

Mémoire réalisé

Dans le cadre de la Licence STAPS

Filière Entraînement Sportif

Analyse des effets de l'entraînement en hypercapnie sur la capacité à répéter des sprints en natation

Présenté par

Mattéo LUTUN

Sous la responsabilité de

Mr Julien BOISSIERE et

Mr Michel SYDNEY

Année 2024/2025

Mémoire réalisé

Dans le cadre de la Licence STAPS

Filière Entraînement Sportif

Analyse des effets de l'entraînement en hypercapnie sur la capacité à répéter des sprints en natation

Présenté par

Mattéo LUTUN

Sous la responsabilité de

Mr Julien BOISSIERE et

Mr Michel SYDNEY

Année 2024/2025

Remerciements

À l'issue de la rédaction de ce mémoire, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement monsieur BOISSIERE Julien et SYDNEY Michel, pour leurs encadrements, leurs précieux conseils et leurs disponibilités tout au long de cette recherche. Leurs expertises et leurs bienveillances ont été des éléments clés dans la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements aux nageurs et entraîneurs du club Athlétic Villeneuve d'Ascq Natation (AVAN), qui ont accepté de participer à cette étude. Leur engagement et leur patience ont été essentiels à la collecte des données et à l'analyse des performances. Un grand merci, notamment à mon tuteur professionnel, Romain Duthoit, pour m'avoir transmis son expérience et m'avoir accompagné durant ce travail.

Merci à la présidente du club de l'Avan, Yamina Kuskusi, de m'avoir accueilli au sein du club.

Un immense merci à l'ensemble du personnel de l'université, ainsi qu'à mes enseignants, qui m'ont accompagné tout au long de mon cursus en STAPS. Leur transmission de savoirs et leur pédagogie ont grandement contribué à ma formation pour l'entraînement sportif.

Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif et d'un investissement personnel important. Merci à tous ceux qui ont contribué à cette belle aventure académique et humaine.

Glossaire

AVAN : Athlétique Villeneuve d'Ascq Natation

STAPS : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

CO₂ : Dioxyde de carbone

PaCO₂ : Pression partielle de dioxyde de carbone dans le sang artériel

RST : Repeated Sprint Test (Test de Sprint Répété)

RSA : Repeated Sprint Ability (Capacité à répéter des sprints)

VHL : Hypoventilation Volontaire à faible Volume Pulmonaire (Méthode d'entraînement respiratoire visant à améliorer l'adaptation physiologique en conditions hypoxiques et hypercapniques)

ATP : Adénosine Triphosphate (Molécule énergétique utilisée par les cellules)

PGC-1 α : PPAR Gamma Coactivator-1 Alpha (Protéine régulant la biogenèse mitochondriale et l'endurance musculaire)

VMA : Vitesse Maximale Aérobie (Plus petite vitesse de course ou de nage correspondant à la consommation maximale d'oxygène)

AMPK : AMP-Activated Protein Kinase (Enzyme clé dans la régulation énergétique et l'adaptation à l'entraînement)

VO₂max : Consommation maximale d'oxygène (Capacité maximale du corps à utiliser l'oxygène lors d'un effort intense)

FC : Fréquence Cardiaque (Nombre de battements du cœur par minute)

Vmax : Vitesse Maximale (Vitesse la plus élevée atteinte lors d'un effort maximal)

VFC : Variabilité de la Fréquence Cardiaque (Indicateur de la récupération et de l'adaptation du système nerveux autonome)

Table des matières

Remerciements	4
Glossaire.....	5
Introduction générale	7
Chapitre 1 - Rapport de stage "Encadrement"	8
1.1 - Introduction	8
1.2 - Organigramme de la structure d'accueil	8
1.3 - Description de la population étudiée	10
1.4 - Caractéristiques particulières du stage.....	11
Chapitre 2.....	12
2.1 - Introduction (thème de l'étude).....	12
2.2 - Revue de littérature	13
2.2.a – Introduction à l'hypercapnie.....	13
2.2.b – L'entraînement en hypercapnie et son impact sur la performance	14
2.2.c – La capacité à répéter de sprint influençable par l'entraînement en hypercapnie.....	15
2.2.d – Effets de l'hypercapnie sur les adaptations physiologiques à long terme	16
2.2.d – Hypercapnie : Influence sur la VO ₂ max.....	17
2.3 - Hypothèse de recherche.....	18
2.4 - Matériel et méthodes (description des outils utilisés, analyses statistiques).....	19
2.5 - Résultats	20
2.6 - Discussion	22
2.6.a Interprétation des résultats.....	22
2.6.b Mise en évidence des tendances générales et des points clés à retenir Confrontation avec la littérature existante.....	25
2.6.c Limites de l'étude.....	27
2.7 - Conclusion.....	29
Bibliographie.....	30
Résumé de l'étude.....	34
Mots-clés.....	34

Introduction générale

La performance en natation repose sur une multitude de facteurs, allant des caractéristiques physiologiques des athlètes aux stratégies d'entraînement mises en place pour optimiser leur potentiel. Dans ce cadre, mon mémoire s'articule autour de deux axes complémentaires : une immersion dans la structure d'accueil, Athlétique Villeneuve d'Ascq Natation (AVAN), et une recherche expérimentale visant à analyser les effets d'un entraînement en hypercapnie sur la performance en sprint répété.

Dans une première partie, je présenterai l'Avant-Natation, son fonctionnement, ses objectifs, ainsi que mon expérience de stage en tant qu'entraîneur. Cette immersion au sein de la structure m'a permis d'observer les dynamiques d'entraînement, d'échanger avec les nageurs et de mieux comprendre les enjeux du perfectionnement sportif.

La seconde partie sera consacrée à l'étude expérimentale que j'ai menée sur l'impact d'une période d'entraînement en hypercapnie sur les performances aux tests de sprint répété. Cette approche vise à explorer les adaptations physiologiques et la pertinence d'un tel protocole pour améliorer l'endurance de vitesse et la capacité à enchaîner des efforts intenses en natation.

Chapitre 2

2.1 - Introduction (thème de l'étude)

La performance en natation repose sur l'interaction de plusieurs facteurs physiologiques, techniques et psychologiques. Ces éléments déterminent en grande partie les capacités d'un nageur à atteindre des niveaux de performance élevés. Parmi ces facteurs, la capacité à répéter des sprints de haute intensité avec des temps de récupération relativement courts est un indicateur clé du niveau de performance, en particulier chez les nageurs de bon ou haut niveau. En effet, la répétition de ces efforts intenses permet d'évaluer non seulement l'efficacité des systèmes énergétique (voies des phosphagènes et glycolytiques ainsi que oxydatives pour la récupération), de la technique ainsi que les capacités mentales et la résistance à l'effort qui sont essentielles pour maintenir la performance malgré la fatigue.

Dans ce contexte, les méthodes d'entraînement innovantes jouent un rôle clé pour maximiser les performances des athlètes. L'entraînement en conditions d'hypercapnie, caractérisé par une augmentation du dioxyde de carbone dans le sang, est une approche émergente visant à améliorer la tolérance à l'effort intense et la capacité de récupération. Cette technique repose sur l'hypothèse que l'exposition contrôlée à des niveaux élevés de CO₂ pourrait induire des adaptations physiologiques afin de retarder la fatigue et une optimisation de la performance.

Le présent mémoire se propose d'analyser les effets d'une période d'entraînement en hypercapnie sur la capacité à répéter des sprints en natation. L'étude est structurée autour de deux groupes : un groupe test (n=11) soumis à quatre séances d'entraînement en hypercapnie par semaine et un groupe contrôle (n=10) suivant le même programme, mais sans la consigne d'hypercapnie. Les performances des deux groupes ont été évaluées à travers un protocole spécifique, consistant en un test de base (8 sprints de 25 mètres avec 30 secondes de récupération) et un test de fin (8 sprints de 25 mètres avec 30 secondes de récupération), permettant de mesurer les progrès réalisés au cours de la période d'entraînement de sept semaines.

2.2 - Revue de littérature

2.2.a – Introduction à l'hypercapnie

L'hypercapnie fait référence à une augmentation anormale du dioxyde de carbone (CO₂) dans le sang. Cette condition peut être causée par diverses situations, notamment l'exercice intense, l'hypoventilation, ou des maladies respiratoires. Elle est généralement mesurée par la concentration de CO₂ au niveau artériel (PaCO₂), et les valeurs normales oscillent autour de 35-45 mmHg. Les causes principales de l'hypercapnie incluent des altérations dans la capacité de ventilation pulmonaire ou des troubles liés à la régulation du pH sanguin (Goldring *et al.*, 1976).

L'hypercapnie affecte la respiration, la régulation du pH sanguin, et la fonction cardiaque. Elle peut induire une réponse respiratoire accrue (tachypnée) et une vasodilatation périphérique pour améliorer la perfusion des tissus. Les effets physiopathologiques sont étroitement liés à l'acidose respiratoire, qui est une conséquence d'un excès de CO₂ (Almanza-Hurtado *et al.*, 2022). Une revue de la Société de Réanimation de Langue Française (n.d.) indique que l'hypercapnie peut affecter plusieurs systèmes, y compris le système nerveux autonome.

L'hypercapnie, peut influencer la performance sportive de diverses manières. Une étude publiée dans *La Médecine du Sport* souligne que les apnéistes, qui pratiquent des exercices en apnée, sont confrontés à des contraintes physiologiques complexes, notamment l'hypoxie (manque d'oxygène) et l'hypercapnie. Ces conditions nécessitent des adaptations spécifiques de l'organisme pour maintenir la performance (La Médecine du Sport, n.d.). Cependant, des études suggèrent également que l'exposition contrôlée à l'hypercapnie pourrait entraîner des adaptations bénéfiques, telles que l'amélioration de la tolérance à l'acidose lactique, ce qui peut conduire à de meilleures performances lors d'efforts répétés de haute intensité (Thomas-Junius *et al.*, 2014).

Les effets sur la performance sont également dépendants du type d'exercice. Par exemple, lors d'efforts de type anaérobie, l'accumulation rapide de lactate est un facteur limitant de la performance. L'hypercapnie, en modifiant la gestion de cette acidose, pourrait permettre de maintenir une intensité plus élevée plus longtemps (Paradis-Deschênes *et al.*, 2024). Les athlètes soumis à des conditions d'entraînement en hypercapnie peuvent développer une meilleure tolérance aux niveaux élevés de lactate générés lors d'exercices intenses. Cette adaptation physiologique contribue à retarder les effets de l'acidose métabolique, notamment l'accumulation d'ions H⁺, responsable de la diminution du pH musculaire. Cette baisse du pH constitue un facteur limitant de la performance, car elle perturbe le fonctionnement de certaines enzymes impliquées dans la production d'énergie, compromettant ainsi l'efficacité musculaire lors d'efforts prolongés ou à haute intensité.

2.2.b – L'entraînement en hypercapnie et son impact sur la performance

Les recherches sur l'entraînement en hypercapnie et ses effets sur la performance sportive sont relativement récents. Des études menées sur des athlètes suggèrent que l'exposition à des niveaux modérés de CO₂ pendant l'entraînement pourrait limiter la fatigue et améliorer la capacité à soutenir des efforts intenses sur plusieurs cycles de travail (Smith et al., 2019).

L'entraînement en hypoventilation est une méthode utilisée pour induire une hypercapnie et ainsi améliorer les performances sportives, notamment en natation. Il consiste à réduire volontairement la fréquence respiratoire pendant l'effort, ce qui entraîne simultanément une hypoxémie (diminution de l'oxygène sanguin et musculaire) et une hypercapnie (augmentation du dioxyde de carbone dans le sang et dans la cellule musculaire). Ces conditions favorisent l'acidification du sang et du muscle et stimulent des adaptations physiologiques bénéfiques, telles que l'amélioration de la capacité tampon sanguine et musculaire, permettant ainsi de retarder l'acidose lors d'efforts intenses et de courte durée (Andric, n.d.).

Parmi les différentes stratégies, l'hypoventilation peut être pratiquée à haut ou bien bas volume pulmonaire.

L'entraînement en hypoventilation à haut volume pulmonaire consiste à effectuer des blocages respiratoires après une inspiration complète. Une étude menée par Woorons et al. (2010) a montré que cette technique n'entraîne pas de diminution significative de la saturation en oxygène dans le sang, mais induit une augmentation marquée de la concentration de CO₂, provoquant une hypercapnie. Cet état pourrait améliorer la tolérance à l'acidose métabolique et renforcer la capacité tampon musculaire, ce qui serait bénéfique pour les performances lors d'efforts intenses et brefs.

À l'inverse, hypoventilation à bas volume pulmonaire, de type « expirer-bloquer », induit deux effets majeurs : l'hypoxémie et l'hypercapnie. La combinaison de ces phénomènes entraîne une augmentation de la production de lactate et d'ions hydrogène, accentuant l'acidose métabolique. Une adaptation progressive à ce type d'entraînement pourrait améliorer la régulation de cette acidose en améliorant la capacité tampon musculaire (Abood et al., 2023).

Influence du mode de respiration sur l'hypercapnie

Le mode de respiration joue un rôle clé dans l'induction de l'hypercapnie. Une étude récente suggère que la respiration nasale lors d'exercices aérobiques d'intensité modérée favorise une élévation du taux de CO₂ dans le sang. Cette stratégie respiratoire pourrait également activer une régulation positive des gènes associés à l'hypoxie, facilitant ainsi des adaptations physiologiques bénéfiques tant pour la santé que pour la performance (Abood et al., 2023).

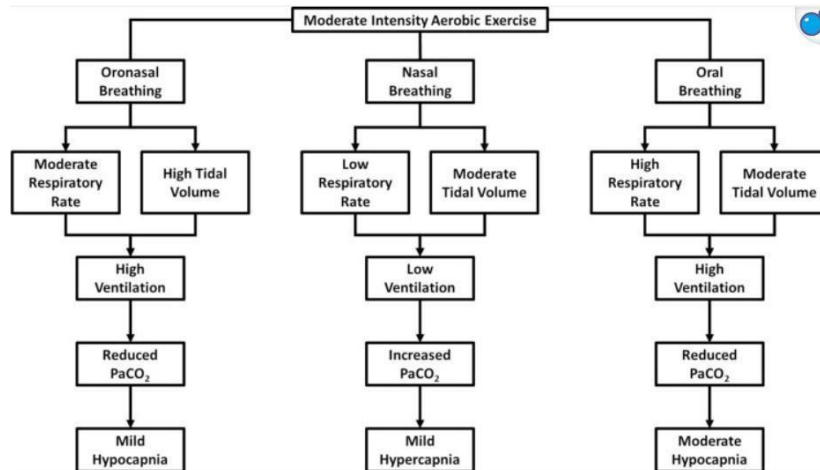


Figure 2 : Aperçu des effets induits lors d'un exercice aérobique d'intensité modérée en fonction du mode de respiration utilisé, (Abood et al., 2023)

2.2.c – La capacité à répéter de sprint et l'entraînement en hypercapnie.

Le Repeated Sprint Test (RST) est une méthode de mesure de la capacité à réaliser plusieurs sprints courts et répétés, avec des périodes de récupération limitées entre chaque effort. Ce test met en évidence les capacités aérobiques et anaérobiques, ainsi que l'évaluation de la fatigue et de l'acidose musculaire et sanguine. L'entraînement en hypercapnie, qui consiste à s'exposer à des niveaux accrus de CO₂, pourrait être un moyen efficace d'améliorer la performance au RST en augmentant la tolérance à l'acidose et en améliorant la capacité de récupération entre les sprints (Bangsbo, 2000).

Plusieurs études ont exploré la relation entre l'hypoventilation volontaire, l'hypercapnie et la capacité à répéter des sprints (Repeated Sprint Ability, RSA). Ces recherches suggèrent que l'intégration de l'hypoventilation dans les programmes d'entraînement peut améliorer la performance lors d'efforts répétés de haute intensité.

Par exemple, une étude de Rosa et al. (2024) a examiné l'impact de l'hypoventilation volontaire à faible volume pulmonaire (VHL) sur la performance de sprints répétés chez des athlètes de jiu-jitsu brésilien. Les résultats ont montré que l'hypoventilation induisait des réponses métaboliques spécifiques, telles qu'une augmentation de la désoxygénation musculaire et de certains marqueurs métaboliques, sans altérer la performance des sprints répétés (Rosa et al., 2024).

De même, une recherche de Fornasier-Santos et al en 2018 a évalué les effets d'un entraînement de sprints répétés en hypoxie induite par l'hypoventilation volontaire à faible volume pulmonaire sur la capacité de sprints répétés chez des joueurs de rugby. Après une période d'entraînement de quatre semaines, le groupe soumis à l'hypoventilation a montré une amélioration significative de sa capacité à répéter des sprints par rapport au groupe témoin (Fornasier-Santos et al., 2018).

2.2.d – Hypercapnie et fonction mitochondriale

L'hypercapnie, peut induire des adaptations physiologiques significatives, notamment au niveau mitochondrial. Les mitochondries, souvent qualifiées de "centrales énergétiques" des cellules, jouent un rôle crucial dans la production d'ATP via la phosphorylation oxydative, essentielle pour les activités musculaires prolongées.

Selon une étude de Fernandez-Marcos et al. en 2011, l'exposition répétée à l'hypercapnie pourrait stimuler la biogenèse mitochondriale, processus par lequel de nouvelles mitochondries sont formées dans les cellules. Cette adaptation est médiée par des cofacteurs de transcription tels que PGC-1 α , qui interagit avec des facteurs de transcription spécifiques pour augmenter la transcription de l'ADN mitochondrial. L'activation de PGC-1 α conduit à une augmentation de la capacité oxydative musculaire, améliorant ainsi l'efficacité énergétique et la performance en endurance.

Les mécanismes par lesquels l'hypercapnie influence la biogenèse mitochondriale impliquent notamment l'activation de voies de signalisation clés. L'AMPK, une enzyme jouant un rôle central dans l'homéostasie énergétique cellulaire, est activée en réponse à l'augmentation des niveaux de CO₂. Cette activation stimule la biogenèse mitochondriale et améliore l'oxydation des acides gras, contribuant à une meilleure performance en endurance (Viollet et al., 2019).

En plus de moduler la transcription de protéines impliquées dans la biogénèse mitochondriale l'AMPK à un rôle de régulateur de l'équilibre énergétique. Étant activée lorsque la disponibilité en ATP diminue, l'AMPK inhibe des processus consommateurs d'ATP (synthèse des lipides, synthèse des protéines, etc.) et stimule des processus producteurs d'ATP (transport du glucose, oxydation des acides gras, etc.) (Hardie et al., 2011).

D'un point de vue de la biogénèse mitochondriale, l'AMPK semble agir en majeure partie par le biais du « second messager », PGC-1 α (Fernandez-Macros et al., 2011). Plusieurs études montrent que l'AMPK agit peu sur l'aspect quantitatif (masse mitochondriale), mais a rôle important sur l'aspect qualitatif (c'est à dire, la fonction mitochondriale) (Jorgensen et al., 2007).

L'augmentation de la densité mitochondriale et de l'efficacité énergétique résultant de l'hypercapnie peut donc potentiellement améliorer l'endurance et la VMA des athlètes. Montgomery et al. en 2013 a montré que l'augmentation de la biogénèse mitochondriale et du métabolisme, induite par des interventions spécifiques, conduit à une amélioration de l'endurance à l'exercice (Montgomery et al., 2013).

2.2.e – Hypercapnie : Influence sur la VO_{2max}

Une étude de Karaula et al (2014) a exploré les effets d'un programme d'entraînement hypercapnique-hypoxique de 8 semaines sur la concentration d'hémoglobine (g/L) et la consommation maximale d'oxygène (VO_{2max}) chez des nageurs d'élite. Les résultats ont montré que ce type d'entraînement pouvait améliorer la VO_{2max}, suggérant une potentialité d'amélioration de l'endurance. Cependant, l'étude ne précise pas si ces effets sont attribuables à l'hypercapnie, à l'hypoxie, ou à leur combinaison.

2.3 - Hypothèse de recherche

L'hypercapnie, caractérisée par une augmentation du dioxyde de carbone (CO₂) dans le sang et les cellules musculaires, entraîne une diminution de la saturation en oxygène chez le nageur. Afin d'exacerber ce phénomène et d'étudier ses effets sur la performance, nous avons mis en place un protocole d'entraînement spécifique : Ainsi, les nageurs du groupe expérimental suivront, à raison de trois séances par semaine et pendant 7 semaines, un entraînement intégrant des exercices d'hypoventilation volontaire et d'apnée expiratoire. Ce groupe sera comparé à un groupe contrôle ne réalisant pas ce protocole.

L'hypothèse de recherche postule qu'au terme des sept semaines d'expérimentation, le groupe expérimental (n = 11) présentera des améliorations significatives lors du test de sprint répété (RST) soit un 8 × 25 m réalisé à vitesse maximale (V_{max}) avec un temps de récupération de 30 secondes entre chaque répétition. Ces améliorations devraient se traduire par une diminution de l'indice de fatigue moyen du groupe exprimé en pourcentage, une moindre altération des paramètres techniques et gestuels tels que l'amplitude et la fréquence de nage, une moindre altération de la fréquence cardiaque et/ou un pourcentage de FC plus faible pour des intensités égales, ainsi. De plus, les performances devraient être plus régulières sur chaque 25 mètres, voire supérieures à celles observées lors du test initial.

À l'inverse, le groupe contrôle (n = 10), qui suivra le même programme d'entraînement en termes de volume et d'intensité mais sans travail d'hypoventilation ni d'apnée expiratoire, ne devrait pas montrer d'évolution significative ou, tout au plus, une progression plus limitée en comparaison avec le groupe expérimental sur des facteurs comme l'index de fatigue et la fréquence cardiaque.

2.4 - Matériel et méthodes

Afin de tester notre hypothèse, nous avons mis en place un test initial auquel l'ensemble du groupe performance a participé ($n = 21$). Ce test consistait en un Repeated Sprint Test (RST), soit une série de 8 x 25 mètres à vitesse maximale, avec un départ dans l'eau à une température mesurée de 27,6 °C. Une récupération de 30 secondes était respectée entre chaque répétition. Le test était réalisé en crawl, et les nageurs n'avaient pas le droit d'effectuer plus de 5 mètres de coulée.

Pour la passation du test, les nageurs ont été répartis en groupes de trois selon leur niveau, ce qui a conduit à la réalisation de sept vagues successives, chacune d'une durée moyenne de sept minutes. Étant donné que tous les nageurs ne réalisaient pas leur test en même temps, l'échauffement a été décalé de sept minutes entre chaque groupe afin d'assurer des conditions équitables. L'échauffement était identique pour tous et comprenait un 400 mètres en respiration progressive (3/5/7/9), un 300 mètres en quatre nages (25 mètres jambes, 25 mètres éducatif, 25 mètres nage complète), un 200 mètres avec virages rapides et un minimum de trois ondulations en phase de coulée, ainsi que 4 x 25 mètres progressifs (60 % V_{max} , 70 % V_{max} , 80 % V_{max} et 90 % V_{max}) avec 30 secondes de récupération entre chaque répétition.

Le protocole expérimental était structuré avec trois lignes d'eau, un nageur par ligne, et trois chronomètres, un par nageur, afin de garantir le respect des 30 secondes de récupération. Chaque nageur était accompagné d'un observateur chargé de compter le nombre de mouvements de bras sur chaque 25 mètres, permettant ainsi d'évaluer la fréquence de nage (cycles/min). De plus, chaque nageur devait mesurer sa fréquence cardiaque en prenant son pouls carotidien sur 10 secondes immédiatement après chaque répétition et annoncer le résultat à son observateur. Ces données permettaient d'obtenir des informations physiologiques précises sur la performance des nageurs.

L'ensemble des données recueillies, comprenant le temps de nage, la fréquence de nage et la fréquence cardiaque, a été consigné dans un tableau Excel. À partir de ces données, plusieurs paramètres ont été calculés, notamment l'amplitude de nage, l'indice de nage, la vitesse de nage et l'index de fatigue.

Des analyses statistiques descriptives ont ensuite été réalisées à l'aide du logiciel JASP, permettant de déterminer les moyennes, les médianes et les écarts types des différentes variables.

Enfin, des analyses statistiques inférentielles ont été effectuées à l'aide du logiciel JASP. Une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA) a été utilisée pour évaluer l'effet de l'entraînement sur les variables mesurées. Les résultats aux tests post-hoc ont permis de calculer les tailles d'effet (d de Cohen) ainsi que les valeurs de p , afin de déterminer la significativité des différences observées.

À l'issue de ce test, nous avons calculé les indices de fatigue afin de constituer les deux groupes. Les groupes contrôle et expérimental ont été constitués de manière à obtenir un indice de fatigue médian relativement proche, garantissant ainsi une homogénéité dans la constitution. La médiane de l'indice de fatigue du groupe expérimental (n = 11) était de 6,48%, tandis que celle du groupe contrôle (n = 10) était de 6,28%. La moyenne de l'indice de fatigue pour les deux groupes était respectivement de 6,62 % et 6,50 %.

Les groupes ont ensuite suivi leurs protocoles d'entraînement respectifs pendant une période de sept semaines. À l'issue de cette période, le même test RST a été réalisé afin d'analyser l'évolution des performances et l'impact de l'entraînement.

2.5. Résultats

Tableau 4 : Statistiques descriptives

Statistiques descriptives

Statistiques descriptives

	moyenne vitesse pré (m.s)		moyenne vitesse post (m.s)		INDEX DE FATIGUE pré (%)		INDEX DE FATIGUE post (%)	
	Controle	Test	Controle	Test	Controle	Test	Controle	Test
Valide	10	11	10	11	10	11	10	11
Médiane	1.535	1.590	1.545	1.640	-6.285	-6.480	-6.010	-5.140
Moyenne	1.497	1.576	1.508	1.605	-6.504	-6.624	-6.152	-5.269
Écart type	0.144	0.180	0.143	0.181	3.258	3.543	3.136	2.764

	Freq moyenne pré (cycle/min)		Freq moyenne post (cycle/min)		amplitude moyenne pré (m/cycle)		amplitude moyenne post (m/cycle)	
	Controle	Test	Controle	Test	Controle	Test	Controle	Test
Valide	10	11	10	11	10	11	10	11
Médiane	40.425	40.940	40.030	40.780	2.205	2.290	2.240	2.330
Moyenne	40.061	41.573	39.406	41.081	2.253	2.279	2.285	2.347
Écart type	3.359	4.558	2.957	4.456	0.251	0.140	0.225	0.147

	IN moyen pré (m2/cycle/min)		IN moyen post (m2/cycle/min)		MOYENNE FC pré (bpm/min)		MOYENNE FC post (bpm/min)	
	Controle	Test	Controle	Test	Controle	Test	Controle	Test
Valide	10	11	10	11	10	11	10	11
Médiane	3.490	3.700	3.555	3.820	157.875	158.250	157.125	154.620
Moyenne	3.396	3.604	3.442	3.778	162.450	158.727	162.000	155.085
Écart type	0.630	0.531	0.609	0.568	14.540	21.102	14.435	20.617

	Fcmx pré (bpm/min)		Fcmx post (bpm/min)	
	Controle	Test	Controle	Test
Valide	10	11	10	11
Médiane	189.000	186.000	188.500	185.000
Moyenne	188.400	181.091	188.200	181.091
Écart type	19.225	20.047	19.326	19.872

Tableau 5 : statistiques inférentielles

Tests post-hoc

Comparaisons post-hoc - GROUPE * Vitesse

		d de Cohen	P _{holm}
Controle, Pré	Test, Pré	-	0.585
	Controle, Post	-0.067	0.038*
Test, Pré	Test, Post	-	0.585
	Controle, Post	-	0.585
	Test, Post	-0.178	< .001***

Tests post-hoc

Comparaisons post-hoc - GROUPE * Index de fatigue

		d de Cohen	P _{holm}
Controle, Pré	Controle, Post	-0.110	0.841
Test, Pré	Test, Post	-0.425	< .001***

Tests post-hoc

Comparaisons post-hoc - GROUPE * FC moyenne

		d de Cohen	P _{holm}
Controle, Pré	Controle, Post	0.025	0.216
Test, Pré	Test, Post	0.201	< .001***

Tests post-hoc

Comparaisons post-hoc - GROUPE * Indice de nage

		d de Cohen	P _{holm}
Controle, Pré	Controle, Post	-0.079	0.231
Test, Pré	Test, Post	-0.299	< .001***

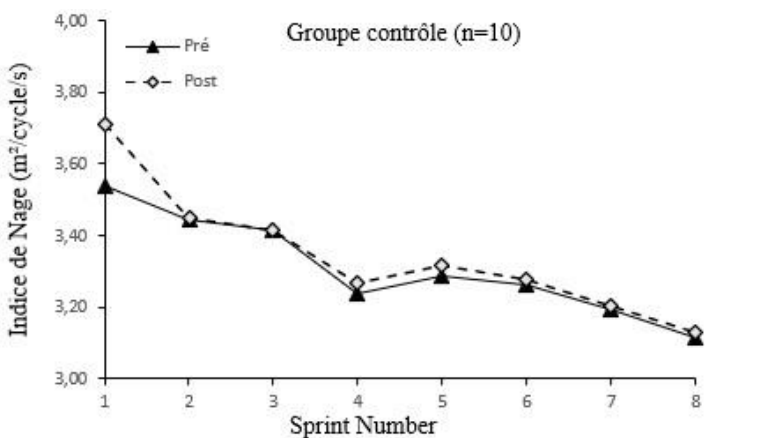
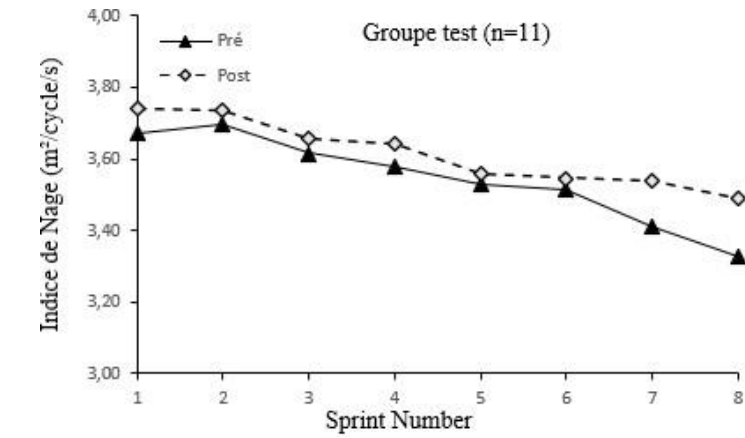
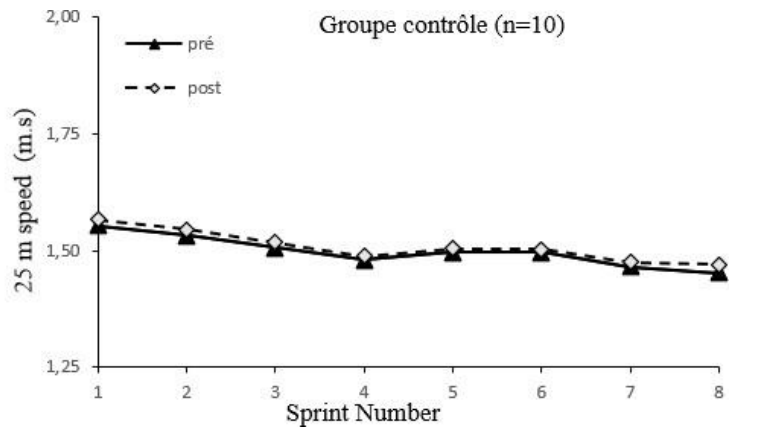
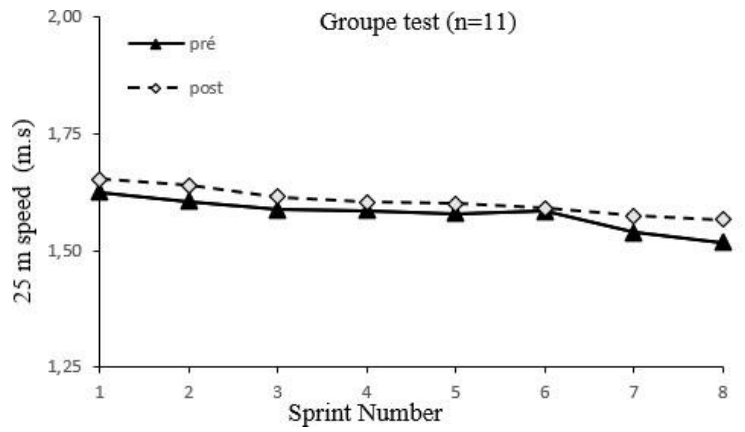
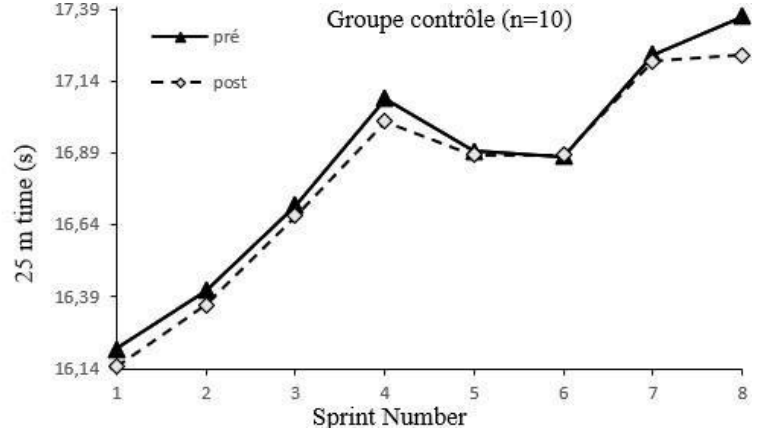
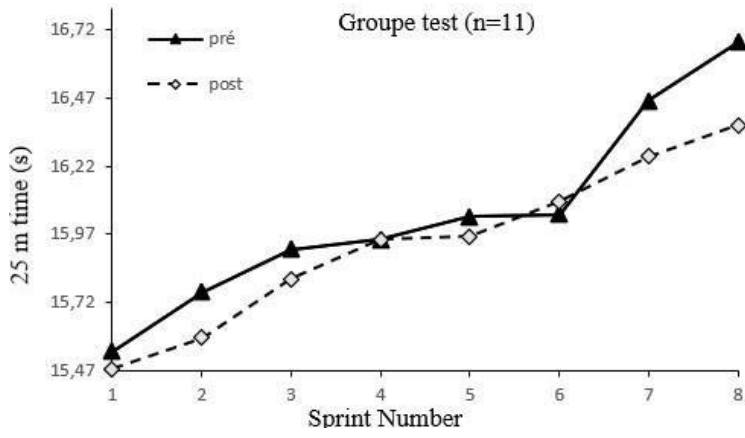


Figure 3 : Évolution des variables de performance (temps au 25 m, vitesse sur 25 m, et indice de nage) en fonction du nombre de 25 mètres effectués, lors des tests pré-entraînement et post-entraînement, pour les groupes Test (n = 11) et Contrôle (n = 10).

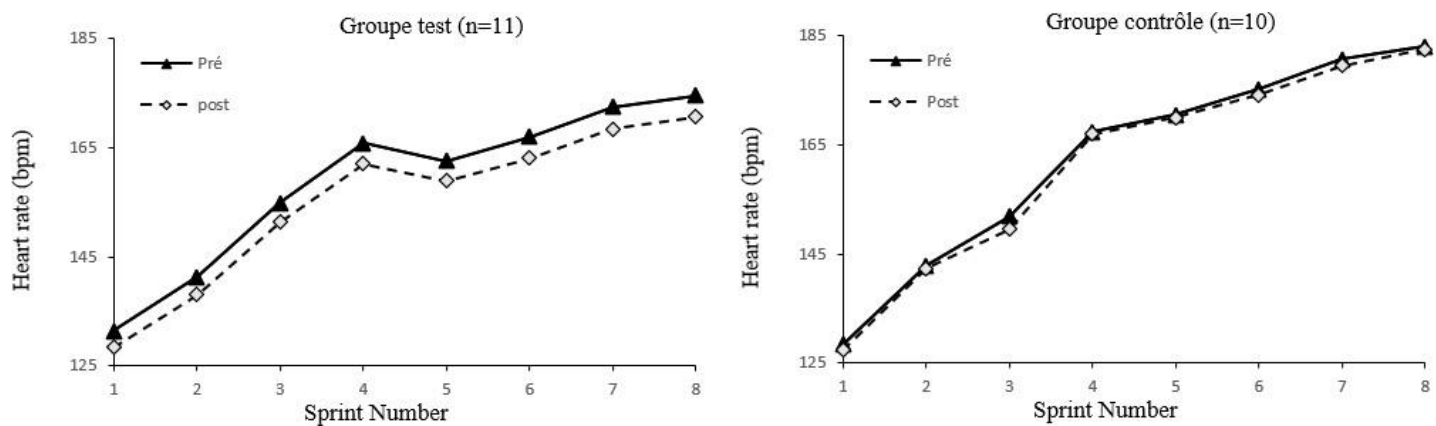


Figure 4 : Évolution de la fréquence cardiaque moyenne pendant le test de Repeated Sprint en fonction du groupe. Une baisse significative de la fréquence cardiaque a été observée entre le groupe test ($p < 0.01$), avec une taille d'effet faible (d de Cohen = 0.201), ce qui peut indiquer une amélioration de la condition cardiovasculaire après l'entraînement.

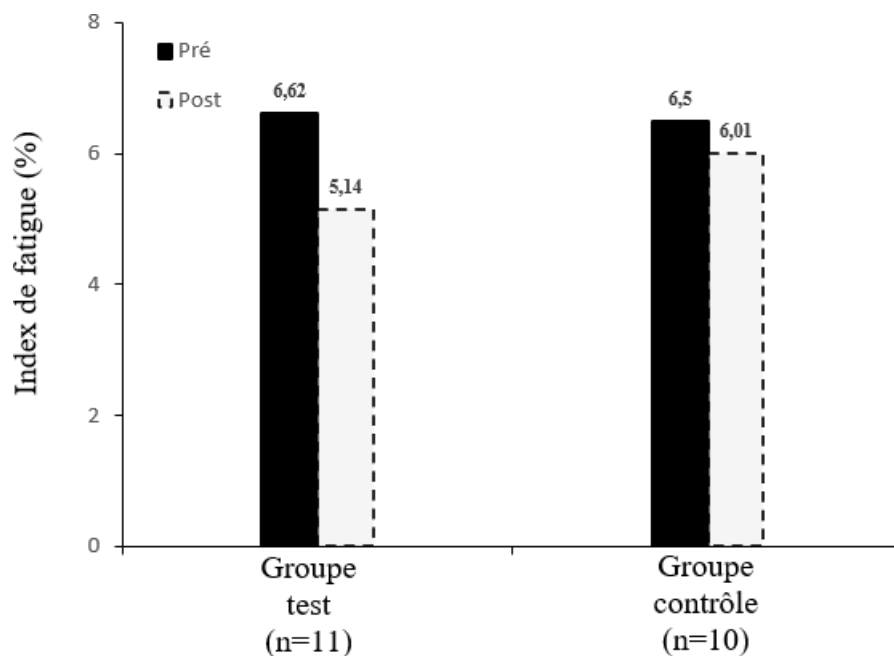


Figure 5 : Indice de fatigue mesuré pendant le test de Repeated Sprint, comparé entre les groupes Test et Contrôle. Dans le groupe Test, une diminution significative de l'indice de fatigue a été observée après l'entraînement ($p < 0.01$), avec une taille d'effet modérée (d de Cohen = -0.425), pouvant traduire une meilleure résistance à la fatigue.

2.5 - Discussion

2.5.a Interprétation des résultats

Cette étude met en évidence des résultats intéressants et significatifs. Dans un premier temps, les observations concernant l'indice de fatigue (Figure 5) s'avèrent particulièrement pertinentes. En effet, comme prédit dans notre hypothèse de recherche, cette variable a constitué un élément central dans la comparaison des résultats du test de sprints répétés (8 x 25 m à Vmax, avec une récupération de 30 secondes). Les résultats ont montré qu'après une période d'entraînement de 7 semaines, le groupe (n=11) ayant suivi un protocole favorisant l'hypercapnie (réduction du volume pulmonaire, apnée expiratoire, apnée inspiratoire, etc.) à raison de 3 séances par semaine a entraîné une diminution significative de son indice de fatigue $[(\text{temps du dernier 25 m} - \text{temps du premier 25 m}) / \text{temps du dernier 25 m} * 100]$, avec une différence statistiquement significative ($p < 0.01$) et un effet (d de Cohen) de -0.425. En conséquence, l'indice moyen de fatigue du groupe est passé de 6,62 % à 5,14 %. Ces résultats indiquent que les nageurs ayant suivi ce protocole étaient en mesure de répéter des sprints à vitesse maximale tout en subissant une fatigue moindre par rapport à leur état initial. Ce résultat est d'autant plus intéressant qu'il suggère une optimisation des capacités de récupération entre les sprints, potentiellement liée à une meilleure tolérance à l'accumulation de CO₂ et une amélioration de l'efficacité des processus métaboliques sous contrainte hypoxique.

Cependant, la diminution de l'indice de fatigue observée chez le groupe contrôle (n=10), ne montre aucune différence significative au test statistiques post-hoc et ANOVA. On peut stipuler que la faible amélioration (6,5% à 6,01%) résulte principalement de l'entraînement général suivi par l'ensemble des participants. En effet, il convient de souligner que le groupe complet (n=21) a participé à un stage intensif à Malaga à l'issue de la quatrième semaine d'entraînement, entraînant une augmentation du volume de travail, passant d'une séance quotidienne à deux séances par jour. Cette augmentation de la charge d'entraînement a nécessairement induit des adaptations physiologiques, influençant directement la performance et l'évolution de l'indice de fatigue.

Par ailleurs, un autre facteur potentiel pourrait contribuer à cette évolution : la familiarisation avec le protocole du Repeating Sprint Test (RST). En effet, la connaissance préalable du test peut induire, de manière consciente ou inconsciente, une stratégie de préservation de l'effort lors du premier test, influençant ainsi les performances enregistrées lors de la seconde évaluation.

Deuxièmement, comme le prévoit notre hypothèse, nous observons une diminution nette des temps de passage à chaque 25 m soit une augmentation de la vitesse moyenne (voir figure 3) pour le groupe expérimental (n=11). En effet, l'échantillon ayant suivi l'entraînement en hypercapnie présente des temps inférieurs lors du second test du Repeating Sprint Test (RST) et des vitesses de nage supérieures. Cette différence est également constatée dans le groupe contrôle (n=10). Toutefois, l'écart entre les deux tests est plus marqué pour le groupe expérimental ($p < 0.01$ et d de Cohen = -0.17), ce qui suggère que l'entraînement en hypercapnie pourrait avoir un effet plus prononcé sur la réduction des temps de sprint répétés. Comme mentionné précédemment, les raisons expliquant cette amélioration sont multiples et sont liées à la nature du protocole d'entraînement et aux adaptations physiologiques induites par l'hypercapnie.

Les temps enregistrés pendant les sprints contribuent directement à la logique de l'indice de fatigue. En effet, une réduction des temps de passage lors des sprints répétés peut être interprétée comme un indicateur de l'amélioration de la capacité à maintenir une haute intensité d'effort tout en minimisant la fatigue, ce qui est en lien direct avec l'indice de fatigue calculé dans cette étude.

De plus, une autre observation importante concerne la vitesse de départ, qui est plus élevée lors du premier sprint du second test pour les deux groupes, comparativement au premier test initial. Cela s'explique par l'effet cumulatif de l'entraînement réalisé au cours des 7 dernières semaines. Bien que le groupe contrôle montre une amélioration de la vitesse moyenne ($p < 0.05$, d de Cohen = 0.06), il semble être ralenti par la décroissance de cette vitesse au fur et à mesure de l'effort. En revanche, le groupe expérimental maintient une meilleure constance dans sa vitesse tout au long des sprints, ce qui justifie en partie l'écart observé. Ce maintien de la vitesse dans le groupe ayant suivi l'entraînement en hypercapnie peut être interprété comme une meilleure adaptation à la fatigue, soutenue par une tolérance accrue à l'accumulation de CO_2 , et probablement une optimisation des mécanismes de récupération pendant les phases de repos en concordance avec l'étude de Bangsbo et al en 2000.

Les résultats obtenus dans cette étude incluent une analyse approfondie des paramètres techniques de nage. En effet, certains aspects gestuels ont été relevés au cours des tests, notamment la fréquence de nage (exprimée en cycles par minute) et l'amplitude de nage (exprimée en mètres par cycle). Il convient de rappeler que, lors des essais sur 25 mètres, les phases de coulée excédant 5 mètres étaient interdites, garantissant ainsi une homogénéité des conditions expérimentales. Ces paramètres ont permis d'évaluer l'indice de nage des participants à chaque segment de 25 mètres.

L'hypothèse formulée postulait que, lors du second test, le groupe expérimental (n = 11), ayant suivi un entraînement en conditions d'hypercapnie, présenterait une altération moindre de la technique de nage, se traduisant par une préservation accrue de l'indice de nage au fil des répétitions.

Les résultats, présentés en figure 3, confirment cette hypothèse. En effet, l'analyse statistique révèle une différence significative ($P < 0.01$, d de Cohen modéré : 0.29) entre les performances mesurées avant et après la période d'entraînement, exclusivement pour le groupe ayant été soumis à l'hypercapnie. Ces données indiquent une tendance favorable, suggérant une amélioration de l'indice de nage par 25 mètres après la période d'entraînement.

Cette amélioration témoigne d'une meilleure conservation des ressources physiologiques chez les nageurs entraînés en hypercapnie, leur permettant de limiter la dégradation des paramètres techniques de nage comme en témoigne la pente de courbe plus faible (figure 3). Ces résultats suggèrent ainsi que l'entraînement sous hypercapnie pourrait constituer une stratégie efficace pour optimiser l'endurance technique en natation.

L'analyse des paramètres techniques, notamment la vitesse et l'index de fatigue, nous conduit à examiner un dernier paramètre physiologique clé : la fréquence cardiaque (FC). Cette variable constitue une mesure essentielle dans l'évaluation de l'économie de course et de l'adaptation physiologique à l'entraînement.

D'après nos données (Figure 4 et tableau 4 et 5), nous observons une légère diminution de la fréquence cardiaque moyenne sur les 25 mètres. Plus précisément, les nageurs ayant suivi un entraînement en hypercapnie présentent une baisse moyenne de 3 battements par minute (BPM). L'analyse statistique indique une différence significative ($P < 0.01$), suggérant que l'entraînement en hypercapnie a un léger effet (d de Cohen : 0.2) sur la performance cardiaque lors du RST.

Ce résultat peut s'expliquer par plusieurs facteurs physiologiques. Tout d'abord, la fréquence cardiaque est régulée par un équilibre complexe entre l'activité du système nerveux autonome (tonus sympathique et parasympathique) et l'adaptation cardiovasculaire à l'effort. Une diminution de la FC à intensité égale pourrait traduire une meilleure efficacité du système cardiovasculaire, notamment par une augmentation du volume d'éjection systolique et une réduction de la sollicitation cardiaque. Cependant, dans notre étude, bien que les vitesses de nage aient augmenté, la fréquence cardiaque est restée stable voir diminué, ce qui suggère une meilleure adaptation périphérique (musculaire et métabolique) plutôt qu'une amélioration centrale (cardiaque).

En d'autres termes, malgré une intensité de course plus élevée, le maintien d'une fréquence cardiaque constante pourrait indiquer une amélioration de l'économie de course. Le nageur serait capable de soutenir un effort plus intense sans augmentation proportionnelle de la charge cardiaque. Toutefois, bien qu'en présence de statistique significatives, il convient de rester prudent quant à l'interprétation de cette tendance.

D'autres indicateurs, tels que la consommation d'oxygène (VO_2), la lactatémie ou la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC), pourraient être explorés pour affiner cette analyse et mieux comprendre les effets physiologiques de l'entraînement en hypercapnie. Une étude complémentaire avec un échantillon plus large et une méthodologie plus fine (par exemple, analyse spectrale de la VFC) permettrait de mieux cerner l'impact réel de ce type d'entraînement sur l'adaptation cardiovasculaire et la performance en natation.

2.5.b Mise en évidence des tendances générales et des points clés à retenir Confrontation avec la littérature existante

L'objectif de cette section est d'évaluer dans quelle mesure nos résultats sont en accord ou en contradiction avec les études existantes sur l'entraînement en conditions hypercapniques et son impact sur la performance en sprint répété.

Réduction de l'indice de fatigue et tolérance accrue à l'effort :

Nos résultats montrent une diminution significative de l'indice de fatigue après un entraînement en hypercapnie, ce qui est en accord avec plusieurs études sur l'entraînement en conditions hypoxiques et hypercapniques. Bangsbo et al. (2006) ont démontré que des exercices répétés en condition d'hypoxie entraînent une amélioration de la tolérance à la fatigue grâce à une adaptation métabolique accrue, notamment par une meilleure capacité tampon musculaire et une augmentation de la glycolyse anaérobie. Billaut et al. (2010) ont montré que l'exposition à des niveaux accrus de CO_2 améliore la capacité à maintenir des efforts répétés de haute intensité, probablement en raison d'une adaptation du système tampon bicarbonate et d'une meilleure régulation de l'acidité musculaire.

Alignement avec notre étude : Nos résultats confirment que l'entraînement en hypercapnie favorise une meilleure tolérance à l'effort et une gestion optimisée de la fatigue, en accord avec ces recherches.

Amélioration de la performance en sprint répété et gestion de la fatigue :

La diminution du temps de sprint et le maintien d'une vitesse plus élevée après un entraînement en hypercapnie s'inscrivent dans la continuité des recherches sur l'exposition à l'hypoxie intermittente. Faiss et al. (2013) ont montré que l'entraînement en hypoxie permet d'améliorer la capacité à maintenir une vitesse élevée en sprint répété, en raison d'une augmentation de la réutilisation du phosphate de créatine et d'une meilleure oxygénation musculaire. Girard et al. (2017) ont observé que l'exposition à l'hypercapnie entraîne une augmentation de la ventilation volontaire maximale, ce qui pourrait expliquer une meilleure récupération entre les sprints et donc un maintien plus constant de la performance.

De Smet et al. (2016) suggèrent que l'amélioration de la performance en sprint sous hypoxie/hypercapnie est également liée à une optimisation du recrutement des fibres musculaires de type II, favorisant une meilleure production de puissance.

Alignement avec notre étude : L'augmentation plus marquée de la vitesse moyenne dans le groupe expérimental pourrait être expliquée par ces adaptations physiologiques, en accord avec la littérature.

Préservation des paramètres techniques et économie de nage :

Nos résultats montrent que l'indice de nage s'altère moins dans le groupe expérimental, suggérant une meilleure préservation de la technique malgré l'accumulation de fatigue. Woorons et al. (2016) ont montré que l'apnée répétée pendant l'effort favorise une meilleure coordination intermusculaire, limitant ainsi la dégradation des paramètres techniques en fin de course.

Alignement avec notre étude : L'amélioration significative de l'indice de nage corrobore ces résultats, suggérant que l'hypercapnie pourrait être un outil efficace pour préserver la technique de nage en conditions de fatigue.

2.5.c Limites de l'étude

Les différences observées dans nos résultats peuvent être expliquées par plusieurs facteurs méthodologiques. Tout d'abord, la durée et l'intensité de l'entraînement dans notre étude étaient plus courtes que dans celles qui ont rapporté des adaptations cardiorespiratoires plus marquées, ces dernières ayant utilisé des protocoles d'entraînement de 12 semaines contre 7 semaines dans notre étude. De plus, la nature des tests physiologiques utilisés peut jouer un rôle important. Nos résultats sont basés sur des mesures de la fréquence cardiaque moyenne, tandis que d'autres études ont utilisé des marqueurs plus précis, comme la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) ou le volume d'éjection systolique, qui permettent d'évaluer de manière plus détaillée les adaptations cardiorespiratoires.

Bien que nos résultats confirment largement les observations précédentes sur l'impact de l'hypercapnie sur la tolérance à la fatigue, la performance en sprint répété et la préservation de la technique de nage. De plus, il est important de noter que les limitations de notre étude, notamment la prise de mesures de la fréquence cardiaque sur 10 secondes par les nageurs eux-mêmes en raison de l'absence de matériel spécialisé, ont pu affecter la précision des données obtenues.

Dans le cadre de notre protocole, il était prévu d'analyser la lactatémie des nageurs pour enrichir nos données physiologiques. J'avais donc formulé une demande auprès du laboratoire Euraspport, en sollicitant simplement le prêt d'un lecteur de lactate Pro 2. Bien que j'aie exprimé ma disponibilité pour acheter les bandelettes nécessaires à l'analyse, ma demande a néanmoins été refusée. Ce refus constitue une limitation importante de notre étude, car il m'a empêché d'obtenir une donnée plus pertinente, telle que la lactatémie. Il aurait en effet été intéressant d'examiner si l'entraînement en hypercapnie pouvait influencer la lactatémie des nageurs et ainsi d'établir une corrélation avec les résultats des études antérieures. Cette absence de mesure de lactatémie représente donc un facteur limitant dans l'interprétation complète des résultats.

D'autres limites subsistent dans notre étude. En particulier, il aurait été pertinent d'examiner directement les échanges gazeux des nageurs lors des tests, notamment en mesurant les valeurs de VO₂ (consommation d'oxygène) et de CO₂ (production de dioxyde de carbone). Pour ce faire, un appareil de mesure des échanges gazeux, tel qu'un analyseur de gaz portatif ou un système de calorimétrie indirecte, aurait été nécessaire. Ces appareils permettent de mesurer précisément la quantité d'oxygène consommée et de CO₂ expiré pendant l'effort, fournissant ainsi des informations détaillées sur la capacité aérobie, l'efficacité énergétique et la réponse métabolique des nageurs pendant l'entraînement en hypercapnie.

L'intégration de ces mesures aurait non seulement permis de mieux comprendre l'impact de l'entraînement en hypercapnie sur les capacités respiratoires et cardiorespiratoires des nageurs, mais également de compléter les données physiologiques en fournissant un aperçu des mécanismes métaboliques sous-jacents. Cela aurait offert une analyse plus complète des adaptations physiologiques, en particulier en termes d'efficacité du transport et de l'utilisation de l'oxygène pendant l'exercice, ce qui est crucial pour évaluer la performance sportive de manière plus globale.

2.6 - Conclusion

L'objectif de ce mémoire était d'examiner les effets d'un entraînement en conditions d'hypercapnie sur la capacité des nageurs à répéter des sprints en natation. Les résultats obtenus ont montré que l'entraînement sous hypercapnie a induit des améliorations significatives sur plusieurs paramètres de performance, notamment l'indice de fatigue, les temps de passage lors des sprints répétés et la préservation de la technique de nage au fil des répétitions.

Le groupe expérimental, ayant suivi un programme d'entraînement en hypercapnie, a présenté une réduction marquée de l'indice de fatigue et une meilleure constance dans ses performances tout au long des sprints, par rapport au groupe contrôle. Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle l'entraînement en hypercapnie améliore la capacité des nageurs à maintenir une haute intensité d'effort tout en limitant la fatigue, ce qui est crucial lors des efforts répétés dans des conditions de récupération limitée.

Cependant, des améliorations ont également été observées dans le groupe contrôle, bien que ces évolutions soient attribuées à l'effet global de l'entraînement et à l'augmentation de la charge d'entraînement après la quatrième semaine. Cette amélioration, n'est pas directement liée à l'hypercapnie, ce qui souligne l'importance de prendre en compte l'effet des autres facteurs de l'entraînement sur la performance.

L'entraînement en hypercapnie semble également avoir favorisé une réduction de l'altération des performances au fur et à mesure des répétitions. Ces résultats suggèrent que l'hypercapnie pourrait être une stratégie efficace pour optimiser l'endurance technique, essentielle à la performance en natation.

En conclusion, bien que cette étude montre des résultats prometteurs en matière d'entraînement en hypercapnie, il est nécessaire de poursuivre les recherches pour confirmer et approfondir ces résultats, et d'explorer les mécanismes physiologiques sous-jacents à ces adaptations. Les pratiques d'entraînement basées sur l'hypercapnie pourraient potentiellement devenir un outil précieux pour améliorer la performance des nageurs de haut niveau.

Bibliographie

- Almanza-Hurtado, A., Guerra, C. P., Martínez-Ávila, M. C., Borré-Naranjo, D., Rodríguez-Yanez, T., & Dueñas-Castell, C. (2022). Hypercapnia from Physiology to Practice. *International Journal Of Clinical Practice*, 2022, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2022/2635616>
- Andric, M. (s.d.). Entraînement en hypoventilation. Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV). (2014). https://www.chuv.ch/fileadmin/sites/cms/documents/CMS/Andric_Milorad_Entrainement_en_hypoventilation.pdf
- Apnée du sportif : des contraintes physiologiques et environnementales complexes – La médecine du sport.* (s. d.). <https://www.lamedecinedusport.com/sports/apnee-du-sportif-des-contraintes-physiologiques-environnementales-complexes>
- Bangsbo, J., Mohr, M., & Krstrup, P. (2006). « Physical and metabolic demands of training and match-play in the elite football player. » *Journal of Sports Sciences*, 24(7), 665-674. https://www.researchgate.net/publication/7015993_Bangsbo_J_Mohr_M_Krstrup_P_Physical_and_metabolic_demands_of_training_and_match-play_in_the_elite_football_player_J_Sports_Sci247665-74.
- Bourgeois, H., Paradis, P., & Billaut, F. (2024). High-intensity interval training with blood-flow restriction enhances sprint and maximal aerobic power in male endurance athletes. *Applied Physiology Nutrition And Metabolism*. <https://doi.org/10.1139/apnm-2024-0378>
- De Smet, S., Van Thienen, R., Deldicque, L., James, R., Sale, C., Bishop, D. J., & Hespel, P. (2016). Nitrate Intake Promotes Shift in Muscle Fiber Type Composition during Sprint Interval Training in Hypoxia. *Frontiers In Physiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00233>
- Faiss, R., Léger, B., Vesin, J., Fournier, P., Eggel, Y., Dériaz, O., & Millet, G. P. (2013). Significant Molecular and Systemic Adaptations after Repeated Sprint Training in Hypoxia. *PLoS ONE*, 8(2), e56522. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056522>

- Faiss, R., Raberin, A., Brocherie, F., & Millet, G. P. (2024). Repeated-sprint training in hypoxia : A review with 10 years of perspective. *Journal Of Sports Sciences*, 1-15. <https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2416821>
- Fernandez-Marcos, P. J., & Auwerx, J. (2011a). Regulation of PGC-1 α , a nodal regulator of mitochondrial biogenesis. *American Journal Of Clinical Nutrition*, 93(4), 884S-890S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.110.001917>
- Fernandez-Marcos, P. J., & Auwerx, J. (2011b). Regulation of PGC-1 α , a nodal regulator of mitochondrial biogenesis. *American Journal Of Clinical Nutrition*, 93(4), 884S-890S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.110.001917>
- Fornasier-Santos, C., Millet, G. P., & Woorons, X. (2018). Repeated-sprint training in hypoxia induced by voluntary hypoventilation improves running repeated-sprint ability in rugby players. *European Journal Of Sport Science*, 18(4), 504-512. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1431312>
- Goldring, R. M., & Turino, G. M. (1976). Assessment of Respiratory regulation in chronic hypercapnia. *CHEST Journal*, 70(1), 186-191. <https://doi.org/10.1378/chest.70.1.186>
- Guimard, A. (2017). Étude des effets de la pratique de l'apnée pendant l'effort en laboratoire et sur le terrain : Application en natation (Thèse de doctorat, Université d'Orléans). École doctorale Santé, Sciences Biologiques et Chimie du Vivant. (2006). <https://theses.fr/2017ORLE2066>
- Hardie, D. G. (2011). Sensing of energy and nutrients by AMP-activated protein kinase. *American Journal Of Clinical Nutrition*, 93(4), 891S-896S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.110.001925>
- Hypercapnie et insuffisance respiratoire aiguë en réanimation.* (s. d.). SRLF. <https://www.srlf.org/article-revue/hypercapnie-insuffisance-respiratoire-aigue-reanimation>
- Jørgensen, S. B., Trebak, J. T., Viollet, B., Schjerling, P., Vaulont, S., Wojtaszewski, J. F. P., & Richter, E. A. (2006). Role of AMPK α 2 in basal, training-, and AICAR-induced GLUT4, hexokinase II, and mitochondrial protein expression in mouse muscle. *AJP Endocrinology And Metabolism*, 292(1), E331-E339. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00243.2006>

- Karaula, D. (2014). The effects of hypercapnic-hypoxic training program on hemoglobin concentration and maximum oxygen uptake of elite swimmers. *Kinesiology*, 46(Suppl.1), 40-45. (2014). https://www.researchgate.net/publication/266736536_The_effects_of_hypercapnic-hypoxic_training_program_on_hemoglobin_concentration_and_maximum_oxygen_uptake_of_elite_swimmers
- Montgomery, M. K., Osborne, B., Brown, S. H., Small, L., Mitchell, T. W., Cooney, G. J., & Turner, N. (2013). Contrasting metabolic effects of medium- versus long-chain fatty acids in skeletal muscle. *Journal Of Lipid Research*, 54(12), 3322-3333. <https://doi.org/10.1194/jlr.m040451>
- Pyne, D. B., Trewin, C. B., & Hopkins, W. G. (2004). Progression and variability of competitive performance of Olympic swimmers. *Journal Of Sports Sciences*, 22(7), 613-620. <https://doi.org/10.1080/02640410310001655822>
- Rosa, C. H., Monteiro, C. P., Barata, C., Espada, M. C., Valamatos, M. J., Bento, A., Minhalma, R. J., & Reis, J. F. (2024). Cardiorespiratory and muscle oxygenation responses to voluntary hypoventilation at low lung volume in upper body repeated sprints. *European Journal Of Applied Physiology*, 124(12), 3741-3754. <https://doi.org/10.1007/s00421-024-05569-1>
- Smith, K. J., & Billaut, F. (2010). Influence of cerebral and muscle oxygenation on repeated-sprint ability. *European Journal Of Applied Physiology*, 109(5), 989-999. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1444-4>
- Spielmann, G., Agha, N., Kunz, H., Simpson, R. J., Crucian, B., Mehta, S., Laughlin, M., & Campbell, J. (2018). B cell homeostasis is maintained during long-duration spaceflight. *Journal Of Applied Physiology*, 126(2), 469-476. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00789.2018>
- Swain, D. P. (2000). Energy Cost Calculations for Exercise Prescription. *Sports Medicine*, 30(1), 17-22. <https://doi.org/10.2165/00007256-200030010-00002>
- Thomas-Junius, C. (2014, 16 juin). (2014). Dans *Lutter Contre L'apparition de L'acidose Musculaire À L'exercice Aérobie. Conseil Départemental du Val-de-Marne*. <https://www.valdemarne.fr/newsletters/sport-sante-et-preparation-physique/lutter-contre-lapparition-de-lacidose-musculaire-a-lexercice-aerobie>

- Viollet, B. (2019, 6 novembre). *The Energy Sensor AMPK : Adaptations to Exercise, Nutritional and Hormonal Signals*. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/1911.02345>
- Woorons, X., Bourdillon, N., Vandewalle, H., Lamberto, C., Mollard, P., Richalet, J., & Pichon, A. (2010). Exercise with hypoventilation induces lower muscle oxygenation and higher blood lactate concentration : role of hypoxia and hypercapnia. *European Journal Of Applied Physiology*, *110*(2), 367-377. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1512-9>
- Woorons, X. (2016). L'entraînement en hypoventilation, repoussez vos limites ! Hypoventilation Training. (2016).

Résumé de l'étude :

Cette étude explore les effets d'un entraînement en hypercapnie sur la performance des nageurs, en particulier sur leur capacité à répéter des sprints en natation. L'entraînement en hypercapnie, caractérisé par une augmentation du CO₂ dans le sang, vise à améliorer la tolérance à l'effort intense et la gestion de la fatigue. L'étude a impliqué 21 nageurs, répartis en deux groupes : un groupe expérimental (n=11) soumis à un entraînement en hypercapnie et un groupe contrôle (n=10) suivant un programme similaire sans l'exposition à l'hypercapnie. L'impact de l'entraînement a été mesuré par un test de sprints répétés (8x25m à Vmax avec 30 secondes de récupération) réalisé avant et après sept semaines d'entraînement. Les résultats ont montré que le groupe expérimental a significativement réduit son indice de fatigue, amélioré sa constance de performance et préservé ses paramètres techniques de nage (amplitude et fréquence) comparé au groupe contrôle. Ces résultats suggèrent que l'entraînement en hypercapnie pourrait améliorer la performance en natation en optimisant la récupération entre sprints et en limitant la dégradation technique.

Mots-clés :

Natation, hypercapnie, hypoxie, VHL, sprints répétés, récupération, fatigue, entraînement, indices de fatigue, performance anaérobie, tolérance à l'hypoxie, système respiratoire, capacité pulmonaire, lactatémie, effort intense, endurance à l'effort, adaptation physiologique.