout pour le groupe 7 nageurs internationaux.

En position couchée, une probable baisse modérée a été observée pour Ln rMSSD ($-0,53 \pm 0,69$), Ln HF ($-0,68 \pm 0,61$) et Ln LF+HF ($-0,66 \pm 0,83$). Une augmentation modérée pour Ln FC a été montrée ($0,86 \pm 0,75$) alors que les résultats ont été incertains pour Ln LF et Ln LF/HF (Tableau 38).

En position debout, une augmentation quasi-certaine a été observée pour Ln FC ($1,00 \pm 0,54$) alors qu'une baisse quasi-certaine a été observée pour Ln LF/HF ($-1,29 \pm 0,94$). Les résultats des autres indices étaient incertains.

Position	Indice VFC	Moy $\pm$ ET	Moy $\pm$ ET	% Chance	Qualité de l'effet
Couchée	FC	55 $\pm$ 6	62 $\pm$ 9	93/5/2	Probable hausse modérée
	rMSSD	88 $\pm$ 46	67 $\pm$ 45	4/15/80	Probable baisse modérée
	LF	4824 $\pm$ 3023	3834 $\pm$ 3862	8/16/76	Pas claire
	HF	2864 $\pm$ 2479	1733 $\pm$ 2106	2/7/91	Probable baisse modérée
	LF/HF	2.8 $\pm$ 3,1	3.5 $\pm$ 2.8	67/23/10	Pas claire
	LF+HF	7688 $\pm$ 5213	5567 $\pm$ 5604	5/12/84	Probable baisse modérée
Debout	FC	88 $\pm$ 12	100 $\pm$ 9	99/1/0	Quasi-certaine hausse
	rMSSD	27 $\pm$ 11	20 $\pm$ 5	8/20/73	Pas claire
	LF	2406 $\pm$ 1171	2082 $\pm$ 1354	18/29/53	Pas claire
	HF	189 $\pm$ 116	253 $\pm$ 158	68/22/10	Pas claire
	LF/HF	15.4 $\pm$ 7.8	8.0 $\pm$ 1.1	1/2/97	Quasi-certaine baisse
	LF+HF	2595 $\pm$ 1235	2336 $\pm$ 1510	21/31/49	Pas claire

Tableau 40. Indices VFC avant et après 4 jours de compétition en position couchée et debout pour le groupe 7 nageurs internationaux.

Discussion

Cette étude est la première à investiguer les changements VFC avant et après une compétition chez des nageurs de haut niveau, qui ont participé ensuite à des championnats internationaux. Les principaux résultats montrent une augmentation de tous les indices VFC durant les 5 jours d'affûtage, avec d'effets petits à importants, alors qu'une forte baisse de l'activité parasympathique est observée après les 4 jours de compétition.

Durant la phase d'affûtage, tous les indices VFC ont augmenté, reflétant une augmentation de l'activité globale du système nerveux autonome. Plusieurs études ont déjà mis en évidence l'augmentation de l'activité orthosympathique après une réduction du volume d'entraînement précédant une compétition (Stanley et al., 2015 ; Edmonds et al., 2013 ; Iellamo et al., 2002). Certains auteurs ont aussi montré que cette prédominance orthosympathique était liée à un

effondrement de l'activité parasympathique, dû à une anxiété précompétitive (Cervantes-Blasquez et al., 2009 ; Mateo et al., 2012). Hellard (2014) a d'ailleurs montré que l'activité parasympathique de nageurs de haut niveau diminuait en lien avec la charge, durant l'affûtage. De manière opposée, Atlaoui et al. (2007) ont montré chez des nageurs de haut niveau, que le niveau HF augmentait pendant l'affûtage et était corrélé avec le niveau de performance et inversement associée à l'état de fatigue ressentie. L'ensemble de ces résultats montre qu'il est nécessaire d'augmenter son activité orthosympathique durant l'affûtage, afin de se préparer à des efforts maximaux (Iellamo et al., 2002), mais que les variations de l'activité parasympathique sont très grandes et doivent être contrôlées.

Après la période de compétition, l'analyse VFC met en évidence une diminution de l'activité parasympathique, qui peut être liée à la fatigue engendrée par la succession d'efforts maximaux. Des études précédentes ont observé des résultats similaires (Edmonds et al., 2013). Parallèlement, la littérature montre également que des efforts à haute intensité impliquent ensuite une prédominance de l'activité orthosympathique (Furlan, 1993 ; Edmonds 2013). Cette activité serait causée par une augmentation des facteurs de stress, ce qui engendre une élévation de la fréquence cardiaque de repos et de la tension artérielle (Kuipers et Keizer, 1988). Ces réponses seraient associées à une prévalence des réactions cataboliques (Wolf, 1957) et augmentent le risque de blessures si l'hyperactivité orthosympathique persiste (Hellard et al., 2011).

Ces observations montrent qu'il est possible d'adapter la charge d'entraînement et les méthodes de récupération pour empêcher l'installation d'un état de fatigue chronique. L'immersion en eau froide après une compétition facilite le rebond de l'activité parasympathique (Bastos et al., 2012, Buchheit et al., 2009). Il a également été montré que la récupération passive entre des répétitions de sprints en natation, induisait une moins forte production d'ammoniaque plasmatique en comparaison avec une récupération active (Toubekis et al., 2005). Le type de récupération après une épreuve maximale en natation doit donc être adapté au stress infligé sur l'organisme et la récupération active ne semble pas forcément représenter la meilleure option. Aussi, un contrôle des états de l'humeur doit être réalisé après un entraînement intense, afin de ne pas subir les effets liés au stress (Hooper et al., 1999). Enfin, dans une étude sur des rameurs de haut niveau, Plews et al. (2014) ont rappelé l'importance de la réalisation d'exercices à basse intensité pour augmenter l'activité parasympathique et favoriser le restockage des réserves énergétiques. Cette récupération sera encore plus rapide pour des athlètes de haut niveau (Hautala et al., 2001).

Conclusion

Les résultats de cette étude ont quelques implications pour les entraîneurs qui souhaiteraient évaluer l'état de forme de leurs nageurs pendant et après une période d'affûtage. L'utilisation de l'analyse VFC permet de voir les adaptations à l'entraînement. Durant l'affûtage, les entraîneurs pourront diminuer la charge de l'entraînement jusqu'à ce que les indices VFC remontent. Aussi, après une compétition, les coaches pourront attendre le temps nécessaire pour que l'activité parasympathique revienne à un niveau acceptable, et que l'influence orthosympathique soit réduite.

Cette étude montre que l'équilibre du système nerveux autonome est influencé par les différentes charges d'entraînement, avec une augmentation de l'activité du système nerveux autonome après une période d'affûtage et un affaïssement de l'activité parasympathique menant vers une prédominance orthosympathique après une succession d'efforts à haute intensité. Ces résultats indiquent que l'augmentation de tous les indices VFC semble être un bon indicateur d'une amélioration de l'état de forme. Ils démontrent aussi que le processus de récupération peut être adapté après l'observation d'une baisse de l'activité parasympathique. Enfin, les résultats de cette étude ont également montré que les réponses VFC pouvaient être différentes selon la position du corps et doivent être prises avec précaution.

Liens entre toutes les études :

Toutes les études effectuées pendant ce travail de thèse ont permis de présenter divers résultats. Pour chacune d'entre elles, il a été observé que les stratégies d'entraînement viennent influencer la performance en natation de manière considérable.

Cependant, les adaptations physiologiques semblent prendre beaucoup de temps chez les sportifs de haut niveau et il devient de plus en plus difficile d'améliorer les performances au niveau international.

La gestion de la charge d'entraînement peut se faire grâce à une optimisation de la distribution de l'intensité d'entraînement afin d'induire des changements physiologiques, biologiques et techniques, tout en évitant l'installation d'états de fatigue.

Les réponses à l'entraînement sont individuelles et il doit être régulé en fonction des outils de suivi qui permettent de donner des indices sur l'état de forme des nageurs.

DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

L'ensemble de ces travaux a mis en évidence que la performance en natation atteint ses limites, mais elles peuvent être repoussées en optimisant plusieurs facteurs déterminants de la performance. Les stratégies d'entraînement prennent une part majeure de cette optimisation en facilitant le développement de plusieurs adaptations physiologiques. Pour autant, il existe un paradoxe entre les réponses métaboliques observées lors d'une épreuve maximale et la distribution de l'intensité à l'entraînement chez les meilleurs nageurs français.

La première partie de nos travaux expérimentaux a mis en évidence que les meilleurs nageurs français adoptent un entraînement construit sur une forte part dédiée au développement du seuil anaérobie et semble être l'entraînement traditionnel de la majorité des nageurs français (étude 1). Ce type d'entraînement se distingue fortement de celui rapporté par d'autres sportifs de haut niveau tels que des rameurs, des cyclistes sur piste ou des skieurs de fond.

La suite des travaux a confirmé le caractère mixte de l'épreuve du 100 mètres en natation, et a apporté une nouvelle compréhension des réponses métaboliques connues lors de cette épreuve (étude 2). Les résultats ont souligné l'importance de maximiser la puissance aérobie et la puissance anaérobie pour améliorer la performance. Ces adaptations physiologiques doivent se planifier dans le temps pour maximiser les gains en performance. Or, un paradoxe demeure : les nageurs doivent développer une forte puissance anaérobie lactique, alors que leur entraînement ne consacre à peine 10% d'efforts réalisés au niveau de cette haute intensité, se rapprochant des allures de compétition. Toutefois, les résultats de ces études soulignent l'importance de la contribution aérobie sur des épreuves de 100 mètres et la nécessité de développer le système aérobie chez des sprinteurs en natation.

La distribution de l'intensité est un des paramètres parmi lesquels il est possible de réguler la charge d'entraînement et de faire augmenter les capacités physiologiques du nageur. Un entraînement de type polarisé semble intéressant en natation, afin de réaliser davantage de volume à allure de course, sans engendrer une fatigue perçue plus importante (étude 3).

Cette répartition de l'intensité à l'entraînement induit des changements biologiques (étude 4) qui permettent d'expliquer l'apparition d'états de fatigue de l'organisme. Des analyses métabolomiques ont permis d'expliquer la fatigue ressentie par les nageurs en identifiant quelques métabolites associés à la sensation de fatigue. Une part excessive d'entraînement à moyenne et haute intensité peut amener à un état de stress trop important, en augmentant le risque de blessures et de maladies.

Enfin, la fin de nos travaux (étude 5 et 6) a permis de rationaliser l'état de fatigue des nageurs en utilisant un outil de monitoring non-invasif. La VFC a permis d'analyser les changements de la fonction cardiaque du SNA en fonction de plusieurs types d'entraînement.

Une des originalités de cette thèse est d'avoir utilisé de nouvelles méthodes d'entraînement, de recherche et de traitements statistiques sur des nageurs de bon et de haut niveau. Pour cela, nous avons choisi des protocoles inspirés des tests de terrain, déjà utilisés par les entraîneurs. Chaque étude a permis de tirer des enseignements, dédiés à l'optimisation de la performance de haut niveau en natation et transposables dans d'autres disciplines. Les deux chapitres suivants rappellent les apports de cette thèse, en termes de connaissances scientifiques et de nouvelles méthodes de recueil et d'analyse des données. Néanmoins, il sera également important de dire quelles sont les limites de ces études et en quoi de futures recherches pourront venir étayer ces travaux.

1. Apports épistémiques

1.1 Quantifier la charge d'entraînement en natation

Nos travaux ont permis de décrire l'organisation de l'entraînement d'une partie des meilleurs nageurs français (étude 1).

Jusqu'à présent, de nombreuses études ont présenté la charge d'entraînement des nageurs de haut niveau en décrivant le volume (souvent exprimé en kilomètres). Dans cette étude, la première originalité a été de présenter spécifiquement la distribution de l'intensité de l'entraînement selon 3 zones d'intensité contrairement à des études antérieures où cette distribution était présentée en 5 zones (Mujika et al., 1995 ; Mujika et al., 1996 ; Avalos et al., 2003 ; Hellard et al., 2006).

Cette distribution a été présentée en fonction de la spécialité des nageurs : sprint, moyenne distance ou longue distance. Il est intéressant de voir qu'environ la moitié du volume d'entraînement est réalisé autour du second seuil lactique comme déjà rapporté par plusieurs auteurs précédemment (Avalos et al., 2003 ; Hellard et al., 2006). Cette zone d'effort semble culturelle chez les entraîneurs français et peut s'expliquer par une importante efficacité de nage pour les vitesses qui lui sont associées (Dekerle et al., 2005).

D'autres observations ont également surligné la faible part d'entraînement réalisé à haute intensité, contrairement aux autres disciplines (Seiler et Kjerland, 2006 ; Steinacker et al., 1998 ; Schumacher et Mueller, 2002 ; Esteve-Lanao et al., 2005 ; Mujika, 2009). Seulement 10% de l'entraînement est effectué à une intensité sévère, alors que la demande anaérobie est prépondérante pour la majorité des épreuves en natation. Il est possible que d'autres formes de distribution soient possibles comme suggéré par Barnier (2012) en congrès technique.

De plus, il est intéressant de noter que les nageurs de demi-fond semblent s'entraîner davantage autour du seuil anaérobie, par rapport aux sprinteurs. Ce résultat montre bien que les nageurs spécialistes des épreuves d'endurance s'éloignent fortement du modèle polarisé. Parallèlement, il est curieux de voir que les sprinteurs dédient autant de part d'entraînement à haute intensité que les nageurs de demi-fond, alors que leurs épreuves de compétition demandent une intensité maximale de bout en bout, contrairement aux nageurs de demi-fond.

Des résultats complémentaires ont également surligné que le travail de force prend une place de plus en plus importante pour l'entraînement en natation.

L'ensemble de ces observations nous a amené à investiguer les réponses métaboliques des nageurs sur une épreuve maximale, afin d'identifier les variables physiologiques déterminantes de la performance, en amont d'une comparaison entre différents types de distribution de l'intensité à l'entraînement.

1.2 Le développement de chaque système énergétique : une nécessité ?

L'évaluation de la performance sur 100 mètres et la mesure des gaz expirés et de la lactatémie pour chaque portion de l'épreuve (25, 50 et 75 mètres), nous a permis de décrire les changements de contribution de chaque système énergétique durant le 100 mètres (étude 2). Ils ont facilité la compréhension des facteurs physiologiques de performance sur cette épreuve et de présenter les différences majeures entre les juniors et les seniors.

Les résultats ont montré l'immense importance du potentiel oxydatif, bien que l'épreuve dure approximativement une minute (selon la nage). Jusqu'à présent, aucune étude n'avait permis de montrer un temps d'ajustement de la consommation d'oxygène si rapide (Jalab et al., 2011), qui a caractérisé les meilleurs nageurs de notre étude. La puissance aérobie est donc essentielle à travailler à l'entraînement.

De plus, nous avons également observé l'importance du système anaérobie lactique, avec une activité plus importante pour le premier et le dernier 25 mètres. Cette puissance lactique était supérieure chez les seniors. Il semble qu'une voie possible de développement des capacités lactiques du nageur passe par un développement de ce processus énergétique dès la puberté, afin de maximiser ces adaptations physiologiques. Toutefois, cette observation est à nuancer puisque l'on peut considérer que la puissance lactique s'améliore naturellement avec la puberté et le développement des hormones sexuelles (Ferretti et al., 1994).

Enfin, bien que le système anaérobie alactique ne soit pas le plus prépondérant, il joue un rôle relativement important dans la dépense d'énergie totale, notamment en début de course.

En définitive, chacun des systèmes énergétiques prend une place importante pour la réalisation d'une performance maximale en natation. L'optimisation de l'entraînement peut se conduire au regard des capacités physiologiques individuelles identifiées lors de ce type de test. Selon le profil du nageur, une adaptation de l'entraînement sera nécessaire. L'entraînement doit également être périodisé de manière adéquate afin d'induire le développement métabolique des systèmes énergétiques recherchés.

Cependant, cette étude n'a pas observé les différences de réponses métaboliques en fonction du type d'entraînement. Il sera alors intéressant de voir quelles influences peuvent avoir ces différentes stratégies d'entraînement sur la consommation d'oxygène et l'accumulation de lactate sanguin. Nous pouvons supposer qu'un entraînement autour du seuil anaérobie facilitera une meilleure tolérance à la fatigue alors qu'un entraînement de type polarisé favorisera le temps d'ajustement de la consommation maximale d'oxygène.

1.3 Optimiser la distribution de l'intensité à l'entraînement

La première partie de nos travaux (étude 1) a confirmé la culture des entraîneurs français à prescrire un entraînement fortement basé sur la réalisation d'allures proches du seuil anaérobie. Cette zone d'intensité semble induire une bonne efficacité de nage, ce qui expliquerait en partie l'intérêt de nager à cette allure (Dekerle et al., 2005).

Toutefois, la suite de nos travaux a permis d'évaluer un type d'entraînement où l'augmentation de la part du volume nagé à haute intensité de 10 à 15% (50% d'augmentation) représente une augmentation significative, associée à un fort volume aérobie et une forte réduction de ce travail au seuil (de 30-40% à 5%) (étude 3).

Il a été conclu que les améliorations de performance obtenues avec la modalité polarisée pourraient être dues à une proportion plus importante de l'entraînement réalisée à allure de course, qui constitue un entraînement plus spécifique sur les plans physiologiques et techniques. En effet, une des séries principales de ce type d'entraînement consiste à réaliser une série dite « fractionnée » avec des répétitions d'efforts à haute intensité associée à une récupération active. Ce type de séances semble permettre de s'entraîner à allures de course sur des durées plus longues, avec une récupération relativement rapide (meilleure qualité d'entraînement).

Par ailleurs, une fatigue ressentie plus importante dans la modalité au seuil a été observée. Cette fatigue supplémentaire pourrait être induite par les impacts cumulés de l'entraînement au seuil et de l'entraînement à haute intensité (20% pour le groupe polarisé versus 35% pour l'entraînement au seuil). Il est probable que ces efforts excessifs aient engendré des perturbations au niveau musculaire, hormonal et immunitaire. Une hypothèse qui n'a pas pu être vérifiée suppose également que ce type d'entraînement oblige à consommer beaucoup de glycogène. Le restockage des réserves énergétiques s'avère alors plus compliqué et la sensation de fatigue arrive plus rapidement avec ce type d'entraînement.

De plus les post-tests ont été réalisés en semaine 6, soit une semaine après le pic de charge qui était positionné en semaine 5. Des études en natation (Mujika et al., 1996 ; Atlaoui et al., 2004, 2006) ont clairement mis en évidence que les pics de charges étaient liés à une légère diminution des performances, à une modification du statut hormonal (diminution du ratio cortisol/cortisone, diminution de l'excrétion des catécholamines) et à une augmentation de la fatigue perçue. Il aurait été intéressant de voir les effets de cet entraînement sur la performance, après deux semaines d'affûtage. Il est envisageable qu'une récupération adéquate puisse induire des réponses de performance similaires à celles observées avec l'entraînement polarisé.

Ce type d'entraînement semble devenir une nouvelle voie de développement pour les entraîneurs de natation qui souhaitent faire évoluer leurs méthodes d'entraînement. Malheureusement, les conditions de l'étude n'ont pas permis d'évaluer précisément les changements de la contribution de chaque système énergétique. De futures investigations devront aller dans ce sens afin de mieux déterminer les effets physiologiques de ces deux types d'entraînement. Toutefois, les résultats laissent penser que l'amélioration des capacités physiologiques chez des nageurs de haut niveau demande beaucoup de temps. Un changement de type d'entraînement sur 6 semaines ne semble pas suffisant pour générer des adaptations significatives.

Ces observations supposent que les meilleures performances observées pour le groupe polarisé sont principalement dues à une moindre fatigue de la commande centrale de l'organisme, plutôt qu'à des améliorations des capacités physiologiques.

1.4 Comprendre les mécanismes de fatigue associés aux différentes intensités d'entraînement

Cette thèse a permis d'évaluer un ensemble d'outils de suivi de l'entraînement qui peuvent être intéressants pour les entraîneurs. A travers nos différents travaux, nous avons pu alimenter les connaissances scientifiques autour des perturbations biologiques associées aux différentes stratégies d'entraînement.

Durant l'étude n°3, nous avons mis en évidence que le suivi des états de fatigue par un petit questionnaire avec 7 items pouvait décrire les évolutions de fatigue perçue au cours d'une période d'entraînement. Les résultats ont montré des différences entre les deux groupes d'entraînement et ont souligné l'importance d'un suivi des états de fatigue par questionnaires afin d'adapter l'entraînement pour les sportifs.

Ces résultats ont également été validés par l'étude 4 qui a mis en évidence que l'activité de certains métabolites était modifiée en fonction de l'état de fatigue perçue par les nageurs. Les analyses statistiques ont souligné des modifications importantes sur l'activité des catécholamines et des glandes surrénales. Une part excessive de l'entraînement réalisée à moyenne et haute intensité implique une fatigue centrale considérable. Ces résultats rappellent également l'importance du suivi nutritionnel pour les sportifs de haut niveau, afin d'apporter les nutriments nécessaires pour l'apport d'énergie et retarder l'état de fatigue.

Les deux études (5 et 6) suivantes ont également montré un lien fort entre la charge d'entraînement et la fonction cardiaque du système nerveux autonome. Ce dernier a été très sensible aux variations de charge et aux intensités d'entraînement. Après de nombreux efforts successifs à haute intensité, une hyperactivité orthosympathique a été observée, alors qu'une prédominance parasympathique était permise après des efforts réalisés à basse intensité.

De plus, il est important de préciser que la détermination des intensités en natation demeure complexe. La réalisation d'efforts à basse intensité nécessite de nager avec une efficacité propulsive correcte avec une vitesse associée suffisante. C'est pour cela que des tests physiologiques et des outils de contrôle de la fatigue doivent être mis en place pour observer les effets de l'entraînement sur chaque nageur.

L'ensemble de ces travaux ont tous conclu qu'il est possible de monitorer la charge d'entraînement et d'anticiper des états potentiels de fatigue, avec une grande diversité de moyens offerte aux entraîneurs,

2 Apports méthodologiques

Au cours de nos différents travaux de thèse, nous avons essayé de développer de nouvelles approches sur le plan méthodologique, afin d'optimiser au maximum l'interprétation de nos résultats expérimentaux et d'apporter un nouveau regard sur le traitement des données appliquées aux sciences du sport.

2.1 L'approche métabolomique non ciblée

L'approche métabolomique non ciblée se distingue de l'approche ciblée qui vise à quantifier l'activité de certains métabolites précis et identifiés préalablement. La méthode globale non ciblée permet de se consacrer à l'analyse de nouveaux biomarqueurs. Cette technique a déjà été utilisée dans plusieurs champs scientifiques comme la pharmacologie, la nutrition et la toxicologie. D'un autre côté, quelques études métabolomiques non ciblées ont permis de présenter des métabolites, marqueurs de stress, de fatigue ou de performance chez des sportifs.

Dans notre étude, nous avons pu dégager une dizaine de métabolites, discriminants de l'état de fatigue et du type d'entraînement. Plusieurs types de métabolites ont été identifiés et étaient impliqués dans différentes fonctions de l'organisme : sécrétion hormonale, cycles menstruels, production d'énergie, etc... Cette approche appliquée à des sportifs de haut niveau constitue donc une nouvelle voie pour comprendre les adaptations biologiques associées à l'entraînement et peut contribuer à l'optimisation des programmes d'entraînement et permettre de :

- Identifier des nouveaux biomarqueurs de fatigue ou de performance
- Etablir des relations entre nutrition et exercice
- Développer les méthodes de détection de produits dopants

2.2 Le suivi quotidien de la variabilité de la fréquence cardiaque

Dans notre étude de cas sur le suivi de la charge d'entraînement d'un nageur champion du monde du 25 kilomètres en eau libre, nous avons pu mettre en évidence les effets de la charge sur l'activité du système nerveux autonome. Certaines publications avaient déjà montré

l'importance d'un suivi avec au moins 3 tests par semaine pour obtenir des données fiables (Plews et al., 2013). D'autres avaient également montré l'intérêt d'utiliser les méthodes fréquentielles, en position couchée et debout pour effectuer les analyses de la variabilité de fréquence cardiaque (Schmitt et al., 2015).

Dans notre étude, nous avons utilisé toutes ces préconisations et nous avons pu caractériser des changements des activités des sous-systèmes parasympathiques et orthosympathiques selon le cycle d'entraînement, le jour de la semaine et la distribution de l'intensité de l'entraînement. Le protocole mis en place peut sembler lourd mais ce suivi quotidien permet d'avoir un indice fiable sur l'état de forme de l'athlète. Cependant, il convient de noter que les indices observés dans le cadre de la VFC sont très sensibles à l'environnement extérieur et ils doivent être complétés par d'autres outils de suivi comme les questionnaires de fatigue ou les analyses biologiques.

2.3 L'apport des statistiques qualitatives

Dans plusieurs de nos études, nous avons préféré avoir recours à des méthodes statistiques récentes, qui permettent de compléter les analyses réalisées avec des statistiques plus traditionnelles. Ces dernières établissent une significativité ou non basée sur une valeur de p-value issue d'un test d'hypothèse nulle. Dans des études centrées sur les sportifs de haut niveau où la cohorte de participants est généralement faible, la taille de l'échantillon ne permet pas de bien mesurer l'ampleur des différences entre les groupes étudiés. Nous avons alors opté pour des statistiques « qualitatives » qui permettent de caractériser les changements observés.

Les statistiques de William Hopkins

Pour notre étude expérimentale, nous avons utilisé les statistiques inférentielles selon les recommandations de Batterham et Hopkins (2006). Elles ont également été utilisées pour l'étude 6. Elles présentent l'avantage d'estimer l'effet d'une variable et aussi de quantifier la taille de cet effet.

Afin de décrire les résultats de notre étude expérimentale et donner des pistes de développement aux entraîneurs sur les effets des différents types d'entraînement, ces statistiques ont permis de quantifier les probabilités d'efficacité de chaque entraînement. Le raisonnement en critères qualitatifs de type nocif/trivial/bénéfique permet de laisser l'interprétation libre à chacun sur la nécessité de choisir tel ou tel type d'entraînement. Chaque entraîneur pourra choisir s'il souhaite prendre des risques.

CONCLUSION GENERALE

Au cours de ce travail de thèse, nous avons pu apporter une nouvelle compréhension de la performance de haut niveau en natation. Après avoir abordé succinctement le caractère inné de la performance dans notre revue de littérature, et présenter les réponses métaboliques caractéristiques de la haute performance en natation, nous avons pu révéler plusieurs stratégies d'entraînement pour maximiser les capacités physiologiques des nageurs.

Une illustration des facteurs physiologiques de la performance en natation a montré la nécessité de développer conjointement la puissance aérobie et la puissance anaérobie pour la majorité des épreuves en natation.

Malgré la forte culture de développement du seuil anaérobie à l'entraînement chez plusieurs entraîneurs français, nous avons montré qu'un autre type d'entraînement était efficace : le modèle polarisé. Cet entraînement semble favoriser des adaptations techniques, en augmentant le volume réalisé à haute intensité, tout en évitant d'induire une fatigue importante, en associant un fort volume à basse intensité.

Ces observations montrent qu'il est possible de varier l'entraînement. Il est d'ailleurs souhaitable que l'entraînement soit modulé au cours de la carrière d'un nageur, en prenant en compte tous les déterminants de la performance comme les variables physiologiques, biomécaniques, morphologiques ou psychologiques.

Le développement de ces capacités physiologiques pour atteindre une production d'énergie maximale doit passer par plusieurs moyens de contrôle. Des tests adaptés peuvent permettre d'observer les adaptations physiologiques d'un nageur (tests maximaux ou incrémentés avec recueils de la consommation d'oxygène et de la lactatémie).

De plus, plusieurs outils (analyses biologiques, variabilité de fréquence cardiaque, questionnaires de fatigue) ont été utilisés afin de réguler la charge d'entraînement, dans le but de maximiser les gains en performance, les améliorations techniques et physiologiques, tout en prévenant les états de fatigue potentiels. La fatigue centrale semble être le principal facteur limitant de la performance chez les nageurs de haut niveau.

Ces travaux s'incluent dans les orientations des laboratoires de recherche de l'INSEP et du département « optimisation de la performance » de la FFN, où les objectifs sont de transférer la connaissance scientifique auprès des entraîneurs et de leurs athlètes. Dans ce cadre, cette thèse a permis de dégager quelques nouvelles perspectives pour les entraîneurs :

Pistes de développement pour l'entraîneur :

- 1) La consommation maximale d'oxygène au cours d'un 100 mètres arrive aux environs du 50 mètres pour les nageurs de haut niveau
- 2) La puissance lactique au cours d'un 100 mètres se trouve durant le premier et le dernier 25 mètres
- 3) La puissance lactique est plus importante chez les seniors, elle augmente naturellement avec la puberté
- 4) La contribution de chaque système énergétique au cours d'un 100 mètres est de 18/31/51% pour les systèmes alactique, lactique et aérobie respectivement.
- 5) Une part de 15% de l'entraînement réalisé à haute intensité semble nécessaire pour induire des adaptations techniques, spécifiques aux allures de courses.
- 6) Un travail trop important d'entraînement autour du seuil anaérobie semble engendrer une fatigue perçue, qui demande un temps de récupération important.
- 7) La métabolomie non ciblée apparaît comme une technique non invasive permettant d'observer des changements biologiques après l'entraînement
- 8) L'activité de la tyrosine, de la carnitine et de la progestérone semblent représenter de nouveaux biomarqueurs de l'état de fatigue chez des nageurs entraînés
- 9) Une supplémentation en tyrosine et carnitine semble pouvoir retarder l'apparition d'état de fatigue
- 10) Le suivi quotidien des indices de variabilité de fréquence cardiaque apporte des informations sur l'équilibre du système nerveux autonome
- 11) Les périodes de fort volume d'entraînement se caractérisent généralement par une augmentation de l'activité parasympathique
- 12) Les périodes d'affûtage se caractérisent généralement par une prédominance de l'activité orthosympathique
- 13) La succession d'efforts à haute intensité notamment lors de compétitions génère une hyperactivité orthosympathique
- 14) L'utilisation de nouvelles technologies permet de mettre en relation facilement les paramètres physiologiques et biomécaniques de la performance en natation
- 15) La vitesse au seuil anaérobie et l'indice de nage sont deux facteurs déterminants de la performance

REFERENCES

- Ackland TR, Ong KB, Kerr DA, et al. Morphological characteristics of Olympic sprint canoe and kayak paddlers. *J Sci Med Sport*. 2003;6(3):285-94.
- Afonso J, Nikolaidi PT, Souza P, Mesquita I. Is empirical research on periodization trustworthy? A comprehensive review of conceptual and methodological issues. *J Sports Sci Med*. 2017;16(1):27-34.
- Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev*. 2008;88(1):287-332.
- Allen SV, Vandenberghe TJ, Hopkins WG. Career performance trajectories of Olympic swimmers: benchmarks for talent development. *Eur J Sport Sci*. 2014;14(7):643-51.
- Alonso A, Marsal S, Julià A. Analytical methods in untargeted metabolomics: state of the art in 2015. *Front Bioeng Biotechnol*. 2015;5:3:23.
- Alves F, Gomes-Pereira J. Influence of stroke mechanics on swimming economy in front crawl. In : Eriksson BO, Gullstrand L (eds) *Proceedings of the XIIth FINA world congress on sports medicine*, Goteborg. 1997;407-415.
- Alves F, Reis J, Vleck V, Bruno P, Millet G. Oxygen uptake kinetics in heavy intensity exercise and endurance performance in swimmers. *Med Sci Sport Exerc*. 2009;41:978.
- Al-Ani M, Munir SM, White M, Townsend J, Coote JH. Changes in R-R variability before and after endurance training measured by power spectral analysis and by the effect of isometric muscle contraction. *Eur J Appl Physiol*. 1996; 74: 397 – 403.
- Al-Khelaifi F, Diboun I, Donati F, Botrè F, Alsayrafi M, Georgakopoulos C, Suhre K, Yousri NA, Elrayess MA. (2018). A pilot study comparing the metabolic profiles of elite-level athletes from different sporting disciplines. *Sports Med*. 5;4(1),2.
- American College of Sports Medicine. Position statement on the recommended quantity and quality of exercise for developing and maintaining fitness in healthy adults. *Med Sci Sports*. 1978;10(3):7-10.
- Amirshaybani HR, Crecelius GM, Timothy NH, Pfeiffer M, Saggars GC, Manders EK. The natural history of the growth of the hand: I. Hand area as a percentage of body surface area. *Plast Reconstr Surg*. 2001;107(3):726-33.

- Anderson M, Hopkins W, Roberts A, Pyne DB. Monitoring seasonal and long-term changes in test performance in elite swimmers. *Eur J Sport Sci.* 2006;6:145-154.
- Anthero-Jacquemin J, Haida A, Dorsey M, Marck A, Sedeaud A, Shipman J, Berthelot G, Toussaint JF. Evolution du sport : une sélection naturelle ? IRMES – VIIIème symposium Strasbourg et Xème Conférence nationale médicale interfédérale du CNOSF. 2013.
- Arcelli E, Canova R. Scientific training for the Marathon. Monaco: International Association of Athletics Federation. 1999.
- Arellano R, Pardillo S, Gavilán A. Underwater undulatory swimming: Kinematic characteristics, vortex generation and application during the start, turn and swimming strokes. In: Proceedings of the XXth International Symposium on Biomechanics in Sports Universidad de Granada. 2002. Benjanuvatra N, Blanksby BA, Elliott BC. Morphology and hydrodynamic resistance in young swimmers. *Pediatr Exerc Sci.* 2001;13:246–55.
- Arroyo-Toledo JJ, Clement VJ, Gonzalez-Ravé JM. The effects of ten weeks block and reverse periodization training on swimming performance and body composition of moderately trained female swimmers. *Journal of Swimming Research.* 2013;21:1.
- Astrand PO, Saltin B. Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. *J Appl Physiol.* 1961;16:977-81.
- Atlaoui D, Duclos M, Gouarne C, Lacoste L, Barale F, Chatard JC. 24-hr urinary catecholamine excretion, training and performance in elite swimmers. *Int J Sports Med.* 2006;27: 314-321.
- Atlaoui D, Pichot V, Lacoste L, Barale F, Lacour JR, Chatard JC. Heart rate variability, training variation and performance in elite swimmers. *Int J Sports Med.* 2007;28(5):394-400.
- Aubert AE, Beckers F, Ramaekers D. Short-term heart rate variability in young athletes. *J Cardiol* 2001;37 Suppl 1:85-8.
- Aubert AE, Seps B, Beckers F. Heart rate variability in athletes. *Sports Med.* 2003;33(12):889-919.
- Avalos M, Hellard P, Chatard JC. Modeling the training-performance relationship using a mixed model in elite swimmers. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35(5): 838–846.
- Avlonitou E. Somatometric variables for preadolescent swimmers. *J Sports Med Phys Fitness.* 1994;34(2):185-91.

- **B**aldassarre R, Bonifazi M, Zamparo P, Piacentini MF. Characteristics and Challenges of Open-Water Swimming Performance: A Review. *Int J Sports Physiol Perform.* 2017;1;12(10):1275-1284.
- Balsalobre-Fernández C, Tejero-González CM, del Campo-Vecino J. Hormonal and neuromuscular responses to high-level middle- and long-distance competition. *Int J Sports Physiol Perform.* 2014;9(5):839-44.
- Balyi I, Hamilton A. Long-Term Athlete Development - Trainability in Childhood and Adolescence, Windows of Opportunity and Optimal Trainability. Victoria: National Coaching Institute British Columbia & Advanced Training and Performance Ltd;2004.
- Banderet LE, Lieberman HR. Treatment with tyrosine, a neuro- transmitter precursor, reduces environmental stress in humans. *Brain Res Bull.* 1989;22(4):759–62.
- Barbosa TM, Bragada JA, Reis VM, Marinho DA, Carvalho C, Silva AJ. Energetics and biomechanics as determining factors of swimming performance: updating the state of the art. *J Sci Med Sport.* 2010;13:262–9.
- Barbosa TM, Fernandes R, Keskinen KL, Colaço P, Cardoso C, Silva J, Vilas-Boas JP. Evaluation of the energy expenditure in competitive swimming strokes. *Int J Sports Med.* 2006;27(11):894-9.
- Barbosa TM, Fernandes RJ, Keskinen KL, Vilas-Boas JP. The influence of stroke mechanics into energy cost of elite swimmers. *Eur J Appl Physiol.* 2008;103(2):139-49.
- Barbosa TM, Morais JE, Costa MJ, Goncalves J, Marinho DA, Silva AJ. Young swimmers' classification based on kinematics, hydrodynamics, and anthropometrics. *J Appl Biomech.* 2014;30(2):310-5.
- Barnier R. The training of an Olympic champion. In *FINA Swimming Coaches Golden Clinic* [In line]. 2012.
- Barrett B, Brown R, Mundt M, Safdar N, Dye L, Maberry R, Alt J. The Wisconsin Upper Respiratory Symptom Survey is responsive, reliable, and valid. *J Clin Epidemiol.* 2005;58(6):609-17.
- Barry B, Enoka R. The neurobiology of muscle fatigue: 15 years later. *Integrative and Comparative Biology.* 2007;47: 465-473.
- Barstow TJ. Characterization of $\dot{V}O_2$ kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 1994;26(11):1327-34.

- Bastos FN, Vanderlei LC, Nakamura FY, Bertollo M, Godoy MF, Hoshi RA, Junior JN, Pastre CM. Effects of cold water immersion and active recovery on post-exercise heart rate variability. *Int J Sports Med.* 2012;33: 873–879.
- Baumert M, Brechtel L, Lock J, Hermsdorf M, Wolff R, Baier V, Voss A. Heart rate variability, blood pressure variability, and baroreflex sensitivity in overtrained athletes. *Clin J Sport Med.* 2006;16(5):412-7.
- Baxter-Jones A, Goldstein H, Helms P. The development of aerobic power in young athletes. *J Appl Physiol* (1985). 1993;75(3):1160-1167.
- Beach ML, Whitney SL, Dickoff-Hoffman S. Relationship of shoulder flexibility, strength, and endurance to shoulder pain in competitive swimmers. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1992;16(6):262-8.
- Bejan A, Jones EC, Charles JD. The evolution of speed in athletics: why the fastest runners are black and swimmers white. *Int J Des Nat Ecodynamics.* 2010;5:199–211.
- Bell PG, Furber MJ, Van Someren KA, Antón-Solanas A, Swart J. The Physiological Profile of a Multiple Tour de France Winning Cyclist. *Med Sci Sports Exerc.* 2017;49(1):115-123.
- Benjanuvatra N, Blanksby BA, Elliott BC. Morphology and Hydrodynamic Resistance in Young Swimmers. *Pediatric Exercise Science.* 2001;13(3):246-255.
- Ben Zaken S, Eliakim A, Nemet D, Rabinovich M, Kassem E, Meckel Y. ACTN3 Polymorphism: Comparison Between Elite Swimmers and Runners. *Sports Med Open.* 2015;1(1):13.
- Ben Zaken S, Meckel Y, Dror N, Nemet D, Eliakim A. IGF-I and IGF-I receptor polymorphisms among elite swimmers. *Pediatr Exerc Sci.* 2014 Nov;26(4):470-6.
- Ben-Zaken S, Meckel Y, Nemet D, Eliakim A. The combined frequency of IGF and myostatin polymorphism among track & field athletes and swimmers. *Growth Horm IGF Res.* 2017;32:29-32.
- Ben-Zaken S, Meckel Y, Nemet D, Kassem E, Eliakim A. Increased Prevalence of the IL-6-174C Genetic Polymorphism in Long Distance Swimmers. *J Hum Kinet.* 2017;1;58:121-130.
- Bernardi L, Passino C, Spadacini G, Calciati A, Robergs R, Greene R, Martignoni E, Anand I, Appenzeller O. Cardiovascular autonomic modulation and activity of carotid baroreceptors at altitude. *Clin Sci (Lond).* 1998;95(5):565-73.

- Bernardi L, Passino C, Robergs R, Appenzeller O. Acute and persistent effects of a 46-kilometer wilderness trail run at altitude: cardiovascular autonomic modulation and baroreflexes. *Cardiovasc Res.* 1997;34(2):273-80.
- Berthelot G, Len S, Hellard P, Taffet M, El Helou N, Escolano S, Guillaume M, Schaal K, Nassif H, Desgorces FD, Toussaint JF. Technology & swimming: 3 steps beyond physiology. *Mater Today.* 2010;13:46–51.
- Berthelot G, Sedeaud A, Marck A, Antero-Jacquemin J, Schipman J, Saulière G, Marc A, Desgorces FD, Toussaint JF. Has Athletic Performance Reached its Peak? *Sports Med.* 2015;45(9):1263-1271.
- Bertucci WM, Betik AC, Duc S, Grappe F. Gross efficiency and cycling economy are higher in the field as compared with on an Axiom stationary ergometer. *J Appl Biomech.* 2012;28(6):636-44.
- Bigland-Ritchie B. EMG/force relations and fatigue of human voluntary contractions. *Exerc Sport Sci Rev.* 1981;9:75–117.
- Billat VL, Demarle A, Slawinski J, Paiva M, Koralsztein JP. Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(12):2089-97.
- Billat V, Lepretre PM, Heugas AM, Laurence MH, Salim D, Koralsztein JP. Training and bioenergetic characteristics in elite male and female Kenyan runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35(2):297-304.
- Binzoni T, Ferretti G, Schenker K, Cerretelli P. Phosphocreatine hydrolysis by ^{31}P NMR at the onset of constant $\pm$ load exercise in humans. *J Appl Physiol.* 1992;73:1644-1649.
- Bonaventura JM, Sharpe K, Knight E, Fuller KL, Tanner R1, Gore CJ. Reliability and accuracy of six hand-held blood lactate analysers. *J Sports Sci Med.* 2015;1;14(1):203-14.
- Booth FW, Thomason DB. Molecular and cellular adaptation of muscle in response to exercise: perspectives of various models. *Physiol Rev.* 1991;71(2):541-85.
- Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med* 1970;2:92-98.
- Bosquet L, Montpetit J, Arvisais D, Mujika I. Effects of tapering on performance: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(8):1358-65.
- Bowman, B. Senior Swimming. In ASCA World Clinic. 2008.

- Brembilla-Perrot B, Houriez P, Jacquemin L, Houplon P, Claudon O, Danchin N. Reproducibility of heart rate variability in the chronic phase of myocardial infarction. *Arch Mal Coeur Vaiss*. 1998;91(2):245-52.
- Breuer H, Skyschally A, Schulz R, Martin C, Wehr M, Heusch G. Heart rate variability and circulating catecholamine concentrations during steady state exercise in healthy volunteers. *British Heart Journal*. 1993;70: 144-149.
- Buchheit M, Mendez-Villanueva A, Quod MJ, Poulos N, Bourdon P. Determinants of the variability of heart rate measures during a competitive period in young soccer players. *Eur J Appl Physiol*. 2010;109(5):869-78.
- Buchheit M, Peiffer JJ, Abbiss CR, Laursen PB. Effect of cold water immersion on postexercise parasympathetic reactivation. *Am J Physiol*. 2009;296:421-427.
- Buhl C, Knechtle B, Rüst CA, Rosemann T, Lepers R. A comparison of medley and freestyle performance for national and international swimmers between 1994 and 2011. *Open Access J Sports Med*. 2013;26;4:79-87.
- Burke LM, Mujika I. Nutrition for recovery in aquatic sports. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2014;24(4):425-36.
- Byrne C, Twist C, Eston R. Neuromuscular function after exercise-induced muscle damage: theoretical and applied implications. *Sports Med*. 2004;34(1):49-69.
- **C**apelli, C. Physiological determinants of best performances in human locomotion. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1999;80(4):298-307.
- Capelli C, Zamparo P, Cigalotto A, Francescato MP, Soule RG, Termin B, Pendergast DR, Di Prampero PE. Bioenergetics and biomechanics of front crawl swimming. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. 1995;78:674–9.
- Capelli C, Pendergast DR, Termin B. Energetics of swimming at maximal speeds in humans. *Eur J Appl Physiol*. 1998;78:385–93.
- Cappaert JM, Bone M, Troup JP. Intensity and performance related differences in propelling and mechanical efficiencies. In: MacLaren D, Reilly T, Lees A, editors. *Swimming science, VI: biomechanics and medicine in swimming*. London: E & FN Spon. 1992:49–52.
- Cervantes Blásquez JC, Rodas Font G, Capdevila Ortís L. Heart-rate variability and precompetitive anxiety in swimmers. *Psicothema*. 2009;21(4):531-6.
- Charles JD, Bejan A. The evolution of speed, size and shape in modern athletics. *J Exp Biol*. 2009;212(Pt 15):2419-25.

- Chatard JC, Atlaoui D, Pichot V, Gourné C, Duclos M, Guézennec YC. Training follow up by questionnaire fatigue, hormones and heart rate variability measurements. *Science & Sports*. 2003;18:302–304.
- Chatard JC, Bourgoin B, Lacour JR. Passive drag is still a good evaluator of swimming aptitude. *Eur J Appl Physiol*. 1990;59:399–404.
- Chatard JC, Lavoie JM, Lacour JR. Analysis of determinants of swimming economy in front crawl. *Eur J Appl Physiol*. 1990;61:88–92.
- Chatard JC, Lavoie JM, Lacour JR. Energy cost of front-crawl swimming in women. *Eur J Appl Physiol*. 1991;63:12–6.
- Chatard JC, Padilla S, Cazorla G, Lacour JR. Influence of body height, weight, hydrostatic lift and training on the energy cost of the front crawl. *The New Zealand Journal of Sports Medicine*. 1985;13, 82-84.
- Chaverri D, Iglesias X, Schuller T, Hoffmann U, Rodriguez FA. Estimating peak oxygen uptake based on postexercise measurements in swimming. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2016;41(6):588-596.
- Clemente-Suárez VJ, Arroyo-Toledo JJ. Use of Biotechnology Devices to Analyse Fatigue Process in Swimming Training. *J Med Syst*. 2017;41(6):94.
- Coelho J, Fernandes R, Vilas-Boas JP. Kinetics of glycolysis during the short-course 100-m crawl swimming event. *J Sports Sci*. 2016;4(23):177-183.
- Connaboy C, Coleman S, Sanders RH. Hydrodynamics of undulatory underwater swimming: a review. *Sports Biomech*. 2009;8:360–80.
- Cooper CS, Taaffe DR, Guido D, Packer E, Holloway L, Marcus R. Relationship of chronic endurance exercise to the somatotrophic and sex hormone status of older men. *Eur J Endocrinol*. 1998;138(5):517-23.
- Costa MJ, Bragada JA, Mejias JE, Louro H, Marinho DA, Silva AJ, Barbosa TM. Tracking the performance, energetics and biomechanics of international versus national level swimmers during a competitive season. *Eur J Appl Physiol*. 2012;112(3):811-20.
- Costa AM, Silva AJ, Garrido ND, Louro H, de Oliveira RJ, Breitenfeld L. Association between ACE D allele and elite short distance swimming. *Eur J Appl Physiol*. 2009;106(6):785-90.
- Costa MJ, Balasekaran G, Vilas-Boas JP, Barbosa TM. Physiological Adaptations to Training in Competitive Swimming: A Systematic Review. *J Hum Kinet*. 2015;30;49:179-94.

- Costa MJ, Bragada JA, Marinho DA, Lopes VP, Silva AJ, Barbosa TM. Longitudinal study in male swimmers: a hierarchical modeling of energetics and biomechanical contributions for performance. *J Sports Sci Med*. 2013;1;12(4):614-22.
- Costa MJ, Bragada JA, Mejias JE, Louro H, Marinho DA, Silva AJ, Barbosa TM. Effects of swim training on energetics and performance. *Int J Sports Med*. 2013b;34 (6): 507-513.
- Costill DL. *Inside running*. Benchmark Press Inc., Indianapolis. 1986;123-132.
- Costill DL, Kowaleski J, Porter D, Kirwan J, Fielding R, King D. Energy expenditure during front crawl swimming: predicting success in middle-distance events. *Int J Sports Med*. 1985;6(5):266-270.
- Costill DL, Thomas R, Robergs RA, Pascoe D, Lambert C, Barr S, Fink WJ. Adaptations to swimming training: influence of training volume. *Med. Sci. Sports Exerc*. 1991;23, 371–377.
- Costill DL, Thomason H, Roberts E. Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med Sci Sports*. 1973 Winter;5(4):248-52.
- **D**arter BJ, Rodriguez KM, Wilken JM. Test-retest reliability and minimum detectable change using the K4b2: oxygen consumption, gait efficiency, and heart rate for healthy adults during submaximal walking. *Res Q Exerc Sport*. 2013;84(2):223-31.
- De Andrade Nogueira FC, de Freitas VH, Miloski B, de Oliveira Cordeiro AH, Zacaron Werneck F, Yuzo Nakamura F, Gattás Bara-Filho M. Relationship Between Training Volume and Ratings of Perceived Exertion in Swimmers. *Percept Mot Skills*. 2016;122(1):319-35.
- Decroix L, Piacentini MF, Rietjens G, Meeusen R. Monitoring Physical and Cognitive Overload During a Training Camp in Professional Female Cyclists. *Int J Sports Physiol Perform*. 2016;11(7):933-939.
- Dekerle J, Nesi X, Lefevre T, Depretz S, Sidney M, Marchand FH, Pelayo P. Strokking parameters in front crawl swimming and maximal lactate steady state speed. *Int J Sports Med*. 2005;26(1):53-8.
- Denis C, Dormois D, Lacour JR. Endurance training, $\dot{V}O_{2max}$, and OBLA: a longitudinal study of two different age groups. *Int J Sports Med*. 1984; 5: 167–173.
- Di Michele R, Gatta G, Di Leo A, Cortesi M, Andina F, Tam E, Da Boit M, Merni F. Estimation of the anaerobic threshold from heart rate variability in an incremental swimming test. *J Strength Cond Res*. 2012;26(11):3059-66.

- Di Prampero PE. Energetics of muscular exercise. *Rev Physiol Biochem Pharmacol.* 1981;89:143-222.
- Di Prampero PE. The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med.* 1986;7(2):55-72.
- Di Prampero PE, Ferretti G. The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. *Respir Physiol.* 1999;118(2-3):103-115.
- Di Prampero PE, Pendergast DR, Wilson DW, Rennie DW. Energetics of swimming in man. *J Appl Physiol.* 1974;37(1):1-5.
- Dixon EM, Kamath MV, McCartney N, Fallen EL. Neural regulation of heart rate variability in endurance athletes and sedentary controls. *Cardiovasc Res.* 1992;26(7):713-9.
- Dixon RW, Faulkner JA. Cardiac outputs during maximum effort running and swimming. *J Appl Physiol* 1971;30(5):653-6.
- Dotan R, Mitchell C, Cohen R, Klentrou P, Gabriel D, Falk B. Child-adult differences in muscle activation--a review. *Pediatr Exerc Sci.* 2012;24(1):2-21.
- Duché P, Falgairette G, Bedu M, Lac G, Robert A, Coudert J. Analysis of performance of prepubertal swimmers assessed from anthropometric and bio-energetic characteristics. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1993;66(5):467-71.
- Duffield R, Dawson B, Pinnington HC, Wong P. Accuracy and reliability of a Cosmed K4b2 portable gas analysis system. *J Sci Med Sport.* 2004;7(1):11-22.
- Dufour A-B, Pontier J, Rouard A. Morphologie et performance chez les sportifs de haut niveau: cas du hand ball et de la natation. *Cah Anthropol Biométrie Hum.* 1988;6:47–60.
- D'Acquisto LJ, Bone M, Takahashi S, Langhans G, Barzdukas AP, Troup JP. Changes in aerobic power and swimming economy as a result of reduced training volume. In: *Swimming Science VI*. Eds: Mc Laren, D., Reilly, T. and Lees, A. London, E & FN Spon. 1992;195-201.
- D'Souza A, Bucchi A, Johnsen AB, Logantha SJ, Monfredi O, Yanni J, Prehar S, Hart G, Cartwright E, Wisloff U, Dobryznski H, DiFrancesco D, Morris GM, Boyett MR. Exercise training reduces resting heart rate via downregulation of the funny channel HCN4. *Nat Commun.* 2014;13;5:3775.

- **E**dmonds R, Burkett B, Leicht A, McKean M. Effect of chronic training on heart rate variability, salivary IgA and salivary alpha-amylase in elite swimmers with a disability. *PLoS One*. 2015;4;10(6):e0127749.
- Edmonds RC, Sinclair WH, Leicht AS. Effect of a training week on heart rate variability in elite youth rugby league players. *Int J Sports Med*. 2013;34(12):1087-92.
- Enoka RM, Stuart DG. Neurobiology of muscle fatigue. *J Appl Physiol*. 1992;72(5):1631-48.
- Enoksen E, Tjelta AR, Tjelta LI. Distribution of training volume and intensity of elite male and female track and marathon runners. *Int J Sports Sci Coach*. 2011;6: 273-293.
- Espada MC, Reis JF, Almeida TF, Bruno PM, Vleck VE, Alves FB. Ventilatory and Physiological Responses in Swimmers Below and Above Their Maximal Lactate Steady State. *J Strength Cond Res*. 2015;29(10):2836-43.
- Esteve-Lanao J, San Juan AF, Earnest CP, Foster C, and Lucia A. How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37, 496–504.
- Esteve-Lanao J, Foster C, Seiler S, Lucia A. Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *J Strength Cond Res*. 2007;21(3):943-9.
- Evertsen F, Medbø JI, Bonen A. Effect of training intensity on muscle lactate transporters and lactate threshold of cross-country skiers. *Acta Physiol Scand*. 2001;173(2):195-205.
- **F**arah BQ, Lima AH, Cavalcante BR, de Oliveira LM, Brito AL, de Barros MV, Ritti-Dias RM. Intra-individuals and inter- and intra-observer reliability of short-term heart rate variability in adolescents. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2016;36(1):33-9.
- Faude O, Meyer T, Scharhag J, Weins F, Urhausen A, Kindermann W. Volume vs. intensity in the training of competitive swimmers. *Int J Sports Med*. 2008;29(11):906-12.
- Fernandes RJ, Cardoso CS, Soares SM, Ascensão A, Colaço PJ, Vilas-Boas JP. Time limit and $\dot{V}O_{2\max}$ slow component at intensities corresponding to $\dot{V}O_{2\max}$ in swimmers. *Int J Sports Med*. 2003;24(8):576-81.
- Ferretti G, Narici MV, Binzoni T, Gariod L, Le Bas JF, Reutenauer H, Cerretelli P. Determinants of peak muscle power: effects of age and physical conditioning. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1994;68(2):111-115.

- Fiehn O, Kopka J, Dörmann P, Altmann T, Trethewey RN, Willmitzer L. Metabolite profiling for plant functional genomics. *Nat Biotechnol.* 2000;18(11):1157-61.
- Fietze I, Strauch J, Holzhausen M, Glos M, Theobald C, Lehnkering H, Penzel T. Sleep quality in professional ballet dancers. *Chronobiol Int* 2009;26:1249-1262.
- Figueiredo P, Zamparo P, Sousa A, Vilas-Boas JP, Fernandes RJ. An energy balance of the 200 m front crawl race. *Eur J Appl Physiol.* 2011;111(5):767-77.
- Fiskerstrand A, and Seiler S. Training and performance characteristics among Norwegian international rowers 1970-2001. *Scand J Med Sci Sports.* 2004;14, 303–310.
- Fitts R. Cellular mechanisms of muscle fatigue. *Physiological reviews.* 1994;74: 49-94.
- Fortes LS, Da Costa BDV, Paes PP, do Nascimento Júnior JRA, Fiorese L, Ferreira MEC. Influence of Competitive-Anxiety on Heart Rate Variability in Swimmers. *J Sports Sci Med.* 2017;1;16(4):498-504.
- Foster C. Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Med Sci Sports Exerc.* 1998;30(7):1164-8.
- Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, Doleshall P, Dodge C. A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res.* 2001;15(1):109-15.
- Foster C, Heiman KM, Esten PL, Porcari JP. Differences in perceptions of training by coaches and athletes. *South African Journal of Sports Medicine.* 2001;8:3–7.
- Fowles JR, Green HJ, Tupling R, O'Brien S, Roy BD. Human neuromuscular fatigue is associated with altered $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{ATPase}$ activity following isometric exercise. *J Appl Physiol.* 2002;92(4):1585-93.
- Fritz IB, Marquis NR. The role of acylcarnitine esters and carnitine palmitoyltransferase in the transport of fatty acyl groups across mitochondrial membrane. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1965;54:1226—33.
- Fullagar HH, Skorski S, Duffield R, Hammes D, Coutts AJ, Meyer T. Sleep and athletic performance: the effects of sleep loss on exercise performance, and physiological and cognitive responses to exercise. *Sports Med.* 2015;45(2):161-86.
- Furlan R, Piazza S, Dell'Orto S, Gentile E, Cerutti S, et al. Early and late effects of exercise and athletic training on neural mechanisms controlling heart rate. *Cardiovascular research.* 1993;27:82-488.
- Gandevia S. Neural control in human muscle fatigue: changes in muscle afferents, motoneurons and motor cortical drive. *Acta Physiol Scand.* 1998;162: 275-283.

- Gandevia S. Spinal and Supraspinal Factors in Human Muscle Fatigue. *Physiological Reviews*. 2001;81: 1726-1789.
- Garet M, Tournaire N, Roche F, Laurent R, Lacour JR, Barthélémy JC, Pichot V. Individual Interdependence between nocturnal ANS activity and performance in swimmers. *Med Sci Sports Exerc*. 2004;36(12):2112-8.
- Gaskill SE, Walker AJ, Serfass RA, Bouchard C, Gagnon J, Rao DC, Skinner JS, Wilmore JH, Leon AS. Changes in ventilatory threshold with exercise training in a sedentary population: the HERITAGE Family Study. *Int J Sports Med*. 2001; 22 (8): 586–92.
- Gastin PB. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Med*. 2001;31:725-741.
- Geladas ND, Nassis GP, Pavlicevic S. Somatic and physical traits affecting sprint swimming performance in young swimmers. *Int J Sports Med*. 2005;26:139–44.
- Gleeson M, Pyne DB, McDonald WA, Bowe SJ, Clancy RL, Fricker PA. In-vivo cell mediated immunity in elite swimmers in response to training. *J Sci Med Sport*. 2004; 7(1): 38-46.
- Goldsmith RL, Bigger JT, Bloomfield DM, SteinmanRC. Physical fitness as a determinant of vagal modulation. *Medicine and Sciences in Sports and Exercise*. 1997;29 (6): 812-81.
- Gonçalves C. EB., Coelho e Silva, M.J., Carvalho, H.M. and Gonçalves, A. Why do they engage in such hard programs? The search for excellence in youth basketball. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2011;10, 458-464.
- González-Boto R, Salguero A, Tuero C, González-Gallego J, Márquez S. Monitoring the effects of training load changes on stress and recovery in swimmers. *J Physiol Biochem*. 2008;64(1):19-26.
- Granata C, Oliveira RS, Little JP, Renner K, Bishop DJ. Mitochondrial adaptations to high-volume exercise training are rapidly reversed after a reduction in training volume in human skeletal muscle. *FASEB J*. 2016;30(10):3413-3423.
- Green HJ. How important is endogenous muscle glycogen to fatigue in prolonged exercise? *Can J Physiol Pharmacol*. 1991;69:290-7.
- Greyson I, Kelly S, Peyrebrune M, Furniss B. Interpreting and Implementing the Long Term Athlete Development Model: English Swimming Coaches' Views on the (Swimming) LTAD in Practice. A Commentary. *Int J Sports Sci Coach*. 2010; 5: 403-406.

- Guellich A, Seiler S. Lactate profile changes in relation to training characteristics in junior elite cyclists. *Int J Sports Physiol Perform*. 2010;5(3):316-27.
- Guellich A, Seiler S, Emrich E. Training methods and intensity distribution of young world-class rowers. *Int J Sports Physiol Perform*. 2009;4(4):448-60.
- **H**ainsworth R. Physiology of the cardiac autonomic system. Ch 1. In: *Clinical guide to cardiac autonomic tests*. Ed: M. Malik, KLUWER. Ac Publ, Dordrecht, The Netherland. 1998.
- Hakkinen K, Keskinen KL, Alén M, Komi PV, Kauhanen H. Serum hormone concentrations during prolonged training in elite endurance-trained and strength trained athletes. *Eur J Appl Physiol*. 1989; 59: 233-238.
- Harré D. *Trainingslehre*. Sportsverlag, Berlin. 1973.
- Hautala A, Tulppo MP, Makikallio TH, Laukkanen R, Nissila S, Huikuri HV. Changes in cardiac autonomic regulation after prolonged maximal exercise. *Clin Physiol*. 2001;21:238–245.
- Hawke B. The training of Cesar Cielo. In *ASCA World Clinic*. 2010.
- Hawley JA, Williams MM, Vickovic MM, Handcock PJ. Muscle power predicts freestyle swimming performance. *Br J Sports Med*. 1992;26:151-155.
- Heck H, Mader A, Hess G, Mucke S, Muller R, and Hollmann W. Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *Int. J. Sports Med*. 1985;6:117-130.
- Hedelin R, Bjerle P, Henriksson-Larsén K. Heart rate variability in athletes: relationship with central and peripheral performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2001;33(8):1394-8.
- Hedelin R, Kenttä G, Wiklund U, Bjerle P, Henriksson-Larsén K. Short-term overtraining: effects on performance, circulatory responses, and heart rate variability. *Med Sci Sports Exerc*. 2000;32(8):1480-4.
- Helgerud J, Høydal K, Wang E, Karlsen T, Berg P, Bjerkaas M, Simonsen T, Helgesen C, Hjorth N, Bach R, Hoff J. Aerobic high-intensity intervals improve $\dot{V}O_{2max}$ more than moderate training. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;39(4):665-71.
- Helgerud J, Støren O, Hoff J. Are there differences in running economy at different velocities for well-trained distance runners? *Eur J Appl Physiol*. 2010;108(6):1099-105.
- Hellard P. Ventilatory and kinematics responses in sprint versus marathon swimmers. Relationship with the $\dot{V}O_2$ slow component. XIIth International Symposium on

Biomechanics and Medicine in Swimming. Australian Institute of Sport. Canberra, 2014.

- Hellard P, Avalos M, Hausswirth C, Pyne D, Toussaint JF, Mujika I. Identifying Optimal Overload and Taper in Elite Swimmers over Time. *J Sports Sci Med*. 2013;12:668–78.
- Hellard P, Avalos M, Lacoste L, Barale F, Chatard JC, Millet GP. Assessing the limitations of the Banister model in monitoring training. *J Sports Sci*. 2006;24(5):509-20.
- Hellard P, Scordia C, Avalos M, Mujika I, Pyne DB. Modelling of optimal training load patterns during the 11 weeks preceding major competition in elite swimmers. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2017;42(10):1106-1117.
- Hellard P, Guimaraes F, Avalos M, Houel N, Hausswirth C, Toussaint JF. Modeling the association between HR variability and illness in elite swimmers. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43(6):1063-70.
- Hinzpeter J, Zamorano A, Cuzmar D, Lopez M, Burboa J. Effect of active versus passive recovery on performance during intrameet swimming competition. *Sports Health*. 2014;6(2):119-21.
- Hirvonen J, Nummela A, Rusko H, Rehunen S, Härkönen M. Fatigue and changes of ATP, creatine phosphate, and lactate during the 400-m sprint. *Can J Sport Sci*. 1992;17(2):141-4.
- Hoehn K, Marieb EN. *Human Anatomy & Physiology*. San Francisco: Benjamin Cummings. 2010. ISBN 978-0-321-60261-9.
- Holloszy JO, Coyle EF. Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*. 1984;56(4):831-8.
- Holmer I. Oxygen uptake during swimming in man. *Journal of Applied Physiology*. 1972;33:502-509.
- Holmer I. Energy cost of arm stroke, leg kick and the whole stroke in competitive swimming styles. *Eur J Appl Physiol*. 1974; 33:105–118.
- Hooper SL, Mackinnon LT, Gordon RD, Bachmann AW. Hormonal responses of elite swimmers to overtraining. *Med Sci Sport Exer*. 1993; 25(6): 741-747.
- Hooper SL, Mackinnon LT, Howard A. Physiological and psychometric variables for monitoring recovery during tapering for major competition. *Med Sci Sports Exerc*. 1999;31(8):1205-10.

- Houmard JA, Johns RA. Effects of taper on swim performance. Practical implications. *Sports Medicine*. 1994;14, 224-232.
- Houston, M. Metabolic responses to exercise, with special reference to training and competition in swimming. In Eriksson, B., Furgberg, B., eds., *Swimming Medicine IV*. Baltimore: University Park Press, 1978 207-232.
- Houston ME, Wilson DM, Green HJ, Thomson JA, Ranney DA. Physiological and muscle enzyme adaptations to two different intensities of swim training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1981;46(3):283-91.
- Howe MJA, Davidson JW, Sloboda JA. Innate talents: reality or myth? *Behavioral and Brain Sciences*. 1998 ;21:399-442.
- Hug B, Heyer L, Naef N, Buchheit M, Wehrlin JP, Millet GP. Tapering for marathon and cardiac autonomic function. *Int J Sports Med*. 2014;35(8):676-83.
- **I**ellamo F, Legramante J, Pigozzi F, Spataro A, Norbiato G, Lucini D, Pagani M. Conversion from vagal to sympathetic predominance with strenuous training in high-performance world class athletes. *Circulation*. 2002;105: 2719-2724.
- Ingham SA, Carter H, Whyte GP, Doust JH. Physiological and performance effects of low- versus mixed-intensity rowing training. *Med Sci Sports Exerc*. 2008;40(3):579-84.
- Ingjer F. Development of maximal oxygen uptake in young elite male cross-country skiers: a longitudinal study. *J Sports Sci*. 1992;10(1):49-63.
- Ismail NA, Posma JM, Frost G, Holmes E, Garcia-Perez I. The role of metabonomics as a tool for augmenting nutritional information in epidemiological studies. *Electrophoresis*. 2013;34(19):2776-86.
- Isacco L, Ennequin G, Cassirame J, Tordi N. Physiological pattern changes in response to a simulated competition in elite women artistic gymnasts. *J Strength Cond Res*. 2017.
- Israel S. Problems of overtraining from an internal medical and performance physiological stand point. *Medizin Und Sport* 1976;16: 1-12.
- Issurin VB. New horizons for the methodology and physiology of training periodization. *Sports Med*. 2010;1;40(3):189-206.
- Issurin VB. Benefits and Limitations of Block Periodized Training Approaches to Athletes' Preparation: A Review. *Sports Med*. 2016;46(3):329-38.

- **J**alab C, Enea C, Delpech N, Bernard O. Dynamics of oxygen uptake during a 100 m front crawl event, performed during competition. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2011;36(2):219-25.
- Jagomägi G, Jürimäe T. The influence of anthropometrical and flexibility parameters on the results of breaststroke swimming. *Anthropol Anz*. 2005;63(2):213-9.
- James DV, Barnes AJ, Lopes P, Wood DM. Heart rate variability: response following a single bout of interval training. *Int J Sports Med*. 2002;23(4):247-51.
- Jones AM. A five-year physiological case study of an Olympic runner. *Br J Sports Med*. 1998;32(1):39-43.
- Jones AM. The Physiology of the World Record Holder for the Women s Marathon. *Int Journal Sports Science Coaching*. 2006;1: 100-116.
- Jürimäe J, Haljaste K, Cicchella A, Lätt E, Purge P, Leppik A, Jürimäe T. Analysis of swimming performance from physical, physiological, and biomechanical parameters in young swimmers. *Pediatr Exerc Sci*. 2007;19(1):70-81.
- Jürimäe J, Maestu J, Purge P, Jurimae T. Changes in stress and recovery after heavy training in rowers. *J Sci Med Sport*. 2004; 7(3):335–9.
- **K**ame, VD, Pendergast, DR, and Termin, B. Physiologic responses to high intensity training in competitive university swimmers. *J Swim Res* 6: 5–8, 1990.
- Kavouras S, Troup J. Growth and developmental changes in selected characteristics of age group swimmers. In: Troup JP, Hollander AP, Strasse Dea, eds. *Biomechanics and Medicine in Swimming VII*. London: E. & F. N. Spon; 1996:234-239.
- Kenneally M, Casado A, Santos-Concejero J. The Effect of Periodisation and Training Intensity Distribution on Middle- and Long-Distance Running Performance: A Systematic Review. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;28:1-26.
- Khosla T. Physique of Female Swimmers and Divers From the 1976 Montreal Olympics. *J Am Med Assoc* 1984;252:536–7.
- Kilen A, Larsson TH, Jørgensen M, Johansen L, Jørgensen S, Nordsborg NB. Effects of 12 weeks high-intensity & reduced- volume training in elite athletes. *PLoS One* 9: 1–8, 2014.
- Kindermann W. Das Uebertraining – Ausdruck einer vegetativen Fehlsteuerung. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* H8. 1986;138-145.

- Kindermann W, Simon G, Keul J. The significance of the aerobic-anaerobic determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol.* 1979; 42: 25–34.
- Kirwan JP, Costill DL, Flynn MG, Mitchell JB, Fink WJ, Neufer PD, Houmard JA. Physiological responses to successive days of intense training in competitive swimmers. *Med Sci Sport Exer.* 1988; 20(3): 255- 259.
- Kjendle P-L, Ingjer F, Stallman RK, Stray-Gundersen J. Factors affecting swimming economy in children and adults. *Eur J Appl Physiol.* 2004;93:65–74.
- Knab AM, Nieman DC, Gillitt ND, Shanely RA, Cialdella-Kam L, Henson DA, Sha W. Effects of a flavonoid-rich juice on inflammation, oxidative stress, and immunity in elite swimmers: a metabolomics-based approach. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2013;23(2), 150-60.
- Knechtle B, Bragazzi NL, König S, Nikolaidis PT, Wild S, Rosemann T, Rüst CA. The Age in Swimming of Champions in World Championships (1994–2013) and Olympic Games (1992–2012): A Cross-Sectional Data Analysis. *Sports (Basel).* 2016;4;4(1).
- Koenig J, Jarczok MN, Wasner M, Hillecke TK, Thayer JF. Heart rate variability and swimming. *Sports Med.* 2014;44(10):1377-91.
- Kollarz C, Knechtle B, Rüst CA, Rosemann T, Lepers R. Comparison of age of peak swimming speed in elite backstroke swimmers at national and international level. *OA Sports Med.* 2013;1:19.
- Kong PW, De Heer H. Anthropometric, gait and strength characteristics of Kenyan distance runners. *J Sports Sci Med.* 2008;7: 499–504.
- König S, Valeri F, Wild S, Rosemann T, Rüst CA, Knechtle B. Change of the age and performance of swimmers across World Championships and Olympic Games finals from 1992 to 2013 - a cross-sectional data analysis. *Springerplus.* 2014;4;3:652.
- Kuipers H, Keizer HA. Overtraining in elite athletes. Review and Directions for the future. *Sports Medicine.* 1988;6: 79-92.
- **L**affite LP, Vilas-Boas JP, Demarle A, Silva J, Fernandes R, Billat VL. Changes in physiological and stroke parameters during a maximal 400-m free swimming test in elite swimmers. *Can J Appl Physiol.* 2004;29 Suppl:S17-31.
- Landers GJ, Ong KB, Ackland TR, Blanksby BA, Main LC, Smith D. Kinanthropometric differences between 1997 World championship junior elite and 2011 national junior elite triathletes. *J Sci Med Sport.* 2013;16(5):444-9.

- Lang M, Light R. Interpreting and Implementing the Long Term Athlete Development Model: English Swimming Coaches' Views on the (Swimming) LTAD in Practice. *Int J Sports Sci Coach*. 2010; 5: 407- 412.
- Lätt E, Jürimäe J, Haljaste K, Cicchella A, Purge P, Jürimäe T. Physical development and swimming performance during biological maturation in young female swimmers. *Coll Antropol*. 2009;33(1):117-22.
- Lätt E, Jürimäe J, Mäestu J, Purge P, Rämson R, Haljaste K, Keskinen KL, Rodriguez FA, Jürimäe T. Physiological, biomechanical and anthropometrical predictors of sprint swimming performance in adolescent swimmers. *J Sports Sci Med*. 2010;9:398–404.
- Laursen PB, Jenkins DG. The scientific basis for high-intensity interval training: optimising training programmes and maximising performance in highly trained endurance athletes. *Sports Med*. 2002;32(1):53-73.
- Laursen PB, Rhodes EC, Buchanan JM. Physiological analysis of a high intensity ultraendurance event. *J Strength Cond*. 1999;21:26–38.
- Lee CM, Wood RH, Welsch MA. Influence of short-term endurance exercise training on heart rate variability. *Med Sci Sports Exerc*. 2003; 35: 961 – 969.
- Lehmann M, Foster C, Dickhuth HH, Gastmann U. Autonomic imbalance hypothesis and overtraining syndrome. *Med Sci Sports Exerc*. 1998;30(7):1140-5.
- Lehmann M, Foster C, Keul J. Overtraining in endurance athletes: a brief review. *Med Sci Sports Exerc*. 1993;25(7):854-62.
- Le Meur Y, Hausswirth C, Natta F, Couturier A, Bignet F, Vidal PP. A multidisciplinary approach to overreaching detection in endurance trained athletes. *J Appl Physiol*. 2013;114(3):411–20.
- Le Meur Y, Pichon A, Schaal K, Schmitt L, Louis J, Gueneron J, Vidal PP, Hausswirth C. Evidence of parasympathetic hyperactivity in functionally overreached athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2013;45(11):2061-71.
- Lloyd RS, Oliver JL. The Youth Physical Development Model: A New Approach to Long-Term Athletic Development. *Strength and Conditioning Journal*. 2012;34:61-72.
- Londeree BR. Effect of training on lactate/ventilatory thresholds: a meta analysis. *Med Sci Sports Exerc*. 1997; 29: 837–843.
- Lotzerich H, Uhlenbruck G. Sport and Immunologie. In *Sportmedizinische Forschung*, Weib M, Rieder H (eds), Springer. Berlin, 1991, 117.

- Lucia A, Pardo J, Durantez A, Hoyos J, Chicharro JL. Physiological differences between professional and elite road cyclists. *International Journal of Sports Medicine*. 1998;19, 342-348.
- Lyttle AD, Blanksby BA, Elliott BC, Lloyd DG. Net forces during tethered simulation of underwater streamlined gliding and kicking techniques of the freestyle turn. *J Sports Sci*. 2000;18(10):801-7.
- **M**aciejewski H, Bourdin M, Lacour JR, Denis C, Moyen B, Messonnier L. Lactate accumulation in response to supramaximal exercise in rowers. *Scand J Med Sci Sports*. 2013;23(5):585-92.
- Mackinnon LT, Hooper SL, Jones S, Gordon RD, Bachmann AW. Hormonal, immunological, and hematological responses to intensified training in elite swimmers. *Med Sci Sport Exer*. 1997; 29(12): 1637-1645.
- Macor F, Fagard R, Amery A. Power spectral analysis of RR interval and blood pressure short-term variability at rest and during dynamic exercise: comparison between cyclists and controls. *International Journal of Sports Medicine*. 1996;17: 175-181.
- Mader A. A transcription-translation activation feedback circuit as a function of protein degradation, with the quality of protein mass adaptation related to the average functional load. *J Theor Biol*. 1988;17;134(2):135-57.
- Mangin L, Kobeissi A, Lelouche D, Dhérrouville TY, Mansier P, Swynghedauw B, Macquin-Mavier I. Simultaneous analysis of heart rate variability and myocardial contractility during head-up tilt in patients with vasovagal syncope. *J Cardiovasc Electrophysiol*. 2001;12(6):639-44.
- Maglischo, E. *Swimming fastest*. Champaign, IL, Human Kinetics. 2003.
- Manunzio C, Mester J, Kaiser W, Wahl P. Training Intensity Distribution and Changes in Performance and Physiology of a 2nd Place Finisher Team of the Race across America Over a 6 Month Preparation Period. *Front Physiol*. 2016;27;7:642.
- Marios P, Kyriaki K, Vassilis K. Pheromones: A New Ergogenic Aid in Sport? *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 2015;10(7), 939-940.
- Mateo M, Blasco-Lafarga C, Martínez-Navarro I, Guzmán JF, Zabala M. Heart rate variability and pre-competitive anxiety in BMX discipline. *Eur J Appl Physiol*. 2012;112(1):113-23.

- Matos NF, Winsley RJ, Williams CA. Prevalence of nonfunctional overreaching/overtraining in young English athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43(7):1287–94.
- Matsumoto T, Miyawaki T, Ue H, Kanda T, Zenji C, Moritani T. Autonomic responsiveness to acute cold exposure in obese and non-obese young women. *Int J Obes Relat Metab Disord.* 1999;23(8):793-800.
- Maughan R, Aulin KP. Energy costs of physical activity. *World Rev Nutr Diet.* 1997;82:18-32.
- Maughan R, Gleeson M, and Greenhaff PL. *Biochemistry of exercise and training.* Oxford: Oxford University Press. 1997.
- Mc Cole SD, Brown MD, Moore GE, Zmuda JM, Cwynar JD, Hagberg JM. Enhanced cardiovascular hemodynamics in endurance-trained postmenopausal women athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32(6):1073-9.
- Mc Craty R, Atkinson M, Tiller WA, Rein G, Watkins AD. The effects of emotions on short-term power spectrum analysis of heart rate variability. *Am J Cardiol.* 1995;15;76(14):1089-93.
- Meeusen R, Duclos M, Foster C, Fry A, Gleeson M, Nieman D, . . . Urhausen, A. Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: Joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Med Sci Sports Exerc.* 2013;45(1), 186–205.
- Meeusen R, Watson P, Hasegawa H, Roelands B, Piacentini MF. Brain neurotransmitters in fatigue and overtraining. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2009;7;32(5):857-64.
- Merati G, Maggioni MA, Invernizzi PL, Ciapparelli C, Agnello L, Veicsteinas A, Castiglioni P. Autonomic modulations of heart rate variability and performances in short-distance elite swimmers. *Eur J Appl Physiol.* 2015;115(4):825-35.
- Miccheli A, Marini F, Capuani G, Miccheli AT, Delfini M, Di Cocco ME, Puccetti C, Paci M, Rizzo M, Spataro A. The Influence of a Sports Drink on the Postexercise Metabolism of Elite Athletes as Investigated by NMR-Based Metabolomics. *Journal of the American College of Nutrition.* 2009;28, 553-64.
- Mikulic P, Ruzic L. Predicting the 1000m rowing ergometer performance in 12-13-year-old rowers: the basis for selection process? *J Sci Med Sport.* 2008;11(2):218-26.
- Montpetit RR, Lavoie J-M, Cazorla G. Aerobic energy cost of swimming the front crawl at high velocity in international class and adolescent swimmers. In A.P. Hollander, P.A.

Huijing, G. de Groot (Eds.), *Biomechanics and medicine in swimming* Champaign, IL : Human Kinetics. 1983:228-234

- Morgado JM, Rama L, Silva I, de Jesus IM, Henriques A, Laranjeira P, Pedreiro S, Rosado F, Alves F, Gleeson M, Pais ML, Paiva A, Teixeira AM. Cytokine production by monocytes, neutrophils, and dendritic cells is hampered by long-term intensive training in elite swimmers. *Eur J Appl Physiol*. 2012; 112(2): 471-482.
- Mounier R, Pialoux V, Cayre A, Schmitt L, Richalet JP, Robach P, Lasne F, Roels B, Millet G, Coudert J, Clottes E, Fellmann N. Leukocyte's Hif-1 expression and training-induced erythropoietic response in swimmers. *Med Sci Sports Exerc*. 2006;38(8):1410-7.
- Mujika, I. Olympic preparation of a world-class female triathlete. *Int J Sports Physiol Perform*. 2014;9(4):727-3.
- Mujika I. The cycling physiology of Miguel Indurain 14 years after retirement. *Int J Sports Physiol Perform*. 2012;7(4):397-400.
- Mujika I, Busso T, Lacoste L, Barale F, Geyssant A, Chatard JC. Modeled responses to training and taper in competitive swimmers. *Med. Sci. Sports Exerc*. 1996;28(2): 251–258.
- Mujika I, Chatard JC, Busso T, Geyssant A. Effects of training on performance in competitive swimming. *Can J Appl Sport Sci*. 1995;20:395-406.
- Mujika I, Chatard JC, Geyssant A. Effects of training and taper on blood leucocyte populations in competitive swimmers: relationships with cortisol and performance. *Int J Sports Med*. 1996a;17(3): 213-217.
- Mujika I, Chatard JC, Padilla S, Guezennec CY, Geyssant A. Hormonal responses to training and its tapering off in competitive swimmers: relationships with performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1996b;74(4): 361-366.
- Mujika I, Goya A, Padilla S, Grijalba A, Gorostiaga E, Ibañez J. Physiological responses to a 6-d taper in middle-distance runners: influence of training intensity and volume. *Med Sci Sports Exerc*. 2000;32(2):511-7.
- Mujika I, Padilla S. Detraining: loss of training-induced physiological and performance adaptations. Part I: short term insufficient training stimulus. *Sports Med*. 2000;30(2):79-87.
- Mujika I, Padilla S. Scientific bases for precompetition tapering strategies. *Med Sci Sports Exerc*. 2003;35(7):1182-7.

- Mujika I, Padilla S, Geyssant A, Chatard JC. Hematological responses to training and taper in competitive swimmers: relationships with performance. *Arch Physiol Biochem*. 1998; 105(4): 379-385.
- Muñoz I, Cejuela R, Seiler S, Larumbe E, Esteve-Lanao J. Training-intensity distribution during an ironman season: relationship with competition performance. *Int J Sports Physiol Perform*. 2014;9(2):332-9.
- Naemi R, Easson WJ, Sanders RH. Hydrodynamic glide efficiency in swimming. *J Sci Med Sport*. 2010;13:444–51.
- Naemi R, Sanders RH. A "hydrokinematic" method of measuring the glide efficiency of a human swimmer. *J Biomech Eng*. 2008;130(6):061016.
- Neal CM, Hunter AM, Brennan L, O'Sullivan A, Hamilton DL, De Vito G, Galloway SD. Six weeks of a polarized training-intensity distribution leads to greater physiological and performance adaptations than a threshold model in trained cyclists. *J Appl Physiol* (1985). 2013;115(4):461-71.
- Neal CM, Hunter AM, Galloway SD. A 6-month analysis of training-intensity distribution and physiological adaptation in Ironman triathletes. *J Sports Sci*. 2011;29(14):1515-23.
- Neal MJ (ed): *Medical Pharmacology at a Glance* (ed 4). 350 Main Street, Malden, Massachusetts 02148- 5018. USA, Blackwell Science Ltd. 2002:20-21.
- Nehlsen-Cannarella SL, Nieman DC, Balk-Lamberton AJ, Markoff PA, Chritton DB, Gusewitch G, Lee JW. The effects of moderate exercise training on immune response. *Med Sci Sports Exerc*. 1991;23(1):64-70.
- Neri DF, Wiegmann D, Stanny RR, Shappell SA, McCardie A, McKay DL. The effects of tyrosine on cognitive performance during extended wakefulness. *Aviat Space Environ Med*. 1995;66(4): 313–9.
- Nicholson JK, Wilson ID. Understanding 'global' systems biology: Metabonomics and the continuum of metabolism. *Nature Reviews Drug Discovery*. 2003;2(8), 668-676.
- Nieman DC, Nehlsen-Cannarella SL. The effects of acute and chronic exercise of immunoglobulins. *Sports Med*. 1991;11(3):183-201.
- Nieman DC, Gillitt ND, Knab AM, Shanely RA, Pappan KL, Jin F, Lila MA. Influence of a Polyphenol-Enriched Protein Powder on Exercise-Induced Inflammation and Oxidative Stress in Athletes: A Randomized Trial Using a Metabolomics Approach. *PLoS ONE*. 2013;8(8), p. e72215.

- Noon MR, James RS, Clarke ND, Akubat I, Thake CD. Perceptions of well-being and physical performance in English elite youth footballers across a season. *J Sports Sci.* 2015;33(20):2106-15.
- Nugent FJ, Comyns TM, Burrows E, Warrington GD. Effects of Low-Volume, High-Intensity Training on Performance in Competitive Swimmers: A Systematic Review. *J Strength Cond Res.* 2017;31(3):837-847.
- Nugent FJ, Comyns TM, Warrington GD. Quality versus Quantity Debate in Swimming: Perceptions and Training Practices of Expert Swimming Coaches. *J Hum Kinet.* 2017; 57: 147–158.
- **O**basi CN, Brown RL, Barrett BP. Item reduction of the Wisconsin Upper Respiratory Symptom Survey (WURSS-21) leads to the WURSS-11. *Qual Life Res.* 2014;23(4):1293-8.
- Olbrecht, J. *Science of Winning: Planning, Periodizing and Optimizing Swim Training.* Swimshop, Luton UK. 2003.
- Olbrecht J, Madsen Ø, Mader A, Liesen H, and Hollmann W. Relationship between swimming velocity and lactic concentration during continuous and intermittent training exercises. *Int J Sports Med.* 1985;6(2): 74–77.
- Olesen HL, Raabo E, Bangsbo J, Secher NH. Maximal oxygen deficit of sprint and middle distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1994;69(2):140-6.
- Ogita F. Energetics in competitive swimming and application for training. *Port J Sports Science.* 2006;6(2)117-121.
- Ogita F, Huang Z, Kurobe K, Ozawa G, Nagira A, Yotani K, Taguchi N, Tamaki H. Effects of sprint interval training on metabolic, mechanical characteristics and swimming performance. In *XIIth International Symposium for Biomechanics and Medicine in Swimming.* Mason B (eds). 2014;453-457.
- O'Connor H, Olds T, Maughan RJ. Physique and performance for track and field events. *J Sports Sci.* 2007;25 Suppl 1:S49-60.
- O'Sullivan SE, Bell C. The effects of exercise and training on human cardiovascular reflex control. *J Auton Nerv Syst.* 2003;81(1-3):16-24.
- O'Toole ML. Overreaching and overtraining in endurance athletes. In: Kreider R, Fry A, O'Toole ML, editors. *Overtraining in sport.* Champaign (IL): Human Kinetics, 1998: 3-17.

- **P**alermo A, Botrè F, de la Torre X, Zamboni N. Non-targeted LC-MS based metabolomics analysis of the urinary steroidal profile. *Analytica Chimica Acta*. 2017;964, 112-122.
- Perini R, Milesi S, Biancardi L, Veicsteinas A. Effects of high altitude acclimatization on heart rate variability in resting humans. *European Journal Applied Physiology*. 1996;73: 521-528.
- Pendergast DR, Di Prampero PE, Craig AB Jr, Wilson DR, Rennie DW. Quantitative analysis of the front crawl in men and women. *J Appl Physiol*. 1977;43:475–9.
- Pendergast DR, Tedesco M, Nawrocki DM, Fisher NM. Energetics of underwater swimming with SCUBA. *Med Sci Sports Exerc*. 1996;28:573-580.
- Pichot V, Busso T, Roche F, Garet M, Costes F, Duverney D, Lacour JR, Barthélémy JC. Autonomic adaptations to intensive and overload training periods : a laboratory study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2002;34:1660-1666.
- Pink MM, Tibone JE. The painful shoulder in the swimming athlete. *Orthop Clin North Am*. 2000;31(2):247-61.
- Plews DJ, Laursen PB, Stanley J, Kilding AE, Buchheit M. Training adaptation and heart rate variability in elite endurance athletes: opening the door to effective monitoring. *Sports Med*. 2013;43(9):773-781.
- Plews DJ, Laursen PB, Buchheit M. Day-to-Day Heart-Rate Variability Recordings in World-Champion Rowers: Appreciating Unique Athlete Characteristics. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;12(5):697-703.
- Plews DJ, Laursen PB, Kilding AE, Buchheit M. Heart-Rate Variability and Training-Intensity Distribution in Elite Rowers. *Int J Sports Physiol Perform*. 2014;9(6):1026-32.
- Plews DJ, Laursen PB, Kilding AE, Buchheit M. Heart rate variability in elite triathletes, is variation in variability the key to effective training? A case comparison. *Eur J Appl Physiol*. 2012;112(11):3729-41.
- Portier H, Louisy F, Laude D, Berthelot M, Guezennec C. Intense endurance training on heart rate and blood pressure variability in runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2001;33: 1120-1125.
- Pugliese L, Porcelli S, Bonato M, Pavei G, La Torre A, Maggioni MA, Bellistri G, Marzorati M. Effects of manipulating volume and intensity training in masters swimmers. *Int J Sports Physiol Perfor*. 2015;10:907–912.

- Pugliese L, Serpiello FR, Millet GP, La Torre A. Training Diaries during Altitude Training Camp in Two Olympic Champions: An Observational Case Study. *J Sports Sci Med*. 2014;1;13(3):666-72.
- Pyne DB, Anderson ME, Hopkins WG. Monitoring changes in lean mass of elite male and female swimmers. *Int J Sports Physiol Perform*. 2006;1:14–26.
- Pyne DB, Boston T, Martin DT, Logan A. Evaluation of the Lactate Pro blood lactate analyser. *Eur J Appl Physiol*. 2000;82(1-2):112-6.
- Pyne DB, Lee H, Swanwick KM. Monitoring the lactate threshold in world ranked swimmers. *Med Sci Sport Exer*. 2001; 33: 291-297.
- **R**aglin JS. “Overtraining and staleness: psychometric monitoring of endurance athletes,” in *Handbook of Research on Sport Psychology*, eds R. B. Singer, M. Murphey, and L. K. Tennant (New York, NY: Macmillan). 1993;840–850.
- Rama L, Teixeira AM, Matos A, Borges G, Henriques A, Gleeson M, Pedreiro S, Filaine E, Alves F, Paiva A. Changes in natural killer cell subpopulations over a winter training season in elite swimmers. *Eur J Appl Physiol*. 2013; 113(4): 859-868.
- Ramautar R, Berger R, van der Greef J, Hankemeier T. Human metabolomics: strategies to understand biology. *Curr Opin Chem Biol*. 2013;17(5):841-6.
- Reiss VM, Marinho DA, Policarpo FB, Carneiro AL, Baldari C, Silva AJ. Examining the accumulated oxygen deficit in front-crawl swimming. *Int J Sports Med*. 2010;31:421-427.
- Ribeiro JP, Cadavid E, Baena J, Monsalvete E, Barna A, De Rose EH. Metabolic predictors of middle-distance swimming performance. *Br J Sports Med*. 1990;24(3):196-200.
- Ribeiro J, Figueiredo P, Morais S, Alves F, Toussaint H, Vilas-Boas JP, Fernandes RJ. Biomechanics, energetics and coordination during extreme swimming intensity: effects of performance level. *J Sports Sci*. 2017;35(16):1614-1621.
- Ribeiro J, Figueiredo P, Sousa M, De Jesus K, Keskinen K, Vilas-Boas JP, Fernandes RJ. Metabolic and ventilatory thresholds assessment in front crawl swimming. *J Sports Med Phys Fitness*. 2015;55(7-8):701-7.
- Robinson DM, Robinson SM, Hume PA, Hopkins WG. Training intensity of elite male distance runners. *Med Sci Sports Exerc*. 1991;23(9):1078-82.
- Rodriguez FA. Metabolism evaluation of swimmers and water polo players. *Kinesiology J Biol Exerc*. 1997;2(1):19-29.

- Rodriguez FA, Mader A. Energy metabolism during 400 m and 100 m crawl swimming: computer simulation based on free swimming measurement. In Biomechanics and medicine in swimming. Under the direction of Chatard JC. Publications of the University of Saint-Etienne. 2003; 373-78.
- Rodriguez F, Keskinen K, Keskinen O. Oxygen uptake kinetics during front crawl swimming. Arch Med Sport. 2008; 25: 128.
- Rodriguez FA, Lätt E, Jürimäe J, Maestu J, Purge P, Rämson R, Haljaste K, Keskinen KL, Jürimäe T. $\dot{V}O_2$ kinetics in all-out arm stroke, leg kick and whole stroke front crawl 100-m swimming. Int J Sports Med. 2016;37(3):191-196.
- Rodriguez FA, Mader A. Energy systems in swimming. Word Book of Swimming: From Science to Performance. Seifert, L., Chollet, D., Mujika, I. Eds. 2010.
- Rodriguez L, Veiga S. Effect of the Pacing Strategies on the Open Water 10km World Swimming Championships Performances. Int J Sports Physiol Perform. 2017;16:1-19.
- Rønnestad BR, Ellefsen S, Nygaard H et Zacharoff EE, Vikmoen O, Hansen J, Hallén J. Effects of 12 weeks of block periodization on performance and performance indices in well-trained cyclists. Scand J Med Sci Sports. 2014;24(2): 327-35.
- Roth SM. Critical overview of applications of genetic testing in sport talent identification. Recent Patents on DNA and Gene Sequences. 2012;6,247-255.
- Rushall BS, Busch JD. Hematological responses to training in elite swimmers. Can J Appl Sport Sci. 1980; 5(3): 164-169.
- Rushall BS, Psy R. The future of swimming, Myths and Sciences. Swimming Sciences, In Rushall, B.S. (Eds.). 2009(37).
- Ryan R, Coyle E, Quick R. Blood lactate profile throughout a training season in elite female swimmers. J Swim Res. 1990; 6: 5-9.
- **S**aavedra JM, Einarsson I, Sekulic D, Garcia-Hermoso A. Analysis of pacing strategies in 10 km open water swimming in international events. Kinesiology 2018;50:2.
- Salazar-Lioggiodice M, Arroyo E, Pérez B. Anthropometric characteristics and skeletal maturity of male Venezuelan swimmers. Invest Clin. 2006;47(2):143-54.
- Salo D, Riewald SA. Swimming-Specific Training. In: Complete Conditioning for Swimming. USA: Human Kinetics, 37; 2008.
- Sandbakk Ø, Holmberg HC. Physiological capacity and training routines of elite cross-country skiers: approaching the upper limits of human endurance. Int J Sports Physiol Perform. 2017;[Epub ahead of print].

- Sandbakk Ø, Sandbakk SB, Ettema G, Welde B. Effects of intensity and duration in aerobic high-intensity interval training in highly trained junior cross-country skiers. *J Strength Cond Res.* 2013;27(7):974-80.
- Santhiago V, da Silva AS, Papoti M, Gobatto CA. Responses of hematological parameters and aerobic performance of elite men and women swimmers during a 14-week training program. *J Strength Cond Res.* 2009; 23(4): 1097-1105.
- Santone C, Dinallo V, Paci M, D'Ottavio S, Barbato G, Bernardini S. Saliva metabolomics by NMR for the evaluation of sport performance. *J Pharm Biomed Anal.* 2014;88, 441-6.
- Sargent C, Roach GD. Sleep duration is reduced in elite athletes following night-time competition. *Chronobiol Int.* 2016;33(6):667-70
- Schmitt L, Regnard J, Desmarests M, Mauny F, Mourot L, Fouillot JP, Coulmy N, Millet G. Fatigue shifts and scatters heart rate variability in elite endurance athletes. *PLoS One* 2013;12;8(8):e71588.
- Schmitt L, Regnard J, Millet GP. Monitoring Fatigue Status with HRV Measures in Elite Athletes: An Avenue Beyond RMSSD? *Front Physiol.* 2015;19;6:343.
- Schumacher YO, Mueller P. The 4000-m team pursuit cycling world record: theoretical and practical aspects. *Med Sci Sports Exerc.* 2002; 34: 1029–1036.
- Seals DR, Chase PB. Influence of physical training on heart rate variability and baroreflex circulatory control. *J Appl Physiol* (1985). 1989;66(4):1886-95.
- Sedeaud A. Caractéristiques anthropométriques et performances de haut niveau : évolutions, indicateurs et optimisations. 2013.
- Sedeaud A, Marc A, Marck A, Dor F, Schipman J, Dorsey M, Haida A, Berthelot G, Toussaint JF. BMI, a Performance Parameter for Speed Improvement. *PLoS ONE* 2014;9:e90183.
- Sekulić D, Zenić N, Zubcević NG. Non linear anthropometric predictors in swimming. *Coll Antropol.* 2007;31:803–9J.
- Seifert L, Chollet D, Chatard JC. Kinematic changes during a 100-m front crawl: effects of performance level and gender. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(10):1784-93.
- Seifert L, Komar J, Leprêtre PM, Lemaitre F, Chavallard F, Alberty M, Houel N, Hausswirth C, Chollet D, Hellard P. Swim specialty affects energy cost and motor organization. *Int J Sports Med.* 2010;31(9):624-30.
- Seiler S. Seiler's hierarchy of endurance training needs. European endurance conference. European Athletics Coaching Summit Series, Oslo, Norway, 2016.

- Seiler S. What is best practice for training intensity and duration distribution in endurance athletes? *Int J Sports Physiol Perform*. 2010;5(3):276-91.
- Seiler S, Haugen O, Kuffel E. Autonomic recovery after exercise in trained athletes: intensity and duration effects. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;39(8):1366-73.
- Seiler KS, Kjerland GØ. Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution? *Scand J Med Sci Sports*. 2006 Feb;16(1):49-56.
- Seiler KS, Tonnessen E. Intervals, thresholds, and long slow distance: the role of intensity and duration in endurance training. *Sportscience*. 2009;13, 32–53.
- Selye H. What is stress ? *Metabolism*. 1956;5(5):525-30.
- Sharp R, Vitelli C, Costill DL, Thomas R. Comparison between blood lactate and heart rate profiles during a season of competitive swim training. *J Swim Res*. 1984; 1: 17–20.
- Shaw G, Mujika I. Anthropometric profiles of elite open-water swimmers. *Int J Sports Physiol Perform*. 2018;1;13(1):115-118.
- Shepro D, Knuttgen HG. *Complete Conditioning: No-nonsense Guide to Fitness and Good Health*. Addison-Wesley Educational Publishers Inc. 1976.
- Sjodin B, Jacobs I, and Karlsson J. Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med*. 1981;2:23-26.
- Sperlich, B, Zinner, C, Heilemann, I, Kjendlie, PL, Holmberg, HC, and Mester, J. High-intensity interval training improves $\dot{V}O_{2pic}$, maximal lactate accumulation, time trial and competition performance in 9–11-year-old swimmers. *Eur J Appl Physiol*. 2010;110:1029–1036.
- Solli GS, Tønnessen E, Sandbakk Ø. The Training Characteristics of the World's Most Successful Female Cross-Country Skier. *Front Physiol*. 2017;18;8:1069.
- Sousa AC, Figueiredo P, Oliveira NL, Oliveira J, Silva AJ, Keskinen KL, Rodríguez FA, Machado, LJ. $\dot{V}O_2$ kinetics in 200-m race-pace front crawl swimming. *Int J Sports Med*. 2011;32(10):765-70.
- Sousa A, Vilas-Boas JP, Fernandes RJ, Figueiredo P. $\dot{V}O_2$ at maximal and supramaximal intensities: lessons to high interval training in swimming. *Int J Sports Physiol Perform*. 2016:1-22.
- Stanczyk FZ, Gentzschein E, Ary BA, Kojima T, Ziogas A, Lobo RA. Urinary progesterone and pregnanediol. Use for monitoring progesterone treatment. *J Reprod Med*. 1997;42(4):216-22.

- Stanley J, D'Auria S, Buchheit M. Cardiac Parasympathetic Activity and Race Performance: An Elite Triathlete Case Study. *Int J Sports Physiol Perform.* 2015;10(4):528-34.
- Stegmann H, Kindermann W, and Schnabel A. Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *Int J Sports Med.* 1981;2:160-165.
- Steinacker JM, Lormes W, Lehmann M, Altenburg D. Training of rowers before world championships. *Med Sci Sports Exerc.* 1998;30(7):1158-63.
- Stenberg J, Astrand PO, Ekblom B, Royce J, Saltin B. Hemodynamic response to work with different muscle groups, sitting and supine. *J Appl Physiol.* 1967;22(1):61-70.
- Stocker D, Pink M, Jobe FW. Comparison of shoulder injury in collegiate and master's-level swimmers. *Clin J Sport Med.* 1995;5(1):4-8.
- Stoggl T, Sperlich B. Polarized training has greater impact on key endurance variables than threshold, high intensity, or high volume training. *Front Physiol.* 2014;4;5:33.
- Stöggl TL, Sperlich B. The training intensity distribution among well-trained and elite endurance athletes. *Front Physiol.* 2015;27;6:295.
- Suguiyama, Y. The training of Katie Ledecky. In *FINA Swimming Coaches Golden Clinic* [In line]. 2012.
- Sung DJ, Kim S, Kim J, An HS, So W-Y. Role of l-carnitine in sports performance: Focus on ergogenic aid and antioxidant. *Science & Sports.* 2016;31(4):177-188.
- Surkina ID, Gotovtseva EP. Role of immune systems in adaptation processes in sportsmen. *Teor Prakt FizKult.* 1991;8,27.
- Svedahl K, MacIntosh BR. Anaerobic threshold: The concept and methods of measurement. *Can J Appl Physiol.* 2003;28(2): 299-323.
- **T**anner RK, Fuller KL, Ross ML. Evaluation of three portable blood lactate analysers: Lactate Pro, Lactate Scout and Lactate Plus. *Eur J Appl Physiol.* 2010;109(3):551-9.
- Taïar R, Bertucci W, Letellier T, Benkemis I. Experimental assessment of the drag coefficient during butterfly swimming in hydraulic flume. *Acta Bioeng Biomech.* 2005;7:97.
- Task Force. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Eur Heart J.* 1996;17(3):354-81.
- Taylor SR, Rogers GG, Driver HS. Effects of training volume on sleep, psychological, and selected physiological profiles of elite female swimmers. *Med Sci Sports Exerc.* 1997;29(5):688-93.

- Taylor J, Todd G, Gandevia S. Evidence for a supraspinal contribution to human muscle fatigue. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*. 2006;33: 400-405.
- Tegtbur U, Busse MW, and Braumann KM. Estimation of an individual equilibrium between lactate production and catabolism during exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 1993;25:620-627.
- Termin B, Pendergast DR. Training using the stroke frequency-velocity relationship to combine biomechanical and metabolic paradigms. *J Swim Res*. 14: 9–17, 2000.
- Thomas L, Busso T. A theoretical study of taper characteristics to optimize performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37(9):1615-21.
- Tjelta LI, Enoksen, E. Training characteristics of male junior cross country and track runners on European top level. *Int J Sports Sci Coach* 2010;5:193-203.
- Tomikawa M, Shimoyama Y, Nomura T. Factors related to the advantageous effects of wearing a wetsuit during swimming at different submaximal velocity in triathletes. *J Sci Med Sport*. 2008;11:417–23.
- Tønnessen E, Svendsen IS, Ronnestadt BR, Hisdal J, Haugen TA, Seiler S. The annual training periodization of 8 world champions in Orienteering. *Int J Sports Physiol Perform*. 2015;10(1):29-38.
- Tønnessen E, Sylta Ø, Haugen TA, Hem E, Svendsen IS, Seiler S. The road to gold: training and peaking characteristics in the year prior to a gold medal endurance performance. *PLoS One*. 2014;9(7):e101796.
- Toubekis AG, Douda HT, Tokmakidis SP. Influence of different rest intervals during active or passive recovery on repeated sprint swimming performance. *Eur J Appl Physiol*. 2005;93(5-6):694-700.
- Toussaint HM, Carol A, Kranenborg H, Truijens MJ. Effect of fatigue on stroking characteristics in an arms-only 100-m front-crawl race. *Med Sci Sports Exerc*. 2006; 38(9): 1635-1642.
- Toussaint HM, Hollander AP. Energetics of competitive swimming. Implications for training programmes. *Sports Med*. 1994;18(6):384-405.
- Troup JP. (1984). Energy systems and training considerations. *Journal of Swimming Research*. 1984; 1:13-16.
- Troup JP. Aerobic characteristics of the four competitive strokes. In: *Annual Studies by the International Center for Aquatic Research (3-7)* : Troup J., editor. International Center for Aquatic Research, Colorado Spring: US Swimming Press. 1991.

- Troup JP. The physiology and biomechanics of competitive swimming. *Clin Sports Med.* 1999;18:267–85.
- Tumilty L, Davison G, Beckmann M, Thatcher R. Failure of oral tyrosine supplementation to improve exercise performance in the heat. *Med Sci Sports Exerc.* 2014;46(7):1417-25.
- Turner A. The Science and practice of periodization: A brief review. *J Strength Cond.* 2011;33(1): 34–46.
- **U**rbanek, J. 2003. Middle Distance Training. In *ASCA World Clinic Yearbook.* 2003
- Uusitalo AL, Tahvanainen KU, Uusitalo AJ, Rusko HK. Non-invasive evaluation of sympathovagal balance in athletes by time and frequency domain analyses of heart rate and blood pressure variability. *Clin Physiol.* 1996;16(6):575-88.
- Uusitalo AL, Uusitalo AJ, Rusko HK. Heart rate and blood pressure variability during heavy training and overtraining in the female athlete. *Int J Sports Med.* 2000;21(1):45-53.
- **V**andenbogaerde TJ, Derave W, Hellard P. High intensity in Swimming. In Buchheit and Laursen, *Science and application of high-intensity interval training.* 2018.
- Van der Hoop JM, Fahlman A, Hurst T, Rocho-Levine J, Shorter KA, Petrov V, Moore MJ. Bottlenose dolphins modify behavior to reduce metabolic effect of tag attachment. *J Exp Biol.* 2014;1;217(Pt 23):4229-36.
- Van Heest JL, Mahoney CE, Herr L. Characteristics of Elite Open-Water Swimmers. *J Strength Cond Res.* 2004;18(2):302.
- Vergnoux F. Science and Innovation of Distance and IM Coaching. *Swimming Coaches Golden Clinic.* Doha (Qatar). [Online.] 2014.
- Vilas-Boas JP, Fernandes RJ, Barbosa TM. Intra-cycle variations, swimming economy, performance, and training in swimming. *World Book of Swimming: From Science to Performance.* Seifert, L., Chollet, D., Mujika, I. Eds. 2009;119-134.
- Vinet A, Beck L, Nottin S, Obert P. Effect of intensive training on heart rate variability in prepubertal swimmers. *Eur J Clin Invest.* 2005;35(10):610-4.
- Viru A. Mechanism of general adaptation. *Med Hypotheses.* 1992;38(4):296-300.
- Viru A. The mechanism of training effects: a hypothesis. *Int J Sports Med.* 1984;5(5):219-27.

- Viru A, Smirnova T. Health promotion and exercise training. *Sports Med.* 1995;19(2):123-36.
- Vogt P, Rüst CA, Rosemann T, Lepers R, Knechtle B. Analysis of 10 km swimming performance of elite male and female open-water swimmers. *Springerplus.* 2013;12(2):603.
- **W**akayoshi K, D'Acquisto LJ, Cappaert JM, Troup JP. Relationship between oxygen uptake, stroke rate and swimming velocity in competitive swimming. *Int J Sports Med.* 1995;16(1):19-23.
- Wakayoshi K, D'Acquisto LJ, Cappaert JM, Troup JP. Relationship between metabolic parameters and stroking technique characteristics in front crawl. In *Biomechanics and Medicine in Swimming VII* : Troup JP, Hollander AP, Strasse D, Trappe W, Cappaert JM, Trappe TA. 1996;152-158.
- Wakayoshi K, Yoshida T, Ikuta Y, Mutoh Y, Miyashita M. Adaptations to six month of aerobic swim training. Changes in velocity, stroke rate, stroke length and blood lactate. *Int J Sports Med.* 1993;14(7):368-72.
- Weineck J. *Optimal training.* Vigot. 1992.
- Wilkie DR. Equations describing power input by humans as a function of duration of exercise. In: *Exercise bioenergetics and gas exchange.* Cerretelli P, Whipp BJ (eds), Elsevier, Amsterdam. 1980;75-80.
- Wolfrum M, Knechtle B, Rüst CA, Rosemann T, Lepers R. Sex-related differences and age of peak performance in breaststroke versus freestyle swimming. *BMC Sports Sci Med Rehabil.* 2013;19;5(1):29.
- Woods D, Hickman M, Jamshidi Y, Brull D, Vassiliou V, Jones A, Humphries S, Montgomery H. Elite swimmers and the D allele of the ACE I/D polymorphism. *Hum Genet.* 2001;108(3):230-2.
- Wurtman RJ, Larin F, Mostafapour S, Fernstrom JD. Brain catechol synthesis: control by brain tyrosine concentration. *Science.* 1974;185(146):183–4.
- **Y**amamoto Y, Miyachi M, Saitoh T, Yoshioka A, Onodera S. Effects of endurance training on resting and post-exercise cardiac autonomic control. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33:1496–1502.

- Yamamoto Y, Miyashita M, Hughson RL, Tamura S, Shinohara M, and Mutoh Y. The ventilatory threshold gives maximal lactate steady state. *Eur J Appl Physiol.* 1991;63: 55-59.
- Yamamoto Y, Mutoh Y, Miyashita M. Hematological and biochemical indices during the tapering period of competitive swimmers. In: Ungerechts BE, Wilke K, Reischle K, editors. *Champaign Human Kinetics Books.* 1988.
- Yan B, AJ, Wang G, Lu H, Huang X, Liu Y, Zha W, Hao H, Zhang Y, Liu L, Gu S, Huang Q, Zheng Y, Sun J. Metabolomic investigation into variation of endogenous metabolites in professional athletes subject to strength-endurance training. *J Appl Physiol.* 2009;106(2):531-8.
- Ycaza Herrera A, Shawn E, Nielsen MM. Stress-induced increases in progesterone and cortisol in naturally cycling women. *Neurobiol Stress.* 2016;3:96–104.
- **Z**ameziati K, Mornieux G, Rouffet D, Belli A. Relationship between the increase of effectiveness indexes and the increase of muscular efficiency with cycling power. *Eur J Appl Physiol.* 2006;96(3):274-81.
- Zamparo P, Antonutto G, Capelli C, Francescato MP, Girardis M, Sangoi R, Soule RG, Pendergast DR. Effects of body size, body density, gender and growth on underwater torque. *Scand J Med Sci Sports.* 1996;6(5):273-80.
- Zamparo P, Bonifazi M, Faina M, Milan A, Sardella F, Schena F, Capelli C. Energy cost of swimming of elite long- distance swimmers. *Eur J Appl Physiol.* 2005;94(5-6):697-704.
- Zamparo P, Capelli C, Cautero M, Di Nino A. Energy cost of front-crawl swimming at supra-maximal speeds and underwater torque in young swimmers. *Eur J Appl Physiol.* 2000;83(6):487-91.
- Zamparo P, Capelli C, Pendergast D. Energetics of swimming: a historical perspective. *Eur J Appl Physiol.* 2011;111(3):367-378.
- Zamparo P, Capelli C, Termin B, Pendergast DR, di Prampero PE. Effect of the underwater torque on the energy cost, drag and efficiency of front crawl swimming. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1996;73(3-4):195-201.
- Zamparo P, Lazzer S, Antoniazzi C, Cedolin S, Avon R, Lesa C. The interplay between propelling efficiency, hydrodynamic position and energy cost of front crawl in 8 to 19-year-old swimmers. *Eur J Appl Physiol.* 2008;104:689–99.

- Zapico AG, Calderón FJ, Benito PJ, González CB, Parisi A, Pigozzi F, Di Salvo V. Evolution of physiological and haematological parameters with training load in elite male road cyclists: a longitudinal study. *J Sports Med Phys Fitness*. 2007;47(2):191-6.
- Zuniga J, Housh TJ, Mielke M, Hendrix CR, Camic CL, Johnson GO, Housh DJ, Schmidt RJ. Gender comparisons of anthropometric characteristics of young sprint swimmers. *J Strength Cond Res*. 2011;25(1):103-8.

Titre : Les limites de la performance en natation : entre facteurs innés et influences des stratégies d'entraînement

Mots clés : natation, performance, intensité, métabolisme, fatigue

Résumé : Les stratégies d'entraînement doivent être optimisées en termes de charge, de volume, d'intensité pour générer des adaptations profondes et performer en natation. La première partie de thèse a montré l'importance des systèmes aérobie et anaérobie pour la majorité des épreuves, tout en précisant que la plupart des nageurs français dédient une forte part de l'entraînement autour du seuil anaérobie.

La deuxième partie a confirmé que l'entraînement polarisé est efficace pour améliorer ses performances et limiter l'apparition de fatigue, même si aucune différence physiologique n'a été observée en comparaison avec l'entraînement au seuil.

La troisième partie a montré que l'amélioration des performances était rendue possible par un état de fatigue limité. Une part excessive de l'entraînement réalisé à haute intensité implique des perturbations biologiques et une fatigue centrale s'installe. L'activité du système nerveux autonome peut être estimée pour évaluer l'activité des systèmes orthosympathiques et parasympathiques des nageurs.

Ces conclusions montrent que les capacités physiologiques sont observées après de longues périodes d'entraînement, où le suivi de la fatigue est essentiel. Une distribution optimale de l'intensité peut se construire autour des réponses individuelles du nageur.

Title : Swimming performance limits : innate factors and effects of training strategies

Keywords : swimming, performance, intensity, metabolism

Abstract : Training strategies should be optimized with load, volume and intensity to induce physiological adaptations and swimming performance. The first part of this thesis highlighted the relevancy of aerobic and anaerobic systems for the majority of events, assuming that most of french swimmers dedicate a large training part at anaerobic threshold intensity.

The second part confirmed the effectiveness of polarized training on swimming performance and prevent fatigue, even if no physiological difference was observed in comparison with threshold training.

The third part showed that performance improvement was enhanced by a small fatigue state. An excessive part realized at high intensity generate biological disturbances and a reduction of the central command. The nervous autonomic system activity can be estimated using heart rate variability analysis, reflecting sympathetic and parasympathetic activity.

The conclusions show that physiological capacities are observed after long training periods, where fatigue monitoring is essential. An optimal intensity distribution can be prescribed depending on individual responses of the swimmer.