

Optimisation de la performance et de la récupération des athlètes de haut-niveau engagés dans la répétition d'exercices à haute-intensité : exemple du 400m

Optimizing the performance and recovery of high-level athletes engaged in repeated high-intensity exercise : 400m example

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n° 566 sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain (SSMMH)

Spécialité de doctorat : Science du sport et du mouvement humain

Graduate School : Sport, Mouvement, et Facteurs Humains

Référent : Université d'Évry Val d'Essonne

Thèse préparée dans l'unité de recherche **Laboratoire de biologie de l'exercice pour la performance et la santé** (Université Paris-Saclay, Univ Evry), sous la direction de

Claire THOMAS-JUNIUS, Professeure des universités,

la co-direction de **Damien LEGER**, Professeur des universités,

le co-encadrement de **Philippe LOPES**, *Maître de conférence*

et de **Christine HANON**, *Chercheuse, HDR*

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 10 février 2025, par

François CHIRON

Composition du Jury

Membres du jury avec voix délibérative

Alexandra MALGOYRE

Professeure agrégée du Val de Grâce

Présidente

Laurent BOSQUET

Professeur des universités, Université de Poitiers

Rapporteur

Grégoire MILLET

Professeur des universités, Université de Lausanne

Rapporteur

Mounir CHENNAOUI

Directeur de recherche, Institut de Recherche Biomédicale des Armées

Examineur

OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE ET DE LA RÉCUPÉRATION DES ATHLÈTES DE HAUT-NIVEAU ENGAGÉS DANS LA RÉITÉRATION D'EXERCICES À HAUTE-INTENSITÉ : EXEMPLE DU 400 MÈTRES

Mots clés : Exercices à haute-intensité, stress psychophysiologique, variabilité de la fréquence cardiaque, marqueurs salivaires, sommeil, équilibre acido-basique

Les athlètes de haut-niveau français, spécialistes des sprints longs en athlétisme, rencontrent des difficultés à maintenir des performances optimales lors des compétitions internationales. Dans ce contexte, l'objectif général de ce travail de thèse a été, à travers une approche holistique, de chercher à optimiser la réitération d'exercices de haute-intensité et d'améliorer la récupération des athlètes lors des compétitions internationales. Pour ce faire, deux axes relatifs au stress ont été explorés : tout d'abord, nous avons analysé l'impact du stress psychophysiologique en compétition sur la régulation du système nerveux autonome et du système nerveux neuro-endocrinien, ainsi que l'évaluation de stratégies innovantes de gestion du stress telles que la cohérence cardiaque pour améliorer la régulation neuroendocrinienne et la qualité du sommeil des athlètes au cours des compétitions. Par ailleurs, au cours des exercices de haut-intensité, la production énergétique entraîne d'importantes perturbations métaboliques, telles qu'une acidose métabolique marquée (avec un pH sanguin inférieur à 7, relevé à l'issue des épreuves de 400 m), pouvant constituer un frein à la performance. Pour y remédier, nous avons appréhendé un second axe de recherche sur la régulation de l'équilibre acido-basique au cours de l'exercice et la récupération, à travers la mise en place de stratégies nutritionnelles et hydriques, incluant une alimentation spécifique et une hydratation à base d'eau riche en bicarbonates.

Les premières études ont révélé des perturbations psychophysiologiques liées au stress compétitif, avec une diminution significative de l'activité du système parasympathique et une augmentation des biomarqueurs salivaires du stress (cortisol et alpha-amylase). Ces perturbations, observées lors des phases qualificatives et en finales, sont corrélées à une anxiété accrue associée à une capacité de récupération réduite des athlètes (études n°1 et n°2). Une variabilité interindividuelle a été constatée, certains athlètes se montrant particulièrement sensibles au stress compétitif, ce qui souligne l'importance d'approches individualisées pour mieux gérer ces réponses. Par ailleurs, l'introduction de la cohérence cardiaque comme méthode de gestion du stress a permis d'améliorer la régulation du système nerveux autonome, de réduire l'inflammation (IL1- β) et de favoriser une meilleure qualité du sommeil, essentielle pour récupérer entre les épreuves. Les athlètes pratiquant cette technique ont montré une meilleure régulation hormonale et inflammatoire, même si aucun impact direct sur les performances en compétition n'a été observé (étude n°3). Puis, les études suivantes de ce travail de thèse, relatives à la régulation du stress métabolique, ont démontré que la consommation d'eau riche en bicarbonates, associée à un régime alimentaire alcalinisant (à la différence d'un régime acidifiant), augmente significativement le pH sanguin et urinaire des athlètes, améliore la clairance du lactate après des exercices répétés et optimise la capacité tampon (études n°4 et n°5). Ces ajustements métaboliques ont permis aux athlètes de maintenir ou d'améliorer leurs performances, notamment lors du troisième jour de compétition à haute-intensité (études n°5).

En conclusion, les résultats de ce travail de thèse soulignent l'importance d'intégrer des stratégies combinant la gestion du stress précompétitif, notamment à travers la pratique de la cohérence cardiaque, ainsi que d'avoir une approche nutritionnelle et hydrique adaptée au moment des compétitions internationales. Ces stratégies favorisent en effet une meilleure régulation du système nerveux autonome et du système nerveux neuro-endocrinien, améliorent la qualité du sommeil, et contribuent à une gestion optimisée de l'acidose métabolique induite au cours de la compétition afin d'améliorer à la fois les performances et la récupération des athlètes de haut niveau.

OPTIMIZING THE PERFORMANCE AND RECOVERY OF HIGH-LEVEL ATHLETES ENGAGED IN REPEATED HIGH-INTENSITY EXERCISE : 400 METRES EXAMPLE

Keywords: High-intensity exercises, psychophysiological stress, heart rate variability, salivary markers, sleep, acid-base balance

French elite athletes specializing in long sprints in track and field face challenges in maintaining optimal performance during international competitions. In this context, the overarching goal of this doctoral research was to adopt a holistic approach to optimize the repetition of high-intensity exercises and enhance athlete recovery during international events. To achieve this, two aspects related to stress were explored: first, the study examined the impact of psychophysiological stress during competition on the regulation of the autonomic and neuroendocrine nervous systems, as well as the evaluation of innovative stress management strategies such as cardiac coherence to improve neuroendocrine regulation and sleep quality during competitions.

Additionally, during high-intensity exercises, energy production induces significant metabolic disruptions, such as marked metabolic acidosis (with blood pH below 7 observed after 400 m events), which may hinder performance. To address this, nutritional and hydration strategies, including specific diets and hydration with bicarbonate-rich water, were tested to better regulate metabolic stress.

Initial studies revealed psychophysiological disruptions related to competitive stress, with a significant decrease in parasympathetic activity and increased salivary stress biomarkers (cortisol and alpha-amylase). These disruptions, observed during both qualifying phases and finals, correlated with heightened anxiety and reduced recovery capacity (Studies 1 and 2). Interindividual variability highlighted some athletes' heightened sensitivity to competitive stress, emphasizing the need for individualized approaches to better manage these responses.

The introduction of coherent breathing as a stress management technique improved autonomic nervous system regulation, reduced inflammation (IL-1 β), and enhanced sleep quality, essential for recovery between events. Athletes practicing this technique demonstrated improved hormonal and inflammatory regulation, although no direct impact on competition performance was observed (Study 3).

Subsequent studies addressing metabolic stress regulation demonstrated that consuming bicarbonate-rich water combined with an alkalizing diet (as opposed to an acidifying diet) significantly increased blood and urinary pH, improved lactate clearance after repeated exercises, and optimized buffering capacity (Studies 4 and 5). These metabolic adjustments enabled athletes to maintain or improve performance, particularly on the third day of high-intensity competition (Studies 5).

In conclusion, this research highlights the importance of integrating strategies that combine pre-competitive stress management, particularly through coherent breathing, with tailored nutritional and hydration approaches during international competitions. These strategies promote better regulation of the autonomic and neuroendocrine nervous systems, enhance sleep quality, and help manage competition-induced metabolic acidosis. Together, these approaches can improve both performance and recovery for high-level athletes in demanding competitive contexts.

Un point de vue ne sera toujours que la vue d'un point...

Ce travail de recherche, de nature holistique, avait pour objectif de multiplier les points de vue afin de mieux appréhender la complexité du système dans lequel évoluent les sportifs de haut-niveau. Ce type d'approche systémique privilégie l'émergence de profils généralistes au détriment de spécialistes. Néanmoins il favorise le développement de compétences transversales essentielles pour répondre aux exigences du sport de haut-niveau.

REMERCIEMENTS

"La gratitude est la mémoire du cœur." – *Jean-Baptiste Massillon*

Ce travail est le reflet d'un effort collaboratif, mais également de mains tendues par des personnes sans qui ce projet n'aurait pu aboutir. Les quelques lignes qui suivent ne suffiront jamais à expliciter la gratitude que j'éprouve à l'égard de chacune et chacun des personnes qui m'ont soutenu au cours de ces dernières années.

Tout d'abord, je tiens sincèrement à remercier **M. Bosquet, M. Millet, Mme Malgoyre et M. Chennaoui**. Bien plus qu'une simple formule de politesse, je vous suis reconnaissant d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Au début de ce projet, je n'aurais pu croire qu'un jury de cette qualité viendrait examiner le fruit de cet effort collaboratif. Il me tarde de pouvoir échanger avec vous et bénéficier de votre expertise.

Je tenais à remercier plus spécifiquement **M. Bosquet et M. Millet**, qui ont accepté de rapporter ce manuscrit malgré un délai quelque peu court.

Un merci particulier à **M. Chennaoui**, qui a contribué à poser les premières fondations de ce projet et sans qui nous n'aurions jamais pu l'initier.

Je tiens également à remercier du fond du cœur, et ce n'est pas une expression, les différents membres de mon encadrement. Sans vous, sans votre soutien et sans votre disponibilité, je ne serais jamais allé au bout.

Christine Hanon, un simple et sincère merci pour ce que tu es. Ce projet est également le fruit de tous les efforts que tu as fournis depuis sa conception jusqu'au jour où il a fallu le défendre à la FFA. Merci pour le temps considérable que tu m'as consacré : ces « cinq minutes pas plus » d'appels téléphoniques qui devaient porter sur un sujet précis et se transformaient en une heure pour parler finalement d'un sujet complètement différent. Merci pour ton côté maternel, sans être infantilisant, qui m'a porté durant cette période pas toujours évidente sur le plan personnel. Bref, merci pour cette relation singulière entre encadrant et étudiant.

Claire Thomas-Junius, je ne te serai jamais assez reconnaissant pour tout ce que tu m'as apporté depuis ces six dernières années. Merci de m'avoir pris sous ton aile alors que je n'étais qu'un étudiant en master et de m'avoir fait confiance pour conduire ce beau projet collectif. Mais bien plus encore, merci pour ton sourire contagieux, ton exigence précieuse et ton humour. Merci également de m'avoir toujours fait confiance (même lorsque nos avis divergeaient

parfois), dans les bons comme dans les mauvais moments. Si j'en suis arrivé à présenter ce travail aujourd'hui, c'est en grande partie grâce à tous les efforts que tu as investis durant ces dernières années. Encore une fois, et même si cela ne reflète pas toute la gratitude que je te porte : merci !

Damien Léger, merci de m'avoir fait confiance et de m'avoir accueilli à l'Hôtel-Dieu. Ton aide précieuse pour les phases expérimentales et ton regard d'expert m'ont permis d'aller au bout de ce travail.

Merci, **Philippe Lopes**, de m'avoir initié à l'utilisation de la variabilité de la fréquence cardiaque. Nos nombreux échanges n'ont pas été vains au regard de tout le chemin parcouru, valorisé par un article scientifique.

Outre les membres de mon encadrement, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont largement contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de tout ce travail.

Adrien Taouji, merci de m'avoir fait confiance, de m'avoir pris sous ton aile, de m'avoir formé pour qu'un jour je puisse être considéré comme ton collègue. Je ne serai jamais assez reconnaissant pour tout ce que tu m'as apporté et je compte bien continuer mes missions de stagiaire en te préparant le café ! Vraiment, tu es une personne en or, et je souhaite à chaque étudiant de croiser un jour la route d'un éducateur comme toi. Encore une fois, merci pour ce que tu es.

Mes deux acolytes sans qui rien n'aurait été possible, et en souvenir de ce fabuleux tour de France.

Mégane Erbalng, sache que si je suis là aujourd'hui, c'est en grande partie grâce à toi. Plus qu'une collègue, j'ai trouvé une amie dont le soutien, sur le plan professionnel et personnel, m'a permis de tenir jusqu'au bout !

Bora Gülören, merci pour ton soutien inconditionnel dans les bons comme dans les mauvais moments. Désolé pour ces « promis, c'est la dernière figure que je te demande » et pour mon côté parfois tyrannique. D'un stagiaire, tu es devenu un ami sur qui je peux compter.

Merci également aux différentes institutions et aux personnes qui les composent.

Aux membres de l'**Université d'Évry**, du **LBEPS** : merci à **Tiphaine Mignot**, **Fabienne Perrin**, **Olivier Biondi**, **Yann Gallot**, **Charline Quiclet**, **Federica Bredariol** et **Tom Hobbs**

pour votre bienveillance, votre soutien et votre générosité. Même si j'ai été peu présent ou caché dans l'ombre telle une chauve-souris, sachez que votre soutien a beaucoup compté pour moi.

Merci également à la **FFA** et ses acteurs qui m'ont fait confiance : **Patricia Djate-Taillard**, **Hugo Maciejewski** et **Bertrand Valcin** pour leur confiance. Merci à **Anne Tournier-Lasserve**, **Mme Rochdi** ainsi qu'à **Philippe Leynier** de m'avoir soutenu dans ce projet. Merci aussi à **Claudine Rémond**, **Fanny Bennai** et **Émilie Redon**, qui ont été très présentes au cours de ces dernières années particulièrement difficiles.

Et bien évidemment, merci aux collègues-ami.e.s de la cellule : **Benji**, **Canelle**, **Giuseppe**. Merci pour votre soutien, pour tous ces bons moments passés ensemble durant les compétitions. Merci aussi à ceux qui ont été à la création de cette cellule : **Simon**, **Vincent** et **Jérem**. Ce travail est aussi le fruit de tous les liens que nous avons tissés !

Merci aux ami.e.s du **master SEPHN**, et plus particulièrement à **Maxou**, **Nicolas** et **Coline**, avec qui j'ai fait mes premiers pas dans la cour des grands.

Merci aux différents collègues qui ont œuvré à mes côtés et sans qui l'ensemble des résultats n'aurait jamais vu le jour : **Maxime Elbaz**, **Aurélie Servonnet**, **Mariette Gaudin**, **Christine Le Coz** et **Imad**.

Je tiens également à remercier le **laboratoire SEP** avec lequel j'ai débuté la recherche. Un sincère merci à **Eve Tiollier** de m'avoir accompagné durant toutes ces années et permis d'aboutir à ce projet, finalisé par deux publications et deux présentations en congrès. Merci à **Jean Slawinski** pour m'avoir initié à la recherche, ainsi qu'à tous les chercheurs associés.

Enfin, merci au **groupe ALMA**, en la personne de **Thierry Hanh**, **Agnès Jacquot**, **Clémence Ducouso** et **Gabrielle Chassagne**, de nous avoir accompagnés tout au long de ce projet.

Mais derrière tout ce travail se cachent également des personnes qui m'ont soutenu tout au long de cette aventure...

Merci à ma famille et, notamment, à vous, **Maman et Papa**, de m'avoir toujours soutenu depuis le début et encouragé à faire ce qui me plaisait, sans me soucier des tracasseries du quotidien. Sans vous, rien n'aurait été faisable, alors merci pour les merveilleux parents que vous êtes.

À mes trois sœurs, **Claire**, **Noémie** et **Lucile**, mais également à mon frère d'adoption, **Vivien** : désolé de ne pas avoir été toujours très disponible, mais sachez que l'amour que vous me

portez m'a soutenu durant ces dernières années, qui ont été, comme vous le savez, particulièrement difficiles.

À mes amis, qui sont **la famille que j'ai choisie : Marien, Rémi, Gide, André, Arnaud, Cyril, Félix, Benoît ainsi que toutes celles et ceux que je ne peux citer**. Merci pour ce que vous êtes, car sans vous, je ne serais pas la personne que je suis aujourd'hui !

À l'Assomption, ma famille d'adoption, et plus encore à **Jean-Pierre, Jacques, Sylvain, Alexandre, Augustin, Armel, Nhan et Alexis** : merci pour votre fraternité, qui m'a porté durant ces trois années passées avec vous. Désolé pour l'ouragan qui a franchi un jour les portes de la communauté et merci pour tout ce que vous m'avez apporté ! Je ne vous serai jamais assez reconnaissant.

Au foyer Adveniat et aux frérots que j'ai rencontrés durant ces trois ans, ainsi qu'à la **famille Samanos** : avoir croisé votre route en arrivant à Paris est la meilleure chose qui me soit arrivée.

Merci aux entraîneurs : **Bruno Gajer, Jean-Claude Vollmer, Bastien Perraux, Jean-François Pontier, Sylvain Cesbron, Louis Heyer** et aux collègues de l'INSEP : **Dimitri Démonière, Olivier Vallayes, Marco Vecchio, Ladj Doucouré, Guy Ontanon**.

Merci pour nos nombreux échanges et votre bienveillance, qui m'ont fait grandir personnellement et professionnellement.

Merci **aux athlètes du groupe de l'INSEP** pour votre confiance et tous ces moments passés ensemble, qui m'ont permis de tenir jusqu'au bout.

Aux athlètes que j'ai entraînés ou que j'entraîne encore, ainsi qu'aux membres du staff : **Nicolas, Camille, Quentin, Thomas et Jonathan**, merci pour tout ce que nous faisons ensemble au quotidien et qui me permet de m'épanouir dans ce que j'aime le plus : entraîner.

Aux athlètes et entraîneurs de l'équipe de France : sans vous ce projet n'aurait pu se faire !

Enfin, merci également à tous les enseignants que j'ai rencontrés au cours de mon cursus et qui m'ont toujours accompagné avec bienveillance. Merci à mes instituts de formation, sans qui je ne serais pas là aujourd'hui : **l'école Saint-Paul, le collège Saint-Charles, le lycée Sacré-Cœur, l'IFEPSA, l'Université de Nantes et l'INSEP**.

À mes thérapeutes, **Rachel Makhloufi et Dr Hanna Cohen**, qui m'ont accompagné dans les moments difficiles : un immense merci pour votre soutien précieux.

Et merci à toi, **Simba** ! Merci pour notre altérité qui favorise notre complémentarité !

PUBLICATIONS, COMMUNICATIONS ET ACTIONS D'ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE

Ce travail de recherche a fait l'objet de diverses publications, communications et actions d'accompagnement scientifique a la performance

Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

Publications sur le travail de thèse :

Chiron, F., Bennett, S., Thomas, C., Hanon, C., Léger, D., & Lopes, P. Application of Vagal-Mediated Heart Rate Variability and Subjective Markers to Optimise Training Prescription : An Olympic Athlete Case Report. *International Journal of Disabilities Sports and Health Sciences*, 7(1), 66-76.

Chiron, F., Thomas, C., Bardin, J., Mullie, F., Bennett, S., Chéradame, J., Caliz, L., Hanon, C., & Tiollier, E. (2024). Influence of Ingestion of Bicarbonate-Rich Water Combined with an Alkalizing or Acidizing Diet on Acid-Base Balance and Anaerobic Performance. *Journal of Human Kinetics*, 93.

Chiron, F., Erblang, M., Gulören, B., Bredariol, F., Hamri, I., Leger, D., Hanon, C., Tiollier, E., & Thomas, C. (2024). Exploring the Influence of Acid-Base Status on Athletic Performance during Simulated Three-Day 400 m Race. *Nutrients*, 16(13), 1987.

Chiron, F., Erblang, M., Gulören, B., Poirier, C., Servonnet, A., Gaudin, M., Le Coz, C., Chennaoui, M., Hanon., Léger, D., & Thomas, C. (2025). Racing Under Pressure Part I: How Psychophysiological Stress Impacts Top Elite Athletes?. *Journal of Strength and Conditioning Research*. (under review).

Chiron, F., Gulören, B., Erblang, M., Poirier, C., Elbaz, M., Servonnet, A., Gaudin, M., Le Coz, C., Lopes, L., Chennaoui, M., Hanon., Léger, & Thomas, C. (2025). Racing Under Pressure Part II: How To Regulate Psychophysiological Stress In Highly Trained Athletes?. *Journal of Strength and Conditioning Research* (under review).

Autres publications:

Slawinski, J., **Chiron, F.**, Millot, B., Taouji, A., & Brocherie, F. (2019). Effect of a 16-Day Altitude Training Camp on 3,000-m Steeplechase Running Energetics and Biomechanics: A Case Study. *Frontiers in Sports and Active Living*, 1, 63.

Communications dans des congrès nationaux avec présentation orale

Chiron F, Thomas, C, Hanon C, Tiollier E. Influence d'une eau riche en bicarbonate associée à une alimentation alcalinisante sur la capacité tampon et la performance sur 400 m. Journée Francophone de la Nutrition ; 10 novembre 2021.

Chiron F, Bardin J, Thomas, C, Hanon C, Tiollier E. Influence d'une eau riche en bicarbonate associée à une alimentation alcalinisante ou acidifiante sur la régulation de l'équilibre acido-basique, la performance anaérobie et la composition corporelle. Association Française des Diététiciens Nutritionnistes. 10 septembre 2024

Valorisation des données de la Recherche pour l'Accompagnement Scientifique de la Performance

Parallèlement aux missions réalisées dans le cadre de ce projet de recherche, j'ai eu l'occasion de présenter à plusieurs reprises les résultats de nos recherches, notamment auprès des cadres, des entraîneurs nationaux et des athlètes de la FFA, ainsi que lors de différents colloques. À cet égard, nous avons participé à quatre colloques organisés par la Ligue de l'Île de France d'Athlétisme (LIFA), la Ligue de la Réunion et le Pôle formation de la FFA. De plus, nous avons eu l'opportunité d'enregistrer plusieurs podcasts (avec le Tempo Run Club, Runwise et One Your Marks) diffusés sur les plateformes telles que Spotify ou encore Youtube ainsi que des articles de vulgarisation, parus dans différents journaux, comme celui qui a été publié dans le journal "The Conversation" en juillet 2024, le journal l'Édition de l'université Paris Saclay et la Newsletter de Génopole en septembre 2024, afin de valoriser et de diffuser nos résultats. Ces actions de communication étaient destinées à faire connaître l'ensemble de nos actions visant à accompagner et optimiser la performance de nos athlètes internationaux, notamment en vue des Jeux Olympiques de 2024.

Dans le cadre de mes activités avec la cellule d'optimisation de la performance de la FFA, j'ai eu l'opportunité durant ces sept dernières années d'accompagner les athlètes de l'Équipe de France lors de plusieurs stages nationaux :

- à Potchefstroom, en Afrique du Sud, en janvier et avril 2021, en avril 2022 et 2023 ainsi qu'en mars-avril 2024,
- à Montegordo, au Portugal, en janvier 2020, 2024 et 2025,
- à Saint Paul, sur l'Île de la Réunion, en avril 2022 et 2023
- au CNEA de Font-Romeu, en octobre et mars 2020-2021, en juillet 2022 et en octobre 2023
- à Iten, au Kenya, en mars 2022 et octobre-novembre 2024.

Nous avons également initié l'accompagnement d'une vingtaine d'athlètes dans la mise en place d'un protocole d'optimisation de la performance axé sur la supplémentation en bicarbonate de sodium.

Toujours dans le cadre de ces missions, j'ai collaboré avec une vingtaine d'entraîneurs nationaux de la FFA ou de collègues internationaux afin de leur fournir des conseils éclairés pour optimiser la performance et la récupération des athlètes. De plus, j'accompagne depuis sept ans Adrien Taouji, au Pôle France de demi-fond de l'INSEP, sur le plan scientifique lors des séances mais également lors des sessions d'entraînement et de stages. Dans le cadre de mes missions d'Accompagnement Scientifique à la Performance et d'entraîneur adjoint, j'ai eu l'occasion d'accompagner les entraîneurs et leurs athlètes lors de compétitions internationales telles que les Jeux Olympiques de 2021 et 2024, des championnats du Monde et d'Europe, ainsi qu'à l'occasion de meetings internationaux et des nombreux championnats de France. Récemment, j'ai également été sollicité par le responsable des jeunes athlètes de la FFA afin de contribuer à la détection de nouveaux talents dans le demi-fond.

Enfin, dans le cadre du suivi annuel des athlètes élités de la FFA, j'ai réalisé des tests énergétiques (évaluation de la $\dot{V}O_{2max}$) ainsi que des tests musculaires sur ergomètre isocinétique.

Ainsi, en parallèle à mes travaux de recherche, j'ai contribué activement dans l'accompagnement des athlètes et des entraîneurs de la FFA, notamment lors de stages nationaux et de compétitions dans la perspective des Jeux-Olympiques de Paris 2024.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	7
PUBLICATIONS, COMMUNICATIONS ET ACTIONS D'ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE	11
LISTE DES ABREVIATIONS	18
LISTES DES FIGURES & DES TABLEAUX	19
CONTEXTE SPORTIF	21
1. LE 400 M AU NIVEAU INTERNATIONAL : DURE REALITE	21
2. RELAIS 4X400 M MIXTE : UNE CHANCE DE PLUS OU DE MOINS ?	24
REVUE DE LITTERATURE	28
PARTIE I :	29
PRESENTATION DES EXERCICES A HAUTE-INTENSITE	29
1. CARACTERISTIQUES D'UN EXERCICE A HAUTE-INTENSITE	30
1.1. Définition d'un exercice à haute-intensité : le cas des exercices continus	30
1.2. Exercice à haute-intensité et gestion de l'effort : stratégie 'positive'	30
2. LE 400 M EN ATHLETISME : PARFAIT EXEMPLE DES EXERCICES A HAUTE-INTENSITE	32
2.1. Caractéristiques d'un 400 m en athlétisme	32
2.2. Évolution de la vitesse de course et de la foulée au cours d'un 400 m	32
3. Implications des différentes filières énergétiques au cours d'un 400 m	34
3.1. Filière anaérobie lactique : système glycolytique	35
3.2. Filière aérobie : système oxydatif	37
3.3. Filière anaérobie alactique : système des phosphagènes	37
4. EXERCICE A HAUTE-INTENSITE : PERTURBATION DE L'HOMEOSTASIE ET ACIDOSE METABOLIQUE	40
4.1. 400 m et conséquences neuro-musculaires	40
4.2. 400 m et conséquences métaboliques au cours d'un 400 m	42
5. ÉVOLUTION DES BIOMARQUEURS SANGUINS A L'ISSUE D'UN EXERCICE A HAUTE-INTENSITE	44
PARTIE II :	48
EXERCICES À HAUTE-INTENSITÉ ET STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE	48
1. CARACTERISTIQUES DU STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE INDUIT PAR LA COMPETITION	49
2. EXEMPLE DES CHAMPIONNATS D'EUROPE D'ATHLETISME DE BERLIN (2018)	49
3. SYSTEME NEURO-ENDOCRINIEN ET STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE	51
3.1. Stress psychophysiologique et biomarqueurs salivaires	52
3.1.1. LE CORTISOL	52
3.1.2. LA TESTOSTERONE	54
3.1.3. L'ALPHA-AMYLASE	56
4. EXERCICES A HAUTE-INTENSITE ET SYSTEME NERVEUX AUTONOME	59
4.1. Monitoring de l'activité du système nerveux autonome grâce à la variabilité de la fréquence cardiaque	59
4.2. Influence d'un exercice à haute-intensité sur le système nerveux autonome	61
4.3. Resynchronisation du système nerveux autonome et influence du niveau de pratique	62
4.4. Conséquence d'une compétition sur les marqueurs de la variabilité de la fréquence cardiaque	63

4.5.	Perturbations prolongées des marqueurs de la variabilité de la fréquence cardiaque à l'issue d'une compétition.....	64
5.	ÉTAT D'ANXIÉTÉ PRE-COMPÉTITIF.....	65
5.1.	Stress psychologique et anxiété pré-compétitive associée.....	65
5.2.	Anxiété pré-compétitive et Competitive State Anxiety Inventory-2.....	66
PARTIE III :		72
OPTIMISER LA RÉITÉRATION D'EXERCICES À HAUTE-INTENSITÉ PAR LA RECUPERATION EN REGULANT LE STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE		72
1.	REGULER LES EFFETS DU STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE : OPTIMISATION DU SOMMEIL.....	73
1.1.	Sommeil et stress psycho-physiologique : quid de l'œuf ou de la poule ?.....	73
1.2.	Régulation du stress psychophysiologique à l'aide de la cohérence cardiaque.....	74
PARTIE IV :		78
OPTIMISER LA RÉITÉRATION DE PERFORMANCE MAXIMALE PAR LA NUTRITION EN REGULANT LE STRESS METABOLIQUE		78
1.	RETARDER LES EFFETS DU STRESS METABOLIQUE : AMELIORATION DE LA CAPACITE TAMPON	79
1.1.	Limiter les effets de l'acidose métabolique : capacité tampon.....	79
1.2.	Supplémentation en bicarbonate de sodium	81
1.2.1.	Principe d'action.....	81
1.2.2.	Posologie	81
1.2.3.	Effets sur la performance au cours d'un exercice à haute-intensité	81
1.2.4.	Limites et inconvénients.....	82
1.3.	Optimisation du pouvoir tampon grâce à la consommation d'une eau riche en bicarbonate.....	83
1.4.	Optimisation du pouvoir tampon grâce à un régime alimentaire alcalinisant.....	84
SYNTHÈSE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE ET OBJECTIFS DU TRAVAIL DE THÈSE		87
CONTRIBUTION SCIENTIFIQUE PERSONNELLE		92
ETUDE 1 - APPLICATION DE LA VARIABILITE DE LA FREQUENCE CARDIAQUE ET DES MARQUEURS SUBJECTIFS POUR OPTIMISER LA PRESCRIPTION D'ENTRAINEMENT : ETUDE DE CAS D'UNE ATHLETE OLYMPIQUE		93
ETUDE 2 - COURIR SOUS PRESSION PARTIE I: COMMENT LE STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE INFLUENCE-T-IL LES SPORTIFS DE HAUT-NIVEAU?.....		107
ETUDE 3 - COURIR SOUS PRESSION PARTIE II: COMMENT REGULER LE STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE CHEZ TRES ENTRAINES?.....		131
ETUDE 4 - INFLUENCE DE LA CONSOMMATION D'EAU RICHE EN BICARBONATE COMBINEE A UN REGIME ALIMENTAIRE ALCALINISANT OU ACIDIFIANT SUR L'EQUILIBRE ACIDO-BASIQUE ET LA PERFORMANCE ANAEROBIE		156
ETUDE 5 - ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'ETAT ACIDO-BASIQUE SUR LA PERFORMANCE ATHLETIQUE LORS D'UNE COURSE DE 400 M SIMULEE SUR TROIS JOURS.....		172
DISCUSSION ET CONCLUSION GÉNÉRALE		193
1.	RAPPELS DES OBJECTIFS ET DES RESULTATS DU PROJET DE RECHERCHE.....	194
1.1.	Rappel de l'objectif principal	194

1.2.	RAPPELS DU DEROULEMENT DE LA THESE ET DES RESULTATS PRINCIPAUX	194
1.2.1.	Étude n°1.....	194
1.2.2.	Étude n°2.....	195
1.2.3.	Étude n°3.....	196
1.2.4.	Étude n°4.....	196
1.2.5.	Étude n°5.....	197
2.	CARACTERISER LES EFFETS D'UN STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE	198
2.1.	QUELLES SONT LES EFFETS DU STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE INDUIT PAR UN ENCHAINEMENT D'EXERCICES A HAUTE-INTENSITE EN COMPETITION CHEZ DES ATHLETES ELITES ?	198
2.2.	QUELLES SONT LES EFFETS DU STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE INDUIT PAR UN ENCHAINEMENT D'EXERCICES A HAUTE-INTENSITE LORS D'UNE COMPETITION SIMULEE CHEZ DES ATHLETES TRES ENTRAINES ? 202	
2.2.1.	CONSEQUENCES SUR LES INDICES DE LA VARIABILITE DE LA FREQUENCE CARDIAQUE	202
2.2.2.	CONSEQUENCES SUR LES MARQUEURS SALIVAIRES.....	203
3.	REGULER LES EFFETS DU STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE	205
3.1.	Quels sont les effets de la cohérence cardiaque sur les marqueurs du stress	205
4.	RETARDER LES EFFETS DE L'ACIDOSE METABOLIQUE	208
4.1.	QUELS SONT LES EFFETS D'UN REGIME ALCALIN ASSOCIEE A LA CONSOMMATION D'UNE EAU RICHE EN BICARBONATE DE SODIUM ?	208
4.1.1.	Contrecarrer les effets délétères d'une alimentation acidifiante.....	208
4.2.2.	Conséquences sur la vitesse d'élimination du lactate.....	212
	APPLICATIONS PRATIQUES DE CE TRAVAIL DE THESE.....	214
	PERSPECTIVES	218
	CONCLUSION	220
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	222
	ANNEXES.....	242

LISTE DES ABRÉVIATIONS

1. ****ANS**** : Autonomic Nervous System (Système nerveux autonome)
2. ****HPA**** : Hypothalamic-Pituitary-Adrenal (Axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien)
3. ****HRV**** : Heart Rate Variability (Variabilité de la fréquence cardiaque)
4. ****SNE**** : Système Neuro-Endocrinien
5. ****RMSSD**** : Root Mean Square of Successive Differences
6. ****SJ**** : Squat Jump (Saut vertical)
7. ****HG**** : Hand Grip (Force de préhension)
8. ****CSAI-2R**** : Competitive State Anxiety Inventory - Revised
9. ****T/C**** : Testosterone/Cortisol ratio
10. ****IL1-β**** : Interleukin 1 Beta
11. ****HCO₃⁻**** : Bicarbonate
12. ****PLA**** : Placebo
13. ****ALK**** : Alkalizing (Alcalinisant)
14. ****ACI**** : Acidizing (Acidifiant)
15. ****RELAX**** : Groupe utilisant la méthode de respiration cohérente
16. ****CONT**** : Control Group (Groupe contrôle)
17. ****BIC**** : Bicarbonate (souvent pour l'eau riche en bicarbonate)
18. ****VFC**** : Variabilité de la Fréquence Cardiaque (équivalent français de HRV)
19. ****H-I**** : High-Intensity (Haute-Intensité)
20. **** $\dot{V}O_{2max}$ **** : Maximum Oxygen Uptake (Consommation maximale d'oxygène)
21. ****ATP**** : Adenosine Triphosphate
22. ****PCr**** : Phosphocreatine (Phosphocréatine)
23. ****ADP**** : Adenosine Diphosphate
24. ****Pi**** : Phosphate inorganique
25. ****FFA**** : Fédération Française d'Athlétisme
26. ****VIFASOM**** : Vigilance, Fatigue, Sommeil
27. ****SEPHN**** : Sport et Expertise de la Perforance et de Haut-Niveaux
28. ****INSEP**** : Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance
29. ****ASP**** : Accompagnement Scientifique à la Performance
30. ****J.O**** : Jeux-Olympiques

LISTES DES FIGURES & DES TABLEAUX

Tableau 1 : Évolution des performances des athlètes étrangers lors des derniers grands championnats internationaux depuis 2015 à 2019 (avant l'apparition des nouvelles pointes).

Tableau 2 : Évolution des performances des athlètes français.e.s lors des derniers grands championnats internationaux depuis 2015 à 2019 avant l'apparition des pointes et du relais 4x 400 m mixtes.

Tableau 3 : synthèse des principaux marqueurs de la variabilité de la fréquence cardiaque

Tableau 4 : Exemple des aliments acidifiants ou alcalinisants en fonction de leur indice PRAL réalisé à partir de Remer et al., 1995.

Figure 1 : Performances moyennes réalisées par des athlètes français et étrangers sur 400 m en série, demi et finale lors des derniers grands championnats internationaux depuis 2015 à 2019 avant l'apparition des pointes et du relais 4x 400 m mixtes.

Figure 2 : Programme des courses individuelles et de relais de Louise Maraval lors des Jeux-Olympique de Paris 2024.

Figure 3: Schéma des objectifs identifiés afin de répondre aux besoins des entraîneurs et des athlètes de haut-niveau.

Figure 4 : Évolution de la puissance et de la vitesse lors d'un 1000m en cyclisme sur piste (Abbiss et Laursen 2008).

Figure 5 : Évolution de la vitesse de course chez des coureurs de niveaux différents spécialistes du 400 m (Hanon et Gajer 2009).

Figure 6 : schéma de synthèse du fonctionnement de l'ensemble des filières énergétiques réalisé par Thomas et al., 2019 à partir des travaux de van Hall G, 2010.

Figure 7 : Schéma de synthèse de la glycolyse conduisant à une production de pyruvate, qui sera soit transformé dans la mitochondrie soit transformé en lactate.

Figure 8 : Évolution de la concentration sanguine en ATP, CP et de la $\dot{V}O_{2max}$ au cours d'une course de 400 m (Schéma de synthèse d'après les études d'Hirvonen et al. 1992 et d'Hanon et al. 2010).

Figure. 9 : Représentation schématique des navettes de la créatine, réalisé par C. Thomas d'après Saks et coll. (2000).

Figure 10 : Système neuromusculaire précisant les différents sites où peuvent survenir les altérations responsables de la fatigue neuromusculaire (Bigland-Ritchie 1981): (1) activation de l'aire primaire du cortex moteur ; (2) transmission de la commande par les voies pyramidales ; (3) activation des UM ; (4) propagation neuromusculaire ; (5) couplage excitationcontraction ; (6) disponibilités des substrats énergétiques ; (7) changements du milieu intracellulaire ; (9) flux sanguin.

Figure 11 : évolution de la fréquence et de la longueur de la foulée en fonction de la distance au cours d'une course de 400 m chez des athlètes de niveau international, national et régional (d'après Hanon & Gajer 2009).

Figure 12 : Évolution de la CP et du lactate sanguin ainsi que de l'ATP et du lactate musculaire en fonction de la distance au cours d'un 400 m (d'après l'étude d'Hirvonen et al., 1992).

Figure 13 : Cinétiques de restauration du pH, des ions HCO_3^- et du lactate sanguin à l'issue d'un exercice à H-I sur ergocycle à 110% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ (schéma de synthèse d'après l'étude Robergs et al., 2005).

Figure 14 : Évolution du taux de testostérone et de cortisol salivaire, lors des championnats d'Europe d'athlétisme de Berlin en 2018, exprimés en % de la valeur de référence obtenue avant la première course. Données recueillies auprès de 4 athlètes membres de l'Équipe de France d'Athlétisme (données FFA non publiées).

Figure 15 : Schéma de synthèse des réponses des différents marqueurs salivaires faces au stress induit par un exercice à haute-intensité et par la compétition.

Figure 16 : Enregistrement d'électrocardiogramme représentant le temps entre chaque intervalle RR (Saboul 2013).

Figure 17 : Exemple du questionnaire Competitive State Anxiety Inventory-2 Revised (CSAI-2R) validé et traduit en Français, comprenant les échelles de fréquence et de direction ; Martinent, G., Ferrand, C., Guillet, E., & Gauthier, S. (2010).

Figure 18 : Représentation temporelle et fréquentielle d'un enregistrement de variabilité cardiaque réalisé sur un athlète élite membre de l'équipe de France (donnée personnelle). L'athlète présente une fréquence de respiration libre d'environ 0,12 Hz et une arythmie sinusale respiratoire très prononcée.

Figure 19A : Synthèse de la capacité tampon musculaire et sanguin.

Figure 19B : Résumé des systèmes de transport membranaires (cercles) et des enzymes (carrés) impliqués dans les flux de H^+ entre le muscle et le sang. Les anhydrases carboniques (CA) I, II, III, IV et XIV représentent les isoformes cytosoliques et membranaires de l'CA présentes dans les muscles et les érythrocytes. NHE1 : Na^+/H^+ isoforme échangeur 1. MCT1 et MCT4 : transporteur de monocarboxylate (cotransporteur lactate- H^+) isoforme 1 et 4. NBC : $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ co-transporteur. AE1 : $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ échangeur 1. (Juel 2003).

Figure 20 : Effets d'un régime alimentaire alcalinisant (BASE), acidifiant (ACIDE) ou neutre (UNMOD) sur la performance réalisée, sur la lactatémie et sur le pH sanguin à l'issue d'un 400 mètres chez des étudiants en STAPS (Limmer et al., 2018).

Figure 21 : Schéma de synthèse de la revue de littérature.

CONTEXTE SPORTIF

1. Le 400 m au niveau international : dure réalité

La course de 400 mètres (400 m) en athlétisme est généralement perçue comme l'une des disciplines les plus éprouvantes, tant physiquement que mentalement. Ce fameux « tour de piste » se situe à la frontière entre les courses de sprint et les courses de demi-fond. Le 400 m est également réputé pour l'intense fatigue qu'il génère, souvent visible par un ralentissement des athlètes dans les derniers mètres, symptôme de ce que le grand public relie à la production « d'acide lactique ».

Contrairement à d'autres disciplines, les différents records du monde n'ont pas été établis récemment, malgré le développement de nouvelles techniques d'optimisation de la performance. En effet, le record actuel est détenu chez les hommes par le Sud-Africain Wayde Van Niekerk, qui a parcouru le tour de piste en 43,03 secondes en 2016. Chez les femmes, c'est l'Allemande Marita Koch qui détient le record depuis 1985 avec un temps de 47,60 secondes. Pour le record de France, il est détenu respectivement par Leslie Djhone avec 44,46 secondes depuis 2007 et par Marie-José Pérec avec un record de 48,25 sec établis en 1996 aux Jeux-Olympiques d'Atlanta.

Sur cette discipline, les athlètes français·e·s font face à un niveau international particulièrement exigeant, dense et compétitif. En nous appuyant sur l'analyse des derniers grands championnats internationaux, de Pékin (2015) à Doha (2019), période précédant l'apparition des nouvelles chaussures de compétition, nous ne constatons qu'aucun·e athlète français·e n'est parvenu·e à se qualifier pour une finale lors des grands championnats internationaux et seulement un homme et une femme ont réussi à se qualifier pour les finales du 400 m lors des Championnats d'Europe de Berlin en 2018.

Au-delà de ce constat, les athlètes français·e·s engagé·e·s dans les grandes compétitions doivent atteindre leur meilleur niveau dès les phases qualificatives. Contrairement à certains athlètes des nations concurrentes, qui peuvent gérer l'intensité de leurs efforts entre les séries et les finales pour arriver à leur meilleur niveau en finale, les athlètes français·e·s sont souvent contraint·e·s de courir proche de leur record dès les séries. En effet comme l'illustre l'évolution des performances exprimée en pourcentage des meilleurs temps de la saison (SB) dans le tableau 1, les athlètes étranger·e·s parviennent à élever leur niveau au cours du championnat afin de réaliser leur meilleure performance le jour de la finale (Tab. 1).

Tableau 1 : Évolution des performances des athlètes étrangers lors des derniers grands championnats internationaux depuis 2015 à 2019 avant l'apparition des pointes et du relais 4x 400 m mixtes.

Championnat	Tours	Prénom	Nom	Temps réalisé (s)	% par rapport au SB	SB (s)	Place
Championnat du Monde Doha 2019	Série (30/09/2019)	Salwa	Eid Naser (BRN)	50,74	94,88%	48,14	1e
	1/2 Finale (01/10/2019)	Salwa	Eid Naser (BRN)	49,79	96,69%		1e
	Finale (03/10/2019)	Salwa	Eid Naser (BRN)	48,14	100,00%		1e
	Série (30/09/2019)	Phyllis	Francis (E-U)	50,77	97,72%	49,61	1e
	1/2 Finale (01/10/2019)	Phyllis	Francis (E-U)	50,22	98,79%		2e
	Finale (03/10/2019)	Phyllis	Francis (E-U)	49,61	100,00%		5e
	Série (30/09/2019)	Iga	Baumgart-Witan (POL)	51,34	99,38%	51,02	2e
	1/2 Finale (01/10/2019)	Iga	Baumgart-Witan (POL)	51,02	100,00%		3e
	Finale (03/10/2019)	Iga	Baumgart-Witan (POL)	51,29	99,47%		8e
Championnat d'Europe Berlin 2018	1/2 Finale (09/08/2018)	Justyna	Swiety-Ersetic (POL)	51,23	98,40%	50,41	1e
	Finale (11/08/2018)	Justyna	Swiety-Ersetic (POL)	50,41	100,00%		1e
	1/2 Finale (09/08/2018)	Iga	Baumgart-Witan (POL)	51,35	99,79%	51,24	1e
	Finale (11/08/2018)	Iga	Baumgart-Witan (POL)	51,24	100,00%		5e
	1/2 Finale (09/08/2018)	Madiea	Ghafoor (P-B)	51,29	99,67%	51,12	2e
	Finale (11/08/2018)	Madiea	Ghafoor (P-B)	51,57	99,13%		8e
Jeux Olympiques Rio 2016	Série (13/08/2016)	Shaunae	Miller-Uibo (BAH)	51,16	96,64%	49,44	1e
	1/2 Finale (15/08/2016)	Shaunae	Miller-Uibo (BAH)	49,91	99,06%		2e
	Finale 16/08/2016	Shaunae	Miller-Uibo (BAH)	49,44	100,00%		1e
	Série (13/08/2016)	Phyllis	Francis (E-U)	50,58	98,73%	49,94	1e
	1/2 Finale (15/08/2016)	Phyllis	Francis (E-U)	50,31	99,26%		1e
	Finale 16/08/2016	Phyllis	Francis (E-U)	50,41	99,07%		5e
	Série (13/08/2016)	Libania	Grenot (ITA)	51,17	98,55%	50,43	2e
	1/2 Finale (15/08/2016)	Libania	Grenot (ITA)	50,6	99,66%		3e
	Finale 16/08/2016	Libania	Grenot (ITA)	51,25	98,40%		8e
Championnat d'Europe Amsterdam 2016	Série (06/07/2016)	Martyn	Rooney (G-B)	46,57	96,71%	45,04	1e
	1/2 Finale (07/07/2016)	Martyn	Rooney (G-B)	45,04	100,00%		1e
	Finale (08/07/2016)	Libania	Rooney (G-B)	45,29	99,45%		1e
	1/2 Finale (07/07/2016)	Luka	Janezic (SLO)	45,63	98,77%	45,07	1e
	Finale (08/07/2016)	Luka	Janezic (SLO)	45,65	98,73%		5e
	Série (06/07/2016)	Matteo	Galvan (ITA)	46,89	96,23%	45,12	3e
	1/2 Finale (07/07/2016)	Matteo	Galvan (ITA)	45,12	100,00%		2e
	Finale (08/07/2016)	Matteo	Galvan (ITA)	45,8	98,52%		8e
	1/2 Finale (07/07/2016)	Libania	Grenot (ITA)	50,43	100,00%	50,43	1e
	Finale (08/07/2016)	Libania	Grenot (ITA)	50,73	99,41%		1e
	1/2 Finale (07/07/2016)	Malgorzata	Holub-Kowalik (POL)	51,67	100,00%	51,67	2e
	Finale (08/07/2016)	Malgorzata	Holub-Kowalik (POL)	51,89	99,58%		5e
	Série (06/07/2016)	Nicky	Van Leuveren (P-B)	52,45	99,18%	52,02	1e
	1/2 Finale (07/07/2016)	Nicky	Van Leuveren (P-B)	52,02	100,00%		3e
	Finale (08/07/2016)	Nicky	Van Leuveren (P-B)	52,76	98,60%		8e
Championnat du Monde Pékin 2015	Série (24/08/2015)	Allyson	Felix (E-U)	50,6	97,35%	49,26	1e
	1/2 Finale 25/08/2015	Allyson	Felix (E-U)	49,89	98,74%		1e
	Finale (27/08/2015)	Allyson	Felix (E-U)	49,26	100,00%		1e
	Série (24/08/2015)	Stephanie	McPherson (JAM)	50,34	99,96%	50,32	1e
	1/2 Finale 25/08/2015	Stephanie	McPherson (JAM)	50,32	100,00%		2e
	Finale (27/08/2015)	Stephanie	McPherson (JAM)	50,42	99,80%		5e
	Série (24/08/2015)	Christine	Ohuruogu (G-B)	51,01	98,33%	50,16	1e
	1/2 Finale 25/08/2015	Christine	Ohuruogu (G-B)	50,16	100,00%		1e
	Finale (27/08/2015)	Christine	Ohuruogu (G-B)	50,63	99,07%		8e

À l'inverse, comme le souligne le tableau 2, les athlètes français·es doivent être à leur meilleur niveau dès les phases de qualification compromettant leur capacité à être performant pour la finale (Tab. 2).

Tableau 2 : Évolution des performances des athlètes français.e.s lors des derniers grands championnats internationaux depuis 2015 à 2019 avant l'apparition des pointes et du relais 4x 400 m mixtes.

Championnat	Tours	Prénom	Nom	Temps réalisé (s)	% par rapport au SB	SB (s)	Place en finale	% SB par rapport chrono d'entrée en finale	Performance (en s) des : 1 ^{ère} /2 ^{ème} /3 ^{ème} place
Championnat du Monde Doha 2019	Série (30/09/2019)	Deborah	Sananes	51,76	99,59%	51,55	51,02	101,04%	48,14/48,37/49,47
	1/2 Finale (01/10/2019)	Deborah	Sananes	52,24	98,68%				
Championnat d'Europe Berlin 2018	Série (08/08/2018)	Floria	Guei	51,89	99,25%	51,5	51,5	100%	50,41/50,45/50,77
	1/2 Finale (09/08/2018)	Floria	Guei	51,5	100,00%				
	Finale (11/08/2018)	Floria	Guei	51,57	99,86%				
Jeux Olympiques Rio 2016	Série (13/08/2016)	Floria	Guei	51,29	99,12%	50,84	50,75	100,18%	49,44/49,51/49,85
	1/2 Finale (15/08/2016)	Floria	Guei	51,08	99,53%				
Championnat d'Europe Amsterdam 2016	Série (06/07/2016)	Thomas	Jordier	47,14	96,99%	45,72	45,39	100,73%	45,29/45,36/45,41
	1/2 Finale (07/07/2016)	Thomas	Jordier	46,24	98,88%				
	Série (06/07/2016)	Mame-Ibra	Anne	46,73	97,13%	45,39	45,39	100,00%	50,73/51,21/51,47
	1/2 Finale (07/07/2016)	Mame-Ibra	Anne	45,39	100,00%				
	Finale (08/07/2016)	Mame-Ibra	Anne	45,75	99,21%				
	1/2 Finale (07/07/2016)	Floria	Guei	51,01	99,67%	50,84	52,34	97,13%	49,26/49,67/49,99
	Finale (08/07/2016)	Floria	Guei	51,21	99,28%				
Championnat du Monde Pékin 2015	Série (24/08/2015)	Marie	Gayot	51,24	99,47%	50,97	50,5	100,93%	49,26/49,67/49,99
	1/2 Finale (25/08/2015)	Marie	Gayot	50,97	100,00%				
	Série (24/08/2015)	Floria	Guei	50,89	100,00%	50,89	50,5	100,77%	49,26/49,67/49,99
	1/2 Finale (25/08/2015)	Floria	Guei	51,3	99,20%				

Ainsi, comme le met en évidence la figure 1, le niveau requis pour accéder en finale permet aux athlètes étrangers.e.s de gérer leurs courses en amont alors que les athlètes français.e.s doivent s'engager pleinement dès les phases qualificatives dans l'espoir de se qualifier. Cet engagement maximal dès le début de la compétition peut par conséquent avoir des conséquences non négligeables sur la capacité de nos athlètes à réitérer des performances de haut-niveau tout au long du championnat (Fig. 1).

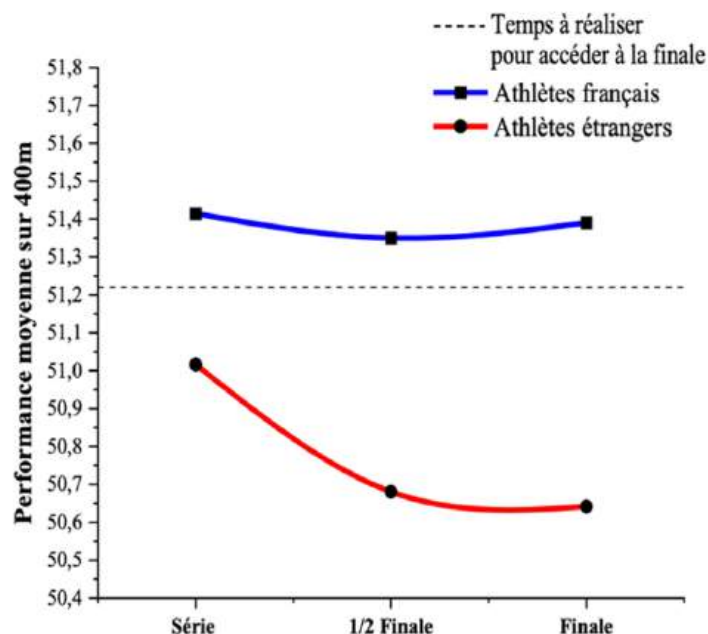


Figure 1 : Performances moyennes réalisées par des athlètes français et étrangers sur 400 m en série, demi et finale lors des derniers grands championnats internationaux depuis 2015 à 2019 avant l'apparition des pointes et du relais 4x 400 m mixtes.

2. Relais 4x400 m mixte : une chance de plus ou de moins ?

À l'occasion des Mondiaux de relais qui ont eu lieu le 23 avril 2017 à Nassau, aux Bahamas, une nouvelle discipline de l'athlétisme a fait son apparition : l'épreuve de relais 4x400 m mixte. Dans cette épreuve, contrairement aux relais classiques, les équipes sont constituées de deux athlètes femmes et de deux athlètes hommes. Cette épreuve a été intégrée officiellement aux grands championnats internationaux lors des Championnats du monde d'octobre 2019 à Doha, puis aux Jeux Olympiques de Tokyo (2021). Cette nouvelle discipline offre ainsi aux grandes nations de l'athlétisme mondial, en plus des épreuves individuelles et des relais traditionnels, une opportunité supplémentaire de remporter une médaille sur la scène internationale.

Cependant, en plus des défis liés à la répétition de performances de haut-niveau, l'ajout de cette épreuve impose une contrainte supplémentaire aux athlètes. En effet, les athlètes qualifié·e·s dans les épreuves individuelles pourraient courir jusqu'à sept fois lors d'un championnat, en tenant compte des tours qualificatifs et des finales des épreuves individuelles, des relais 4x400 m et du relais mixte. Le récent parcours lors des Jeux Olympiques de Paris 2024 de la jeune athlète de l'Équipe de France d'Athlétisme, Louise Maraval, illustre au-delà de l'aspect compétitif, le calendrier particulièrement dense et exigeant imposé aux athlètes. Comme le souligne la figure. 2, ces dernier·ère·s peuvent ainsi être amené·e·s à reproduire une performance de haut-niveau avec moins de vingt-quatre heures de récupération, voire parfois à courir deux courses de H-I dans la même journée (Fig. 2).

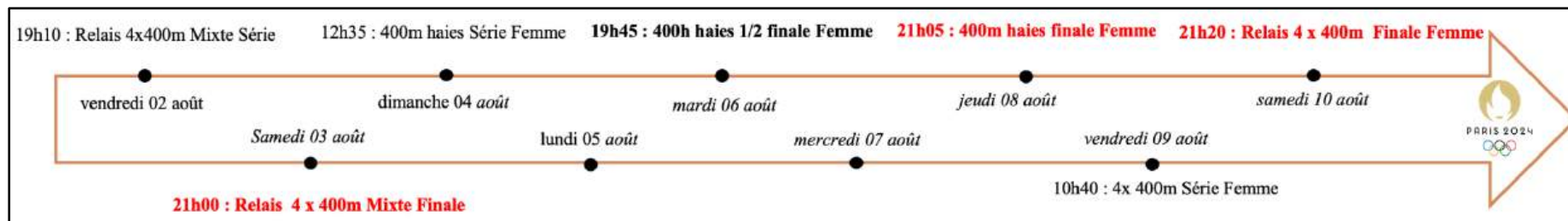


Figure 2 : Programme des courses individuelles et de relais de Louise Maraval lors des Jeux-Olympique de Paris 2024

En somme, ce travail de recherche s'inscrit dans ce contexte sportif propre à l'athlétisme et vise à répondre aux questions et aux besoins des entraîneur·e·s afin d'approfondir les thématiques de recherche liées aux exigences des sports de haute-intensité. Porté par la Fédération Française d'Athlétisme (FFA), les membres du Laboratoire de Biologie de l'Exercice pour la Performance et la Santé (LBEPS) de l'université d'Évry Paris Saclay et de l'Unité de recherche Vigilance, Fatigue, Sommeil et Santé Publique (VIFASOM) de l'hôpital de l'Hôtel-Dieu – Université Paris Cité, ce projet a eu pour objectif de mieux caractériser les différents types de stress (psychologique, neuroendocrinien et métabolique) pouvant contribuer aux difficultés des athlètes à réitérer une performance de haut-niveau. Puis, notre second objectif a été de pouvoir proposer aux entraîneur·e·s et aux athlètes des stratégies visant à optimiser à la fois la performance des athlètes et sa réitération, après leur validation scientifique (Fig. 3).

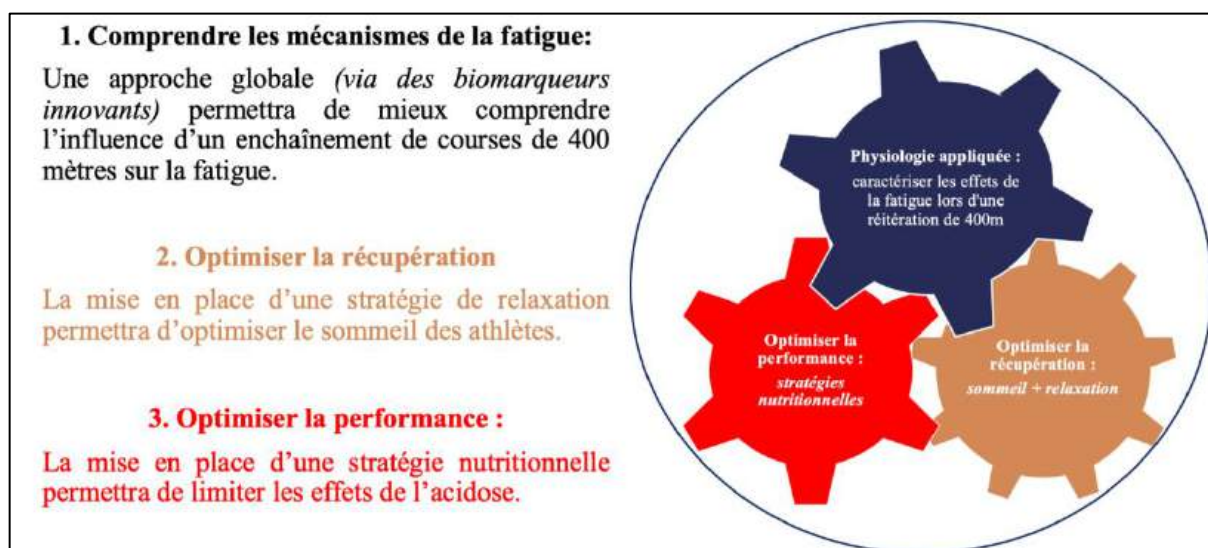


Figure 3 : Schéma des objectifs identifiés afin de répondre aux besoins des entraîneurs et des athlètes de haut-niveau.

REVUE DE LITTÉRATURE

PARTIE I :
PRÉSENTATION DES EXERCICES À HAUTE-INTENSITÉ

1. Caractéristiques d'un exercice à haute-intensité

1.1. Définition d'un exercice à haute-intensité : le cas des exercices continus

Sur le plan physiologique, la caractérisation d'un exercice à haute-intensité (H-I) dépend de son intensité, de sa durée, ainsi que des stratégies de gestion des ressources énergétiques (Abbiss & Laursen, 2008 ; Foster et al., 1994). Les exercices à H-I, tels que le 400 m en athlétisme, le cyclisme sur piste (course de 1000 m) ou le 100 m en natation, se distinguent par une demande énergétique rapide et intense, dépassant les capacités de resynthèse de l'adénosine triphosphate (ATP) par la voie oxydative. Ainsi, un exercice à H-I se caractérise par la sollicitation majoritaire du système anaérobie (Hargreaves et al., 1998; Withers et al., 1991), nécessitant un débit de production énergétique supérieur au débit maximal aérobie de resynthèse de l'ATP (Åstrand et al., 1980). Par conséquent, nous pouvons distinguer deux grandes catégories dans ces disciplines : les sports discontinus et les sports continus. Les sports discontinus alternent des phases d'exercices très intenses avec des phases de moindre intensité, permettant une durée d'activité prolongée, souvent supérieure à quatre minutes, comme dans le rugby à 7 ou le judo. En revanche, les sports continus, tels que le 400 m en athlétisme ou le 200m en canoë-kayak monoplace, exigent un engagement important durant l'intégralité de l'exercice, qui ne dépasse généralement pas deux minutes.

Ainsi, dans le cadre de ce travail et au regard du contexte mentionné ci-dessus, nous nous concentrerons uniquement sur les exercices à H-I continus.

1.2. Exercice à haute-intensité et gestion de l'effort : stratégie "positive"

Lors des compétitions impliquant des disciplines sportives continues telles que l'athlétisme, le cyclisme ou l'aviron, une diminution progressive de la vitesse moyenne est inexorablement observée, avec une dernière partie d'exercice significativement plus lente que la première lors des courses avec établissement de record ou au niveau maximal. Cette chute de la vitesse en fin d'exercice illustre une stratégie de course dite « positive ». Cette stratégie repose sur un départ rapide, avec une intensité initiale supérieure à l'intensité moyenne de l'épreuve, permettant une régulation optimale de l'effort. Elle est caractéristique des courses de 1000m en cyclisme sur piste ou encore des 400 m en athlétisme.

Pour les exercices à H-I continus dont la durée est comprise entre 30 secondes et 2 minutes, la diminution d'intensité, visible à travers une baisse de la vitesse ou de la puissance, est estimée

entre 15 et 20%. Ce phénomène a été constaté, par exemple, lors d'un 400 m en athlétisme (Hanon & Gajer, 2009) ou d'un 1000 m en cyclisme sur piste (Fig. 4) (Abbiss & Laursen, 2008).

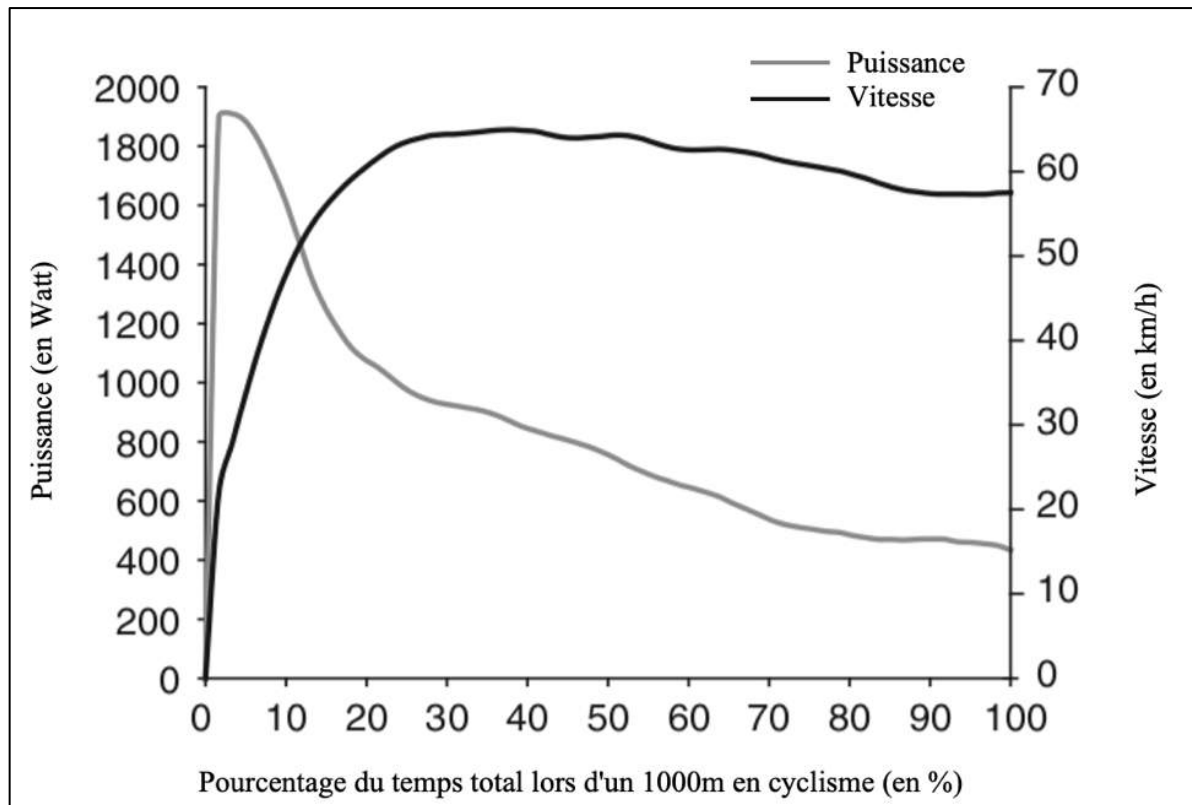


Figure 4 : Évolution de la puissance et de la vitesse lors d'un 1000m en cyclisme sur piste (Abbiss & Laursen 2008).

L'exigence physique et l'engagement requis par les exercices à H-I continus permettent ainsi de mieux appréhender les conséquences physiologiques associées à de tels exercices, notamment en termes de dépense énergétique et de stress métabolique. Nous étudierons ainsi l'implication des différentes filières énergétiques mobilisées pour satisfaire ces besoins énergétiques, tout en précisant les impacts physiologiques de ce type d'exercice sur l'organisme.

2. Le 400 m en athlétisme : parfait exemple des exercices à haute-intensité

2.1. Caractéristiques d'un 400 m en athlétisme

En athlétisme, le 400 m est une épreuve de sprint long (ou prolongé). Selon le règlement de l'International Association of Athletics Federations (IAAF), le départ s'effectue à partir de starting-blocks, et chaque athlète doit courir dans le couloir qui lui est attribué tout au long de la course. Cela concerne uniquement le 400 m en extérieur, car la réglementation des courses en salle (piste de 200m, course en peloton avec davantage de virages) diffère des épreuves en extérieur, pouvant entraîner des variations d'allure importantes durant l'exercice. Comme pour la plupart des exercices à H-I, cette épreuve nécessite un engagement maximal, où la motivation de l'athlète joue un rôle crucial dans la performance.

Reproduire un 400 m dans des conditions expérimentales identiques à celles de la compétition reste cependant un défi. En laboratoire, les exercices sont généralement réalisés sur un ergomètre ou un tapis roulant électrique. Ce type d'équipement impose une allure de course constante, ce qui ne reflète pas les conditions écologiques observées sur une piste extérieure. Ainsi, ces résultats sont difficilement transposables en raison des limites méthodologiques évoquées. Compte tenu de ces contraintes, peu d'études se sont spécifiquement intéressées au 400 m tel qu'il est réalisé en compétition.

2.2. Évolution de la vitesse de course et de la foulée au cours d'un 400 m

L'évolution de la vitesse lors d'une course de 400 m suit un schéma typique (Grgić et al., 2019). En effet, une étude menée par Hanon et Gajer auprès de spécialistes du 400 m a mis en évidence, grâce à un découpage de la course tous les 50m, que la vitesse atteignait son pic au terme des 100 premiers mètres. Par la suite, l'allure diminue progressivement, avec un dernier 100m nettement plus lent que les sections précédentes (Hanon & Gajer, 2009) (Fig. 5).

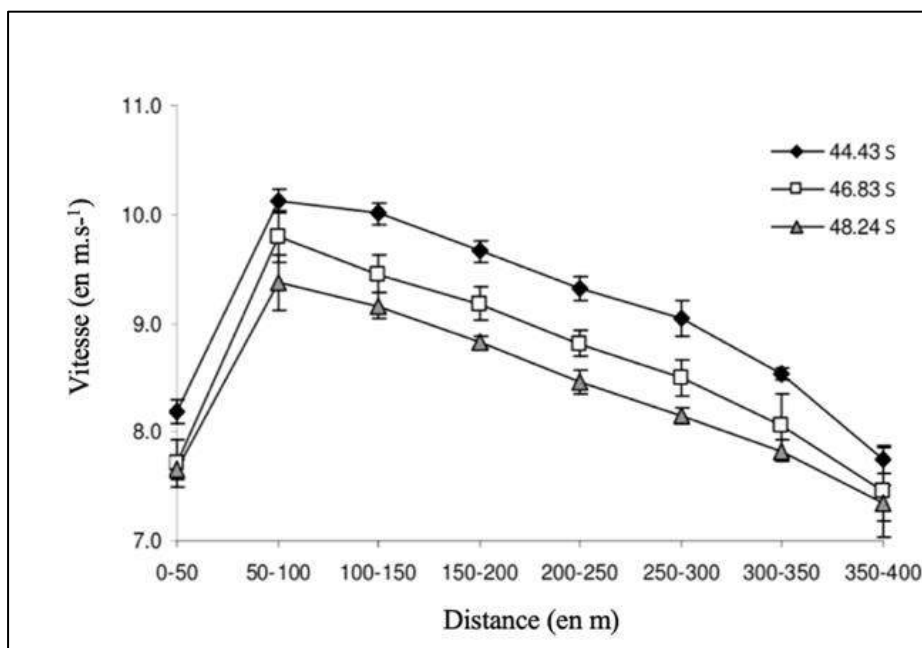


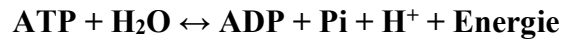
Figure 5 : Évolution de la vitesse de course chez des coureurs de niveaux différents spécialistes du 400 m (Hanon et Gajer 2009).

Cette stratégie, impliquant un départ rapide, entraîne une augmentation significative de la consommation d'oxygène dès le début de la course. Les athlètes atteignent 94% ($\pm 3,9\%$) de leur $\dot{V}O_{2pic}$ dès 200m (Hanon et al., 2010). Leur $\dot{V}O_{2max}$ est ainsi atteint dans les 25 premières secondes de la course avant de diminuer progressivement, en parallèle à une baisse de plus de 20% de la vitesse de course, particulièrement marquée dans la seconde moitié du parcours (Hanon & Gajer, 2009).

En outre, la même étude, réalisée auprès d'athlètes de niveau international, national et régional, a montré que l'amplitude et la fréquence des foulées diminuaient considérablement dans les cent derniers mètres de la course différentes filières. Ces résultats ont également permis de confirmer ceux obtenus par Nummela et ses collaborateurs (Nummela et al., 1992), qui ont observé une réduction similaire des paramètres de foulée chez des athlètes de niveau national. La baisse de la vitesse de course, ainsi que la diminution de l'amplitude et de la fréquence des foulées, étaient concomitantes à une augmentation du temps de contact au sol (Nummela et al., 1992). Dans cette étude, les modifications des caractéristiques de la foulée et la baisse de la vitesse s'accompagnaient également d'une diminution de 39% de la hauteur de saut lors d'un contre-mouvement (CMJ), directement corrélée à une augmentation de la concentration en lactate sanguin après un 400 m. Ces résultats mettent en évidence les limites physiologiques liées à l'accumulation de métabolites et à la gestion de l'intensité de l'exercice lors d'une épreuve aussi intense.

3. Implications des énergétiques au cours d'un 400 m

Au cours d'un exercice à H-I, l'organisme mobilise rapidement de l'énergie afin d'assurer les contractions musculaires. Cette production est principalement permise par le muscle strié squelettique, qui transforme l'énergie chimique en énergie mécanique grâce à l'hydrolyse de l'ATP qui s'accompagne également d'une production de phosphates inorganiques et d'ions hydrogène (H^+) (Hill & Lupton, 1923; Lipmann, 1941; Robergs et al., 2004).



Pour des exercices comme le 400 m, d'une durée inférieure à une minute, l'énergie nécessaire à la contraction musculaire provient majoritairement de la glycolyse (filier anaérobie lactique), et de la filière aérobie. La filière anaérobie alactique contribue également à répondre aux besoins énergétiques. Par conséquent, l'interaction efficace de ces trois filières énergétiques permet de couvrir les besoins en ATP durant l'intégralité de l'exercice (Fig.6).

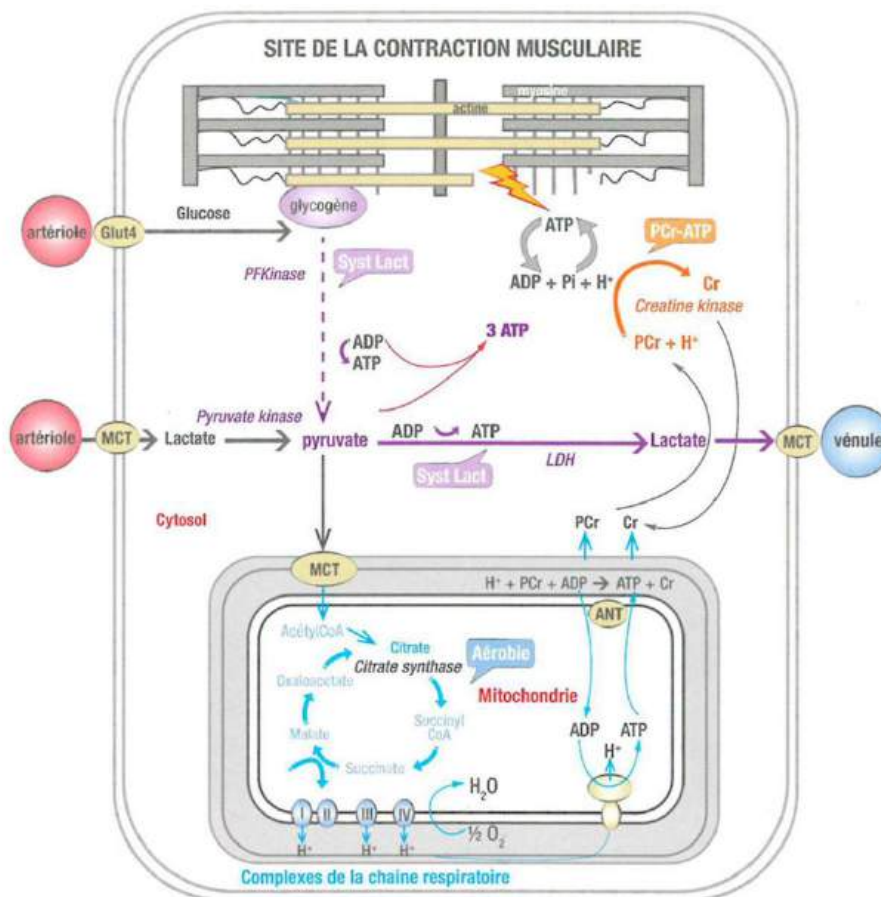


Figure 6 : schéma de synthèse du fonctionnement de l'ensemble des filières énergétiques réalisé par Hanon et al., 2019 à partir des travaux de Van Hall, 2010.

3.1. Filière anaérobie lactique : système glycolytique

Le système glycolytique est mobilisé dès les premières secondes de course, avant de devenir la principale source d'ATP, permettant ainsi de maintenir l'intensité de l'exercice (Hirvonen et al., 1992). Cette filière est pleinement efficace après 5 à 6 secondes d'exercice (Spriet, 1995; Maughan et al., 1997) et devient majoritaire pour les exercices à H-I d'une durée de 30 à 60 secondes pouvant de fait couvrir jusqu'à 60% des besoins énergétiques totaux lors d'un 400 m (D. W. Hill, 1999; Gajer et al., 2002). La synthèse de l'ATP repose donc sur une succession d'étapes biochimiques qui va dégrader le glycogène (réserve de glucose au sein du muscle) en pyruvate. À cette étape, le pyruvate peut soit entrer dans mitochondrie afin d'y être transformé en ATP (système aérobie), soit être converti dans le cytosol par l'enzyme lactate déshydrogénase (LDH) en lactate (système anaérobie lactique (Fig. 7).

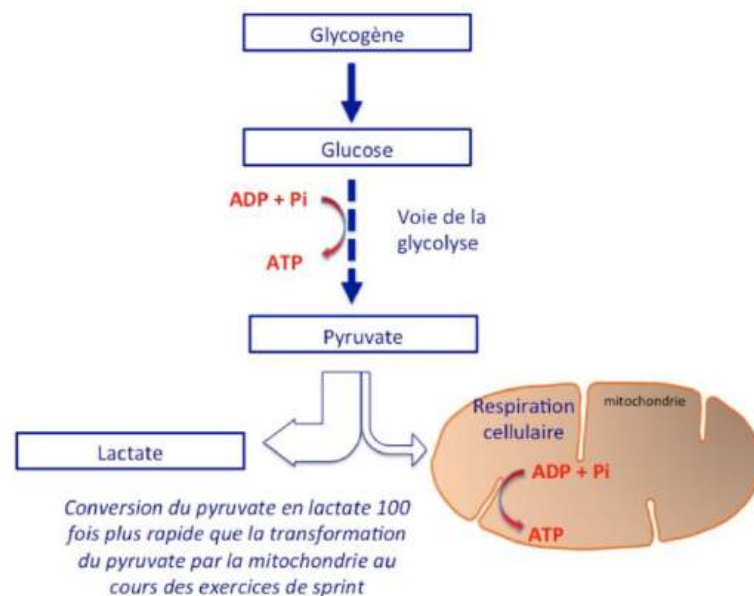


Figure 7 : Schéma de synthèse de la glycolyse conduisant à une production de pyruvate, qui sera soit transformé dans la mitochondrie soit transformé en lactate.

En ce qui concerne la filière anaérobie lactique, la succession d'étapes biochimiques nécessaires pour la dégradation du glycogène en pyruvate, puis en lactate, implique également la libération de protons et d'électrons qui sont pris en charge par un transporteur d'électrons (NAD^+) qui devient à son tour du NADH_2 . De plus, la réoxydation de ce dernier, indispensable dans l'objectif d'assurer de nouveau ses fonctions, peut se faire de deux manières différentes : soit par la mitochondrie, qui assure la prise en charge des électrons et des protons issus des NADH_2 , soit à partir du pyruvate et de sa transformation en lactate permise par l'action de l'enzyme LDH, dont l'activité enzymatique est cent fois plus rapide que l'enzyme limitante du cycle de Krebs, l'alpha-cétoglutarate déshydrogénase (Robergs et al., 2004).

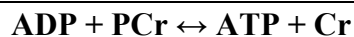
Cependant, la production de lactate résultant de la sollicitation de la glycolyse est également associée à la libération d'ions hydrogène (H^+) au niveau de l'hydrolyse de l'ATP non mitochondrial synthétisé par la glycolyse, et qui est proportionnelle à l'intensité de l'exercice. Cette production d'ions H^+ , dont la production excède la capacité d'élimination au cours d'un exercice à H-I, induit par ailleurs des perturbations de l'homéostasie impliquant par conséquent une acidose métabolique qui peut à terme inhiber l'activité contractile (Sahlin et al., 1976; Favero et al., 1995). Cet effet délétère pour la performance peut être compensé par les transporteurs du lactate qui transportent un proton pour une molécule de lactate, permettant ainsi par gradient de concentration de limiter l'acidose métabolique musculaire au cours de l'exercice (Brooks, 2000 ; Juel, 1997). En effet, au cours d'un exercice à H-I, les transporteurs du lactate, principalement les monocarboxylates transporters (MCT1 et MCT4), assurent le couplage du transport du lactate et des protons, participant ainsi à la régulation de l'acidose métabolique intra et extracellulaire (pour revue, Thomas et al., 2012; Brooks et al., 2023). Tout d'abord, les MCT4 sont prédominants dans les fibres glycolytiques (fibres rapides) et facilitent le transport du lactate vers le sang, où il peut ensuite être capté par d'autres tissus dont notamment les fibres musculaires oxydatives et le cœur (Thomas et al., 2005, 2012). À l'inverse, les MCT1, sont majoritairement présents dans les fibres oxydatives (fibres lentes) et favorisent le captage du lactate et son élimination en tant que substrat énergétique, via la conversion en pyruvate et son oxydation au sein des mitochondries (Thomas et al., 2005, 2012). À l'inverse, ce système, communément appelé « navette extracellulaire du lactate », est essentiel au maintien de l'homéostasie afin de retarder les effets de l'acidose métabolique au cours d'un 400 m (Brooks et al., 2000, 2018, 2023). Il assure non seulement une élimination efficace du lactate, mais également un maintien des performances musculaires en retardant la fatigue liée à l'accumulation des ions H^+ (Thomas et al., 2005, 2012). Ainsi, la production de lactate au cours de l'exercice H-I permet de maintenir le flux glycolytique et la production d'énergie subséquente, de réguler l'acidose métabolique au sein des fibres musculaire grâce aux cotransporteurs lactate/proton fonctionnant dans le sens du gradient de concentration, et d'apporter un substrat énergétique principalement aux fibres lentes (à 80%) pour y être oxydé à partir de sa conversion en pyruvate.

3.2. Filière aérobie : système oxydatif

Bien qu'elle soit généralement associée aux exercices d'endurance, la filière aérobie joue un rôle non négligeable lors des exercices de H-I comme le 400 m. Comme évoqué ci-dessus, ce système repose sur la dégradation du glycogène en pyruvate (glycolyse) mais contrairement à la filière anaérobie lactique, le pyruvate entre ensuite dans les mitochondries afin d'y être transformé et aboutir à la formation de 38 molécules d'ATP (système oxydatif). Ce système, qui contribue à la resynthèse de l'ATP en utilisant de l'oxygène, intervient dès le début de l'exercice afin de soutenir le système anaérobie. Sa contribution peut atteindre jusqu'à 94% de l'énergie totale nécessaire sur un 400 m (Hanon et al., 2010), avec certains athlètes atteignant leur niveau maximal. Par ailleurs, grâce à la respiration mitochondriale, ce système énergétique peut contribuer à la resynthèse des stocks de PCr ainsi qu'à la production d'ATP (Saks et al., 2000). De fait, malgré la fatigue musculaire et l'acidose métabolique, la filière aérobie contribue à prolonger l'exercice en apportant une énergie complémentaire indispensable pour maintenir la performance (Hill, 1999; Gajer et al., 2002).

3.3. Filière anaérobie alactique : système des phosphagènes

Dès le début de l'exercice, le système des phosphagènes assure une resynthèse efficace de l'ATP grâce à la dégradation de la phosphocréatine (PCr).



Cette filière, prépondérante dès les premières secondes d'exercice, assure la production d'énergie nécessaire pour un départ rapide en starting block, déterminant de la performance lors d'une course de 400 m. La PCr est donc rapidement mobilisée, atteignant son pic de dégradation dès les premiers instants de l'exercice, avant de diminuer progressivement. En effet, après environ 10 secondes, les réserves de PCr commencent à s'épuiser de manière significative (Hirvonen et al., 1992; Koziris, 2002) (Fig. 8).

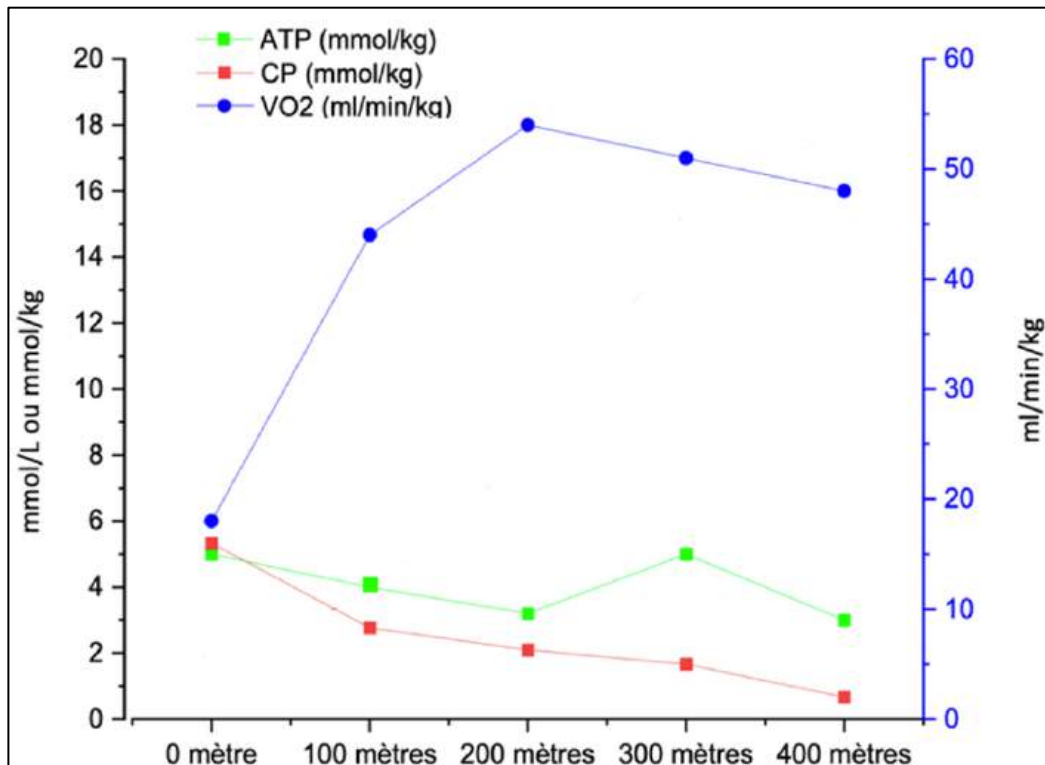
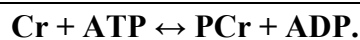


Figure 8 : Évolution de la concentration sanguine en ATP, en CP et du $\dot{V}O_{2max}$ au cours d'une course de 400 m (Schéma de synthèse d'après les études d'Hirvonen et al., 1992 et d'Hanon et al., 2010).

De fait, les stocks limités de PCr dans le muscle ne permettent pas de soutenir un exercice continu à H-I. Leur consommation dépasse rapidement leur capacité de resynthèse, entraînant une disponibilité réduite au-delà de la mi-course. Toutefois, les stocks de PCr peuvent être régénérés en continue dès-lors que le système aérobie contribue de manière significative à la couverture énergétique. En effet, la créatine (Cr) issue de la resynthèse de l'ATP par la dégradation de la PCr, se diffuse ensuite vers les mitochondries des fibres musculaires, site de la respiration mitochondriale (Saks et al., 2000). En consommant de l'oxygène, les mitochondries vont ainsi à leur tour produire de l'ATP permettant la réaction inverse (Fig. 9).



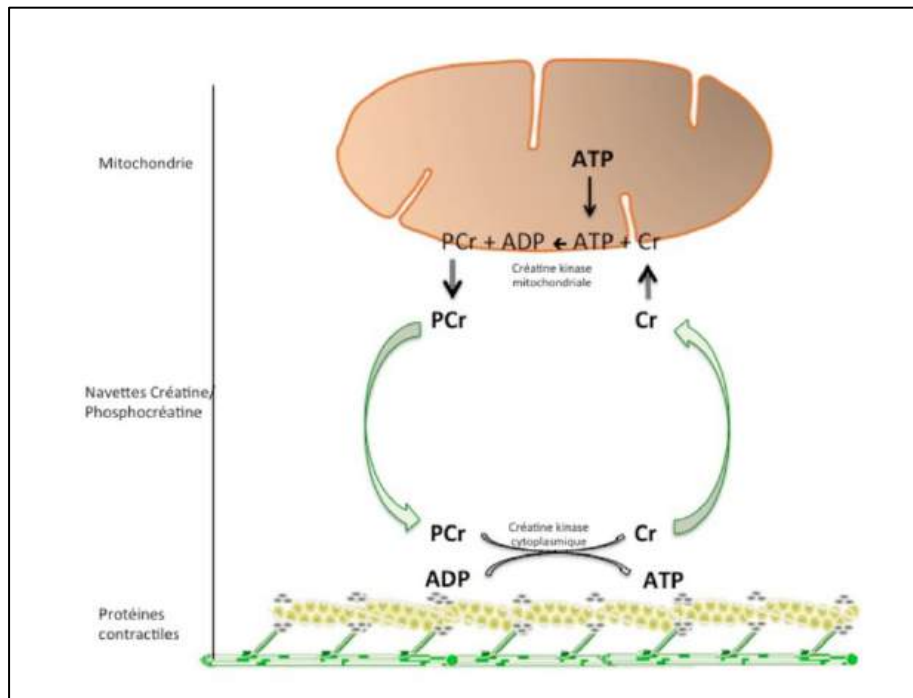


Figure 9 : Représentation schématique des navettes de la créatine, réalisé par C. Thomas d'après Saks et al., 2000.

Par conséquent, l'utilisation de la PCr ne se limite pas à quelques secondes au cours d'un 400 m, mais persiste au cours de l'exercice dès-lors le système aérobie est impliqué. Ainsi, bien que le filière anaérobie alactique ne peut assurer la totalité des besoins énergétiques au cours d'un 400 m, ce système demeure crucial afin d'apporter l'énergie nécessaire pour la contraction musculaire (Hirvonen et al., 1992).

4. Exercice à haute-intensité : perturbation de l'homéostasie et acidose métabolique

Comme évoqué ci-dessus, le débit élevé de l'hydrolyse de l'ATP non mitochondrial et la contribution importante des filières énergétiques lors d'un exercice à H-I entraînent des modifications métaboliques significatives. Ces perturbations s'accompagnent d'une accumulation de métabolites tels que les phosphates inorganiques (Pi), l'adénosine diphosphate (ADP) et les protons (H^+) (Allen et al., 2008). Ces perturbations peuvent notamment être suivies grâce à certains biomarqueurs sanguins, tels que le pH, la lactatémie et les concentrations en ions HCO_3^- (Louis et al., 2013; Couderc et al., 2017).

À l'issue d'un exercice à H-I de 30 secondes sur ergocycle, Hargreaves et al. (Hargreaves et al., 1998) ont par exemple observé une diminution significative du glycogène musculaire, de l'absorption du Ca^{2+} par le réticulum sarcoplasmique, de la PCr, de l'ATP tandis que la concentration de lactate musculaire augmentait. En effet, au cours d'un exercice à H-I, les perturbations de l'homéostasie peuvent induire une acidose métabolique, résultant de l'accumulation de métabolites et d'une altération de l'équilibre acido-basique (Nielsen et al., 1999; Westerblad et al., 2002; Clausen, 2003; Nielsen et al., 2004; Westerblad et al., 2002). Ces perturbations, bien que nécessaires dans l'objectif de produire l'énergie tout au long de l'exercice, représentent un défi majeur dans le maintien de l'intensité en raison de l'acidose métabolique et de ses conséquences sur la performance musculaire et (Hargreaves et al., 1998).

4.1. 400 m et conséquences neuro-musculaires

Par ailleurs, la course de 400 m implique également des contraintes au niveau du système neuro-musculaire, associées à une fatigue centrale et périphérique. La fatigue périphérique, prédominante à l'issue d'un exercice à H-I, se traduit par une altération du système excitation-contraction, limitant la capacité du muscle à se contracter efficacement (Hureau et al., 2016). À l'inverse, la fatigue centrale, bien que moins marquée après un exercice à H-I, est caractérisée par une réduction de la commande centrale (cortex moteur et motoneurones), une diminution de l'activité des neurotransmetteurs cérébraux et des fibres afférentes musculaires (Bigland-Ritchie et al., 1986; Carroll et al., 2017). Ce type de fatigue se manifeste notamment par une diminution de la capacité du système nerveux central à activer volontairement les muscles (Fig. 10).

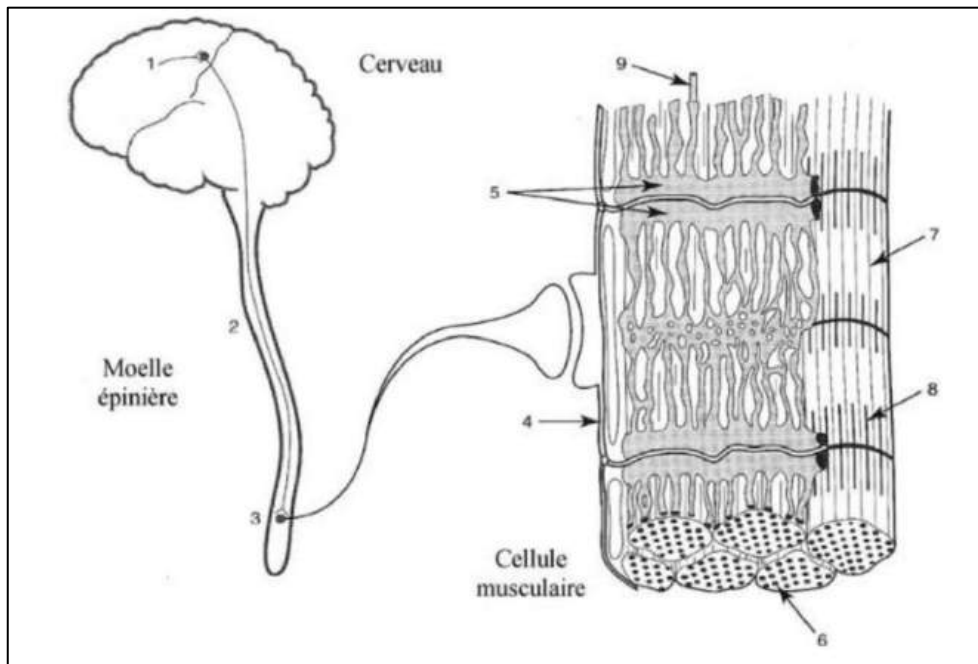


Figure 10 : Système neuromusculaire précisant les différents sites où peuvent survenir les altérations responsables de la fatigue neuromusculaire (Bigland-Ritchie 1981):
 (1) activation de l'aire primaire du cortex moteur ; (2) transmission de la commande par les voies pyramidales ; (3) activation des UM ; (4) propagation neuromusculaire ; (5) couplage excitation-contraction ; (6) disponibilités des substrats énergétiques ; (7) changements du milieu intracellulaire ; (8) flux sanguin.

La fatigue centrale peut également être influencé par des facteurs externes à l'exercice, tels que le stress psychologique ou encore le manque de sommeil (Tornero-Aguilera et al., 2022).

Ainsi, la combinaison complexe entre fatigue périphérique et centrale se traduit, notamment lors d'un 400 m, par des altérations mécaniques des différentes caractéristiques de la foulée de l'athlète (Hanon & Gajer, 2009) (Fig. 11).

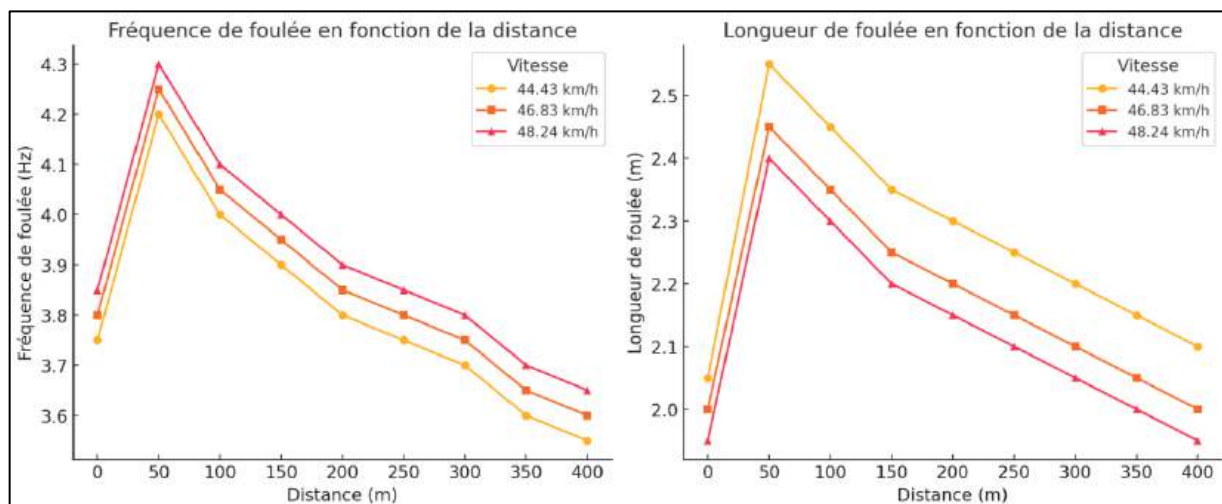


Figure 11 : évolution de la fréquence et de la longueur de la foulée en fonction de la distance au cours d'une course de 400 m chez des athlètes de niveau international, national et régional (d'après Hanon & Gajer 2009).

En effet, Tomazin et al., (2012) ont observé, après un sprint de 400 m réalisé par des étudiants sur ergomètre, une diminution progressive et significative du couple de force isométrique du genou, attribuable à une altération du couplage excitation-contraction. L'analyse EMG (électromyogramme) associée à cette altération a ainsi permis de mettre en évidence une potentielle fatigue centrale ainsi qu'une fatigue périphérique.

Ces observations concordent avec les travaux de Nummela et ses collaborateurs (Nummela et al., 1992), qui ont mis en évidence que durant les cent premiers mètres d'un 400 m, les propriétés contractiles des muscles squelettiques commençaient à changer, bien que la vitesse de course restât stable. Cependant, après 300m, ils ont constaté une réduction significative de la production de force, corrélée à une acidose métabolique (Nummela et al., 1992).

Ces perturbations au niveau du couplage excitation-contraction, associées à une fatigue périphérique, peuvent notamment se traduire par une réduction de l'amplitude des foulées (-11,5%) et de leur fréquence (-5,1%), particulièrement marquée durant les cent derniers mètres de course (Gajer et al., 2002; Hanon & Gajer, 2009) (Fig. 11).

4.2. 400 m et conséquences métaboliques au cours d'un 400 m

Lors d'une course de 400 m, l'athlète développe une puissance supra-maximale, dépassant largement les capacités de production énergétique de la filière aérobie (Hanon et al., 2010). La contribution majoritaire du système anaérobie peut ainsi être mise en évidence par différents biomarqueurs sanguins témoins des perturbations de l'homéostasie. En effet, Hirvonen et al., (1992) ont suivi certains biomarqueurs musculaires à l'aide de biopsies, tels que la PCr ou le lactate, chez des coureurs de niveau interrégional à national avant, pendant et après un 400 m, grâce à un découpage séquentiel de la course. Après seulement 200m, les concentrations musculaires de phosphocréatine (PCr) ont chuté de $15,8 \pm 1,7$ mmol/kg à $6,5 \pm 0,5$ mmol/kg, témoignant de l'épuisement rapide des réserves de cette filière énergétique. Conjointement, la lactatémie a significativement augmenté dès la première partie de course ($8,3 \pm 1,1$ mmol/kg), indiquant une sollicitation importante de la glycolyse anaérobie.

À la fin de l'exercice, les concentrations musculaires en ATP et PCr ont diminué respectivement de 27% et 89%, tandis que les niveaux de lactate musculaire avaient augmenté pour atteindre des concentrations de $17,3 \pm 0,9$ mmol/L. L'évolution de ces différents biomarqueurs souligne que le stress métabolique induit par ce type d'exercice est directement lié à l'épuisement des réserves de PCr et à l'accumulation maximale de lactate (Figure 12).

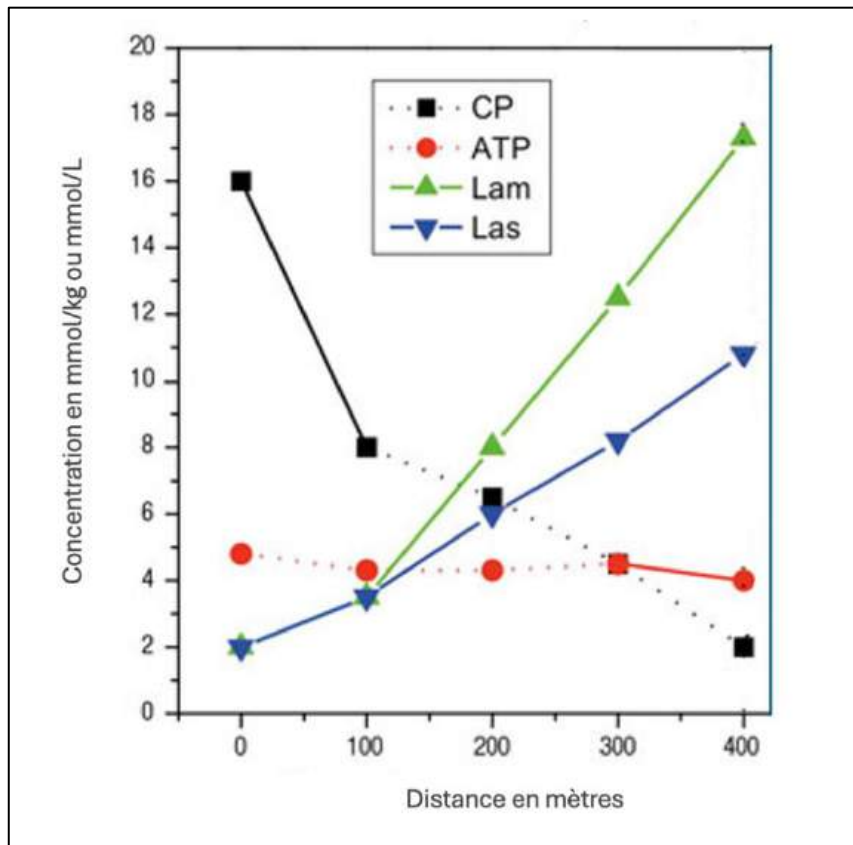


Figure 12 : Évolution de la CP et du lactate sanguin ainsi que de l'ATP et du lactate musculaire en fonction de la distance au cours d'un 400 m (d'après l'étude d'Hirvonen et al., 1992).

Outre ces perturbations de l'homéostasie, une étude complémentaire menée par Hanon et al., (2010) a révélé une chute significative du pH sanguin après un 400 m, passant de 7,39 avant la course à 7,0 jusqu'à 10 minutes après l'exercice. Cette diminution significative du pH sanguin est par conséquent le reflet d'une acidose métabolique induite par les exercices à H-I tels que le 400 m. Par ailleurs, Hanon et ses collaborateurs ont également démontré après un exercice de 300m à H-I, les athlètes élités spécialisés dans le 400 m présentaient une valeur de pH sanguin significativement plus basse que celle des athlètes de niveau régional à post-4min, reflétant une perturbation de l'homéostasie plus marquée et dépendant du niveau des sujets (Hanon et al., 2011). Ce résultat souligne l'intérêt d'inclure des athlètes de haut-niveau dès lors que nous souhaitons étudier spécifiquement les conséquences d'un exercice à H-I sur le plan métabolique.

5. Évolution des biomarqueurs sanguins à l'issue d'un exercice à haute-intensité

Comme mentionné précédemment, les exercices à H-I tels que le 400 m ont un impact significatif sur divers biomarqueurs physiologiques, reflétant ainsi des perturbations de l'homéostasie (pH : $7.00 \pm 0,04$; [La] : $21,00 \pm 1,9$ mmol/L ; $[\text{HCO}_3^-]$ $4,9 \pm 1,4$ mmol/L) (Hanon et al., 2010). Cependant, après un exercice à H-I, les biomarqueurs sanguins tels que la lactatémie ou le pH sanguin reviennent à leurs valeurs basales en moins de deux heures après l'arrêt de l'exercice physique (Freund & Gendry, 1978; Hanon, 2019).

Les cinétiques de ces biomarqueurs, généralement étudiés pour caractériser les exercices à H-I et la fatigue aiguë associée, montrent un retour à des valeurs basales en moins de vingt-quatre heures après l'exercice (Sagheer et al., 2023; H. J. Thomas et al., 2023) . Par exemple, à l'issue d'un exercice réalisé à 110% de la $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$, Robergs et ses collaborateurs (Robergs et al., 2005) ont démontré que la lactatémie, le pH sanguin et la concentration en HCO_3^- étaient revenus à leurs valeurs de pré-test 85 minutes après l'arrêt de l'exercice (Fig. 13).

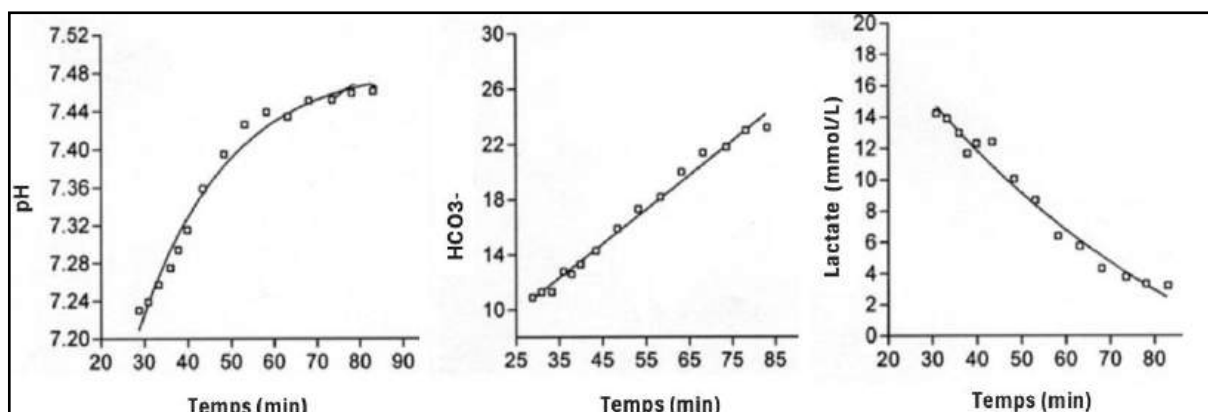


Figure 13 : Cinétiques de restauration du pH, des ions HCO_3^- et du lactate sanguin à l'issue d'un exercice à H-I sur ergocycle à 110% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ (schéma de synthèse d'après l'étude Robergs et al., 2005).

Ces résultats soulignent la capacité de l'organisme à restaurer rapidement son équilibre acido-basique et à éliminer les métabolites accumulés après un exercice intense, contribuant ainsi à une récupération physiologique efficace.

Ainsi, malgré le retour de ces biomarqueurs à des valeurs basales moins de deux heures après l'exercice, les athlètes de haut-niveau rapportent des difficultés à enchaîner leurs courses au niveau de leurs records personnels. Comme mentionné précédemment, cette difficulté, souvent rencontrée par les spécialistes des exercices à H-I lors de championnats, ne semble pas encore avoir été investiguée dans la littérature scientifique.

Au regard de la littérature citée ci-dessus, il convient de s'interroger sur la capacité des athlètes spécialistes des exercices à H-I à réitérer quotidiennement des performances au niveau de leur record et de solliciter efficacement leur système anaérobie durant trois jours consécutifs au cours d'une compétition.

PARTIE I : CE QU'IL FAUT RETENIR

⚠ Les **exercices à H-I continus**, à l'image du **400m en athlétisme** sollicitent principalement le système **anaérobie** et nécessitent un départ rapide suivi d'une **diminution progressive de la vitesse de course**.

→ Ce type d'exercice induit des **perturbations de l'homéostasie** comme en témoignent certains biomarqueurs sanguins tels que l'**accumulation de lactate** et d'**ions H^+** , responsables de l'**acidose métabolique**.

→ Ces **perturbations métaboliques** sont responsables d'une certaine **fatigue** qui est principalement **causée par l'acidose métabolique** (accumulation d'ions H^+ , baisse du pH sanguin et musculaire) ainsi que par une **altération du couplage excitation-contraction**.

→ Cette acidose **limite l'excitabilité** et la **contraction musculaire**, **affectant directement la performance** visible par une **diminution de la fréquence et de l'amplitude des foulées**.

⚠ Les **biomarqueurs sanguins** témoins des perturbations de l'homéostasie induit par les exercices à H-I **reviennent à leurs valeurs basales en moins de 2 heures**. Malgré **cette récupération physiologique**, les athlètes rencontrent des **difficultés à maintenir des performances optimales sur plusieurs jours**, soulignant l'existence de facteurs non explorés influençant la fatigue.

Aussi, une approche systémique, intégrant des marqueurs complémentaires, pourrait offrir une perspective prometteuse pour approfondir la compréhension des limitations liées à la performance. Cette démarche novatrice permettrait d'identifier avec précisions les mécanismes sous-jacents permettant d'expliquer les difficultés des athlètes à reproduire des performances maximale après des exercices répétés à H-I. Dans ce contexte, nous nous proposons d'explorer maintenant l'activité du système neuro-endocrinien et du système nerveux autonome face au stress psychophysiologique.

PARTIE II :
EXERCICES À HAUTE-INTENSITÉ ET STRESS
PSYCHOPHYSIOLOGIQUE

1. Caractéristiques du stress psychophysiologique induit par la compétition

Le stress est une notion complexe dont les effets intra-individuels sur l'organisme peuvent varier en fonction du contexte dans lequel il se manifeste. En raison de ses composantes cognitives et physiologiques, il est souvent décrit comme un phénomène psychophysiologique et peut être défini comme « un état de menace réelle ou perçue pour l'homéostasie, pouvant compromettre le bien-être d'un organisme » (Smith & Vale, 2006).

Dans le cadre de la compétition, l'environnement anxiogène auquel est soumis les athlètes de haut-niveau induit un stress psychophysiologique susceptible d'entraîner diverses perturbations. Celles-ci peuvent se manifester sous forme de changements comportementaux (Scott et al., 2015), psychologiques (Bolger et al., 1989) et physiologiques (Stults-Kolehmainen et al., 2014). De plus, il est fréquent d'observer une modulation biologique en réponse au stress, incluant des dérégulations de l'activité inflammatoire (Schneiderman et al., 2005).

Par conséquent, le stress psychophysiologique peut avoir des répercussions physiologiques, se manifestant notamment par des altérations du système neuro-endocrinien (SNE) et du système nerveux autonome (SNA) (Tsigos & Chrousos, 2002; Esquivel et al., 2011; Guilhem et al., 2015). Ces réactions, en réponse au stress, illustrent la complexité des mécanismes d'adaptation de l'organisme face aux sollicitations de son environnement.

2. Exemple des championnats d'Europe d'athlétisme de Berlin (2018)

Dans cette perspective, et dans le cadre d'une mission d'accompagnement scientifique de la Fédération Française d'Athlétisme (FFA), notre équipe a mené, sous la direction du Dr Mounir Chennaoui une étude préliminaire lors des Championnats d'Europe d'athlétisme à Berlin en 2018. Quatre athlètes volontaires, membre de l'équipe de France d'athlétisme et spécialistes des épreuves de 400 m et de 800 m, nous ont permis de recueillir leurs concentrations salivaires en testostérone et en cortisol le matin avant leurs différentes courses (Course 1 : série ; Course 2 : demi-finale ; Course 3 : finale) (Chennoui M, Drogou C, personal data). Ces résultats préliminaires ont permis d'identifier des perturbations de l'homéostasie au cours de la compétition, se traduisant par une modification de l'activité du système neuro-endocrinien.

Au cours de ce championnat, nous avons observé une diminution des niveaux de testostérone et de cortisol le matin de la deuxième course (Pré-Course 2 : -4,88% et -6,59%) ainsi que le matin de la troisième course (Pré-Course 3 : -19,61% et -41,49%) en comparaison avec les

mesures réalisées le matin du premier jour de compétition (Pré-Course 1 : 100%), témoignant d'une incapacité des athlètes à revenir à leurs valeurs basales au cours de la compétition. Bien que ces données n'aient pas donné lieu à une publication scientifique, à cause d'un nombre trop faible de participants et d'une méthodologie insuffisamment standardisée (passage en zone mixte/media, protocole de récupération), nos résultats mettent en évidence les effets potentiels d'un stress cumulé associé à la compétition (Fig. 14).

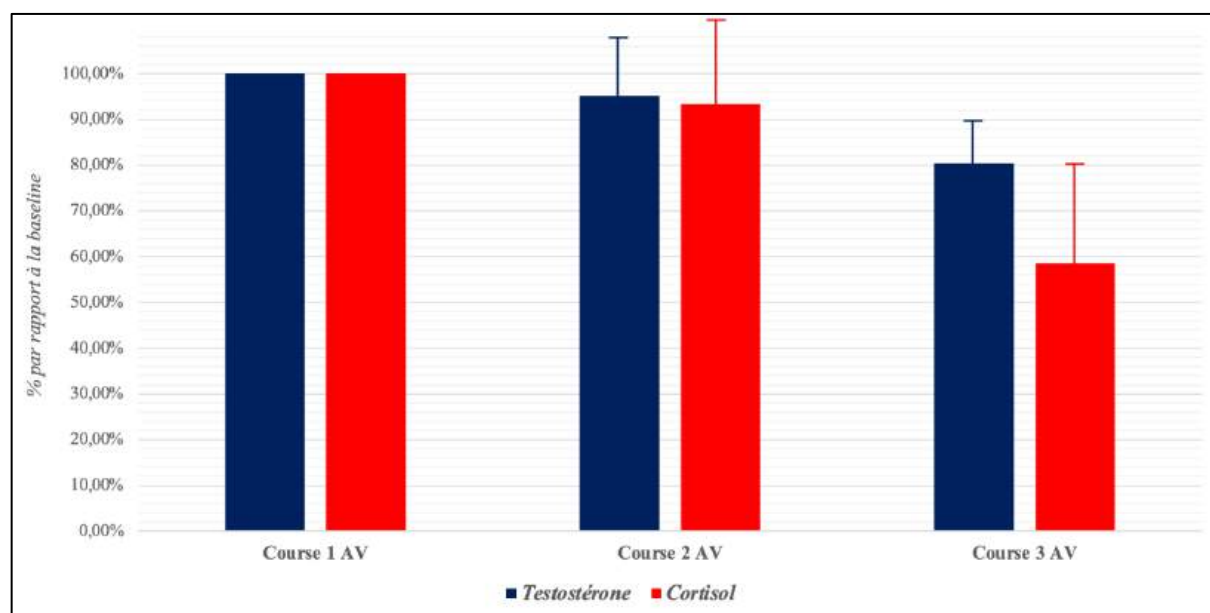


Figure 14 : Évolution du taux de testostérone et de cortisol salivaire, lors des championnats d'Europe d'athlétisme de Berlin en 2018, exprimés en % de la valeur de référence obtenue avant la première course. Données recueillies auprès de 4 athlètes membres de l'Équipe de France d'Athlétisme (données FFA non publiées).

En plus du stress induit par l'exercice à H-I, la compétition pourrait également générer un stress psychophysiologique capable de perturber l'activité du système neuro-endocrinien. Ces résultats préliminaires soulignent l'importance de prendre en compte les conséquences d'une compétition sur des biomarqueurs témoins du stress psychophysiologique, dans la perspective de mieux caractériser ces effets chez les athlètes de haut-niveau.

3. Système neuro-endocrinien et stress psychophysiologique

Le système neuro-endocrinien (SNE) est une interface entre le système nerveux et le système endocrinien. Il se compose notamment de l'hypothalamus, qui agit comme centre de régulation, et de l'hypophyse, qui relaye ses signaux afin de stimuler diverses glandes endocrines périphériques, telles que la thyroïde, les glandes surrénales, et les gonades. Par ailleurs, le SNE, qui intègre également le système nerveux autonome (SNA), a pour objectif de maintenir l'homéostasie et de réguler les réponses au stress et aux inflammations (Stratakis & Chrousos, 1995).

En réponse au stress induit par un exercice à H-I, le SNE sollicite dans un premier temps la branche sympathique via l'activité du SNA. Cette activité sympathique stimule les médullosurrénales, entraînant la libération des catécholamines (adrénaline et noradrénaline) dans le sang. Les catécholamines jouent un rôle majeur, notamment sur le plan métabolique, en favorisant la glycogénolyse afin de répondre aux besoins accrus en ATP (Kjaer et al., 1993).

Dans un second temps, le stress induit par un exercice à H-I provoque des adaptations à moyen terme de l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien (HPA). L'activation simultanée de l'hypothalamus induit la sécrétion de la corticotropin-releasing hormone (CRH), qui stimule à son tour l'hypophyse, entraînant la libération de l'adrenocorticotrop hormone (ACTH) pour activer les glandes surrénales. Cette activation des glandes surrénales conduit à la production de glucocorticoïdes, tels que le cortisol, qui agit comme un régulateur multifonctionnel. L'axe HPA agit ainsi pour prolonger et réguler les adaptations initiées par le SNA en réponse à un exercice à H-I.

À l'issue d'un exercice à H-I, le système neuro-endocrinien et le SNA, via sa branche parasympathique, fonctionnent en synergie pour préserver l'homéostasie en réduisant l'activité sympathique. Cependant, une exposition excessive au stress peut déséquilibrer l'activité du SNE, ce qui peut, à terme, être délétère pour la récupération et la performance des athlètes.

Afin d'évaluer les effets du stress sur l'activité du SNE, le suivi des marqueurs salivaires semble nécessaire pour étudier ces réponses nerveuses, hormonales et immunitaires.

3.1. Stress psychophysiologique et biomarqueurs salivaires

3.1.1. Le Cortisol

A) Effets d'un exercice à haute-intensité

Le cortisol salivaire, produit par les glandes surrénales en réponse au stress, est souvent utilisé comme biomarqueur non invasif pour évaluer les réponses induites par l'exercice (Chennaoui et al., 2016; VanBruggen et al., 2011).

Lors d'un exercice physique, la sollicitation de l'axe HPA déclenche une augmentation significative du cortisol, proportionnelle à l'intensité de l'exercice (Kuoppasalmi et al., 1980). VanBruggen et al., (2011) ont mis en évidence une augmentation de 170% du cortisol salivaire immédiatement après un exercice réalisé à 80% du $\dot{V}O_2\text{max}$, avec un pic survenant 30 minutes après l'exercice, durant la récupération (VanBruggen et al., 2011). De plus, Bonato et al., (2017) ont observé une augmentation marquée du cortisol salivaire après des exercices intermittents de H-I, avec des variations selon le moment de la journée et le chronotype des participants. Les athlètes ayant un chronotype « soir » présentent généralement des concentrations de cortisol salivaire plus élevées après un exercice à H-I réalisé le matin, en comparaison à ceux de type « matin ». En revanche, il ne semble pas y avoir d'incidence du chronotype sur les concentrations salivaires à l'issue d'exercices à H-I réalisés le soir (Bonato et al., 2017).

Le rythme circadien, qui détermine en grande partie le chronotype, joue un rôle crucial dans la sécrétion de cortisol, ce qui implique que le moment du prélèvement est essentiel pour l'interprétation des résultats (Thomas et al., 2020; Vitale & Weydahl, 2017). Par ailleurs, les chronotypes et le rythme circadien qui leur est associé peuvent être influencés par l'heure à laquelle l'exercice physique est réalisé (Montaruli et al., 2017).

En réponse à un exercice à H-I, les concentrations de cortisol salivaire augmentent immédiatement, suivies d'un retour progressif aux niveaux basaux durant la récupération. La régulation de l'activité de l'axe HPA en post-exercice permet un retour du cortisol salivaire à des valeurs basales environ trois heures après un exercice à H-I (Kilian et al., 2016). Cependant, l'intensité et la durée de l'exercice peuvent moduler les réponses du cortisol. Les exercices intermittents à H-I semblent induire des réponses de cortisol salivaire plus élevées que les exercices continus à basse intensité, en raison d'une demande métabolique et cardiorespiratoire plus importante (Kilian et al., 2016).

B) Effets de la compétition

La compétition sportive induit une augmentation du cortisol salivaire, reflet de l'activité de l'axe HPA. Cette activation est déclenchée par le stress psychophysiologique associé aux exigences de la compétition. Toutefois, les réponses du cortisol salivaire varient en fonction du type de sport, du niveau des athlètes, de leur sexe et de leur gestion de la performance, révélant la complexité de l'interaction entre le stress compétitif et les réponses hormonales.

Dans les sports collectifs, Mortatti et al., (2012) ont montré que de jeunes footballeurs participant à un tournoi national présentaient des niveaux de cortisol salivaire significativement augmentés avant chaque match. Ces niveaux sont restés élevés tout au long de la compétition, reflétant l'impact cumulatif des charges physiques et psychologiques dans un contexte compétitif dense. Des variations similaires, mais spécifiques aux sports individuels, ont également été observées. Par exemple, dans le triathlon, Balthazar et al., (2012) ont rapporté des niveaux de cortisol significativement plus élevés le matin de la compétition par rapport aux jours de repos. Cette élévation anticipée illustre une mobilisation des ressources physiologiques nécessaires pour répondre aux exigences d'exercices prolongés et intensifs.

De manière complémentaire, Hooshmand et al., (2022) ont rapporté une élévation importante du cortisol salivaire chez de jeunes nageurs d'élite 30 minutes avant une compétition. Cependant, cette augmentation n'était pas corrélée aux niveaux d'anxiété, suggérant que d'autres facteurs, comme l'intensité perçue de la compétition, pourraient jouer un rôle central dans la modulation hormonale. Par ailleurs, même en l'absence de compétition réelle, Haussmann et al., (2007) ont démontré qu'une compétition simulée en gymnastique artistique suffisait à provoquer une augmentation marquée du cortisol salivaire, confirmant que l'anticipation et le stress psychophysiologique activent l'axe HPA.

Le sexe des athlètes apparaît également comme un facteur déterminant dans les variations du cortisol salivaire en réponse à une compétition. Filaire et al., (2009) ont constaté que les joueuses de tennis présentaient des niveaux de cortisol salivaire significativement plus élevés que leurs homologues masculins tout au long de la compétition. De manière similaire, Chennaoui et al., (2016) ont observé des élévations plus marquées chez les nageuses que chez les nageurs lors de championnats nationaux. Ces différences peuvent être attribuées à des variations hormonales, mais aussi à une perception différenciée des enjeux compétitifs selon le sexe des athlètes.

En outre, la relation entre le cortisol salivaire et la performance sportive semble différer selon le niveau de la compétition et l'expertise des athlètes. Par exemple, chez les haltérophiles

olympiques, Crewther et al., (2011) ont mis en évidence une augmentation de 130% du cortisol salivaire associée à de meilleures performances lors de compétitions réelles comparées à des compétitions simulées. Cette réponse hormonale semble refléter une adaptation favorable, permettant aux athlètes d'élite de mobiliser leurs ressources énergétiques et de maintenir un état d'alerte optimal (Balthazar et al., 2012)

Cependant, Filaire et al. (2008) ont noté que, chez les joueurs de tennis, les perdants présentaient des niveaux de cortisol (le matin au réveil) significativement plus élevés que les gagnants. Ces résultats suggèrent qu'une réponse excessive ou mal gérée au stress compétitif peut compromettre la performance, probablement en raison d'une anxiété accrue et d'une gestion inefficace de la pression compétitive (Filaire et al., 2008).

Ainsi, les variations du cortisol salivaire en réponse à une compétition sportive mettent en évidence l'interaction complexe entre les facteurs physiques, psychologiques et hormonaux qui influencent la performance. Si le cortisol peut agir comme un médiateur favorable dans certains contextes, facilitant la mobilisation des ressources nécessaires à l'exercice, une réponse excessive ou mal régulée peut avoir des effets délétères.

3.1.2. La Testostérone

A) Effets d'un exercice à haute-intensité

La testostérone salivaire est un biomarqueur essentiel pour suivre les fluctuations hormonales en réponse aux exercices à H-I, qui sollicitent fortement les systèmes métabolique et endocrinien (Hayes et al., 2015; Monje et al., 2020).

Les exercices à H-I induisent une augmentation marquée et immédiate des niveaux de testostérone salivaire. Dans ce contexte, Kraemer et al., (2003) ont observé que des exercices intermittents atteignant 100% du $\dot{V}O_2\text{max}$ provoquent une élévation notable des concentrations de testostérone. Cette augmentation semble directement corrélée à l'intensité de l'exercice, comme l'ont souligné Lane et al., (2014) à l'issue d'exercices d'intensité modérée et élevée.

Bien que cette augmentation soit maintenue durant les 30 minutes suivant l'effort, les concentrations de testostérone salivaire reviennent à des valeurs basales dans l'heure qui suit, reflétant une régulation rapide du SNE (Hough et al., 2021). L'intensité et le volume de l'exercice influencent également ces réponses. Les exercices d'endurance continue produisent des élévations moins marquées par rapport aux exercices à H-I, en raison des sollicitations métaboliques et hormonales spécifiques à chaque type d'effort (Ntovas et al., 2022).

Par ailleurs, les variations circadiennes exercent une influence significative sur les concentrations de testostérone salivaire. Hayes et al., (2015) ont rapporté que les exercices réalisés le matin entraînent des augmentations plus marquées, attribuées à des niveaux de base plus élevés en début de journée.

B) Effets de la compétition

Malgré un nombre important d'études sur les effets de la compétition sur les concentrations salivaires de testostérone, les résultats demeurent controversés en raison des nombreux facteurs pouvant influencer ces concentrations, tels que le sexe, le moment du recueil, l'influence du résultat final, ou encore le type et le cadre de l'activité physique réalisée (Geniole et al., 2017). La compétition semble induire une augmentation significative de la testostérone salivaire, chez les hommes comme chez les femmes, avant, pendant et après les compétitions (Geniole et al., 2017). Filaire et al., (2009) ont notamment observé une augmentation anticipée des niveaux de testostérone salivaire chez des joueurs de tennis avant leurs matchs. Ces augmentations pourraient être associées à des périodes de préparation optimisée, notamment en raison d'une diminution de la charge d'entraînement. Ce phénomène a également été rapporté par Guilhem et al., (2015) chez des athlètes élites en athlétisme, avec une augmentation de 9 à 15% de la testostérone pendant la phase précompétitive. De plus, Elloumi et al., (2003) ont mis en évidence une augmentation de la testostérone persistant jusqu'à cinq jours après une compétition de rugby, reflétant une phase anabolique visant à restaurer l'homéostasie après l'exercice.

Par ailleurs, la concentration de testostérone salivaire semble également influencée par le résultat de la compétition, notamment à travers « l'effet gagnant », selon lequel les vainqueurs présentent une élévation durable de leurs niveaux de testostérone. À l'inverse, les perdants peuvent observer une diminution de ces niveaux, comme l'ont démontré Zilioli et al., (Zilioli & Watson, 2012, 2014). Cependant, certaines études, comme celle de Hamilton et al., (2009), n'ont pas trouvé de différences significatives entre gagnants et perdants, suggérant que d'autres facteurs, tels que la perception subjective de la compétition, influencent ces réponses hormonales.

Enfin, le type d'exercice (sport individuel ou collectif) ainsi que le contexte lié à la motivation peuvent également moduler les réponses de la testostérone salivaire (Mehta et al., 2009).

3.1.3. L'alpha-Amylase

A) Effets d'un exercice à haute-intensité

L'alpha-amylase salivaire est une enzyme produite par les glandes salivaires et considérée comme un biomarqueur de l'activité du système nerveux autonome (SNA), plus spécifiquement de la branche sympathique. Sa concentration salivaire permet d'évaluer de manière non invasive le stress physiologique et les réponses métaboliques induites par l'exercice physique (Chicharro et al., 1998; Druică et al., 2018).

La sécrétion d'alpha-amylase est principalement régulée par les voies sympathiques adrénergiques. Une activité physique intense stimule la libération de catécholamines, activant ainsi les glandes salivaires et augmentant les concentrations d'alpha-amylase salivair (Ntovas et al., 2022). En effet, Chicharro et al., (1998) ont montré une corrélation significative entre l'intensité de l'exercice et les niveaux d'alpha-amylase salivaire, avec une augmentation marquée au-delà du seuil anaérobie, attribuée à une activité sympathique accrue (Chicharro et al., 1998 ; Ntovas et al., 2022).

Les concentrations d'alpha-amylase augmentent également en réponse à un exercice à H-I. De fortes élévations ont été rapportées pendant et immédiatement après un exercice intermittent à H-I. Ces augmentations sont corrélées à l'intensité et à la durée de l'exercice (Druică et al., 2018). Les niveaux d'alpha-amylase atteignent un pic juste après l'exercice, avant de revenir progressivement à des valeurs basales au cours de la période de récupération (Neves et al., 2023).

Par ailleurs, les exercices à H-I entraînent des augmentations des concentrations d'alpha-amylase plus importantes que les exercices à dominante aérobie. Cette différence s'explique par une demande métabolique accrue et une activation renforcée de la branche sympathique lors de ce type d'effort particulièrement intense (Druică et al., 2018).

Le moment de la journée influence également de manière significative les niveaux d'alpha-amylase. Les exercices effectués en soirée ont tendance à entraîner des concentrations plus élevées d'alpha-amylase après l'effort, en raison d'une sensibilité accrue de l'activité sympathique en fin de journée (Chicharro et al., 1998). De plus, le sexe, l'âge et le niveau d'entraînement modulent également les concentrations d'alpha-amylase en réponse aux exercices à H-I, avec une variabilité plus importante observée chez les individus moins entraînés (Neves et al., 2023).

Par conséquent, un exercice à H-I induit des perturbations du SNE impliquant des modifications des concentrations salivaires en cortisol, testostérone et alpha-amylase, modulées par

l'intensité, le type d'exercice et les facteurs chronobiologiques. Cependant, l'ensemble de ces marqueurs salivaires tend à revenir à leur niveau basal dans l'heure qui suit l'arrêt de l'exercice à H-I.

B) Effets de la compétition

La compétition semble également induire une augmentation marquée des niveaux d'alpha-amylase salivaire comparativement à des situations non compétitives ou de repos. Cette augmentation reflète une activation rapide de la branche sympathique en réponse aux exigences physiques et psychologiques élevées.

Kivlighan et Granger (2006) ont mis en évidence une augmentation de 156% des concentrations d'alpha-amylase au cours d'une épreuve d'ergomètre chez des rameurs universitaires. De manière similaire, De Pero et al., (2021) a observé des résultats comparables lors de compétitions chez des athlètes de TeamGym, en comparaison avec des séances d'entraînement ou des jours de repos.

L'anxiété associée à la compétition joue également un rôle majeur dans l'élévation des niveaux d'alpha-amylase. Par exemple, chez des archers d'élite, des niveaux plus élevés d'anxiété avant la compétition ont été corrélés à des augmentations significatives des concentrations d'alpha-amylase, mettant en évidence une relation directe entre le stress psychologique et l'activation physiologique (Lim, 2018). Cependant, l'activation de la branche sympathique semble s'atténuer rapidement après l'effort. Comme l'ont montré les travaux de Capranica et al., (2017), les concentrations maximales d'alpha-amylase observées après les combats chez des athlètes de taekwondo sont revenues à des niveaux de repos 30 minutes après l'effort.

Le niveau d'expérience des athlètes influence également les réponses de l'alpha-amylase en contexte compétitif. Une étude réalisée sur des patineuses élités a révélé des concentrations d'alpha-amylase significativement plus élevées avant et pendant la compétition, comparées à celles de leurs homologues amateurs (Dehghan et al., 2019). Ce phénomène pourrait s'expliquer par une réponse anticipée des athlètes expérimentés, liée à un meilleur conditionnement physiologique et psychologique (Kivlighan & Granger, 2006), ainsi qu'à l'enjeu de la compétition. Une augmentation plus marquée de l'alpha-amylase semble également corrélée positivement à de meilleures performances compétitives, soulignant son rôle clé dans la gestion du stress psychophysiologique (Kivlighan & Granger, 2006). En outre, l'alpha-amylase apparaît comme un biomarqueur plus sensible que le cortisol pour évaluer les stress compétitifs, renforçant son importance dans ce domaine (Mehrsafar et al., 2020).

En somme, la compétition induit une augmentation significative des concentrations d'alpha-amylase, reflétant l'activation du système sympathique et une réponse au stress psychophysiologique. Ces variations sont influencées par des facteurs tels que le niveau d'anxiété et l'expérience des athlètes. L'analyse et l'interprétation de ces variations offrent des informations essentielles sur les réponses au stress induit par la compétition et peuvent contribuer à l'optimisation des stratégies de gestion du stress chez les sportifs.

Les réponses des marqueurs salivaires face aux exercices à H-I et à la compétition mettent en évidence des changements dans l'activité du système neuro-endocrinien (Fig. 15). Les variations des niveaux de cortisol, de testostérone et d'alpha-amylase permettent de suivre les réponses au stress psychophysiologique, influencées par l'intensité de l'effort, les exigences compétitives et des facteurs individuels (chronotype, expérience, sexe).

Cependant, malgré ces avancées, il reste peu d'études explorant les effets cumulatifs de compétitions impliquant des enchaînements d'exercices à H-I sur ces biomarqueurs chez des athlètes de haut-niveau. Une exploration plus approfondie pourrait enrichir les stratégies de préparation et de récupération dans le sport de compétition.



Figure 15 : Schéma de synthèse des réponses des différents marqueurs salivaires faces au stress induit par un exercice à haute-intensité et par la compétition.

Le SNA partie intégrante du SNE, joue également un rôle important dans la régulation du stress au cours d'un exercice H-I. Les changements d'activité en réponse à l'exercice impliquent principalement l'activation de la branche sympathique, accompagnée d'une diminution de l'activité parasympathique, le tout pouvant être monitoré par le suivi de la variabilité de la fréquence cardiaque.

4. Exercices à haute-intensité et système nerveux autonome

4.1. Monitoring de l'activité du système nerveux autonome grâce à la variabilité de la fréquence cardiaque

La mesure de VFC (Variabilité de la Fréquence Cardiaque) est un outil de suivi couramment utilisé pour monitorer l'activité du système nerveux autonome (SNA), en particulier l'équilibre entre ses branches sympathique et parasympathique. En mesurant les variations des intervalles R-R (entre battements cardiaques), la VFC permet de monitorer indirectement le contrôle autonome de l'activité cardiaque ainsi que la régulation cardiovasculaire (Malik., 1996 ; Schmitt, Regnard and Millet, 2015; Manresa-Rocamora et al., 2021) (Fig. 16).



Figure 16 : Enregistrement d'électrocardiogramme représentant le temps entre chaque intervalle RR (Saboul 2013)

Tout d'abord, les mesures dans le domaine temporel permettent de quantifier la variabilité de la fréquence cardiaque en analysant les intervalles entre chaque battement sur une période définie. Les indices couramment utilisés incluent le SDNN (Standard Deviation of R-R Intervals), le RMSSD (Root Mean Square of Successive Differences) et le pNN50 (proportion des différences entre intervalles RR successifs dépassant 50 ms). Ces indices sont associés à l'activité parasympathique (Malik 1996 ; Schmitt et al., 2015).

Par ailleurs, le domaine fréquentiel analyse la répartition de la puissance du signal dans différentes bandes de fréquence, permettant de distinguer les composantes sympathiques (basses fréquences) et parasympathiques (hautes fréquences) du contrôle autonome. Les

mesures fréquentielles, telles que la puissance en basses fréquences (LF) et en hautes fréquences (HF), sont particulièrement utiles pour évaluer l'équilibre sympatho-vagal. (Makivić et al., 2013; Schmitt et al., 2015).

<i>Domaine</i>	<i>Nom du marqueur</i>	<i>Description</i>
Temporel	Mean RR (FC) bpm)	Fréquence cardiaque moyenne
	SDNN (ms)	Variabilité globale
	RMSSD (ms)	Variabilité court terme (parasymphathique)
	pNN50 (%)	Variabilité court terme (parasymphathique)
Non-linéaire	SD1 (ms)	Variabilité court terme (parasymphathique)
	SD2 (ms)	Variabilité globale
	VLF (ms ²) [0-0,04) Hz	Très basses fréquences (mécanisme long terme comme la thermorégulation)
Fréquentiel	LF (ms ²) [0,04-0,15) Hz	Basses fréquences (parasymphathique et sympathique)
	HF (ms ²) [0,15-0,4) Hz	Hautes fréquences (parasymphathique)
	TP (m ²) [0-0,4) Hz	Variabilité globale
	LF/HF	Balance sympathovagale

Tableau 4 : synthèse des principaux marqueurs de la variabilité de la fréquence cardiaque (Saboul 2013)

La VFC offre un suivi non invasif et peu coûteux de la fatigue et de l'état de récupération des athlètes, ce qui en fait un outil particulièrement utile dans le domaine du sport de haut-niveau

(Pichot et al., 2002 ; Schmitt et al., 2015). L'activité du SNA est également influencée par le rythme circadien, ce qui engendre de fortes variations au cours de la journée, ainsi qu'entre les phases diurnes et nocturnes (Huikuri et al., 1990 ; Sammito et al., 2016). Par conséquent, la période d'enregistrement et le type de test réalisé ont une incidence significative sur l'activité du SNA et l'analyse du signal (Massin et al., 2000). Tout d'abord, le recueil du signal durant la nuit (VFC nocturne) permet de minimiser les interférences liées au stress mental et à l'activité physique diurne. Ce type de méthode, fiable et sensible, détecte les changements d'activité du système nerveux autonome (SNA), notamment après un exercice physique (Nuuttila et al., 2022). Par ailleurs, le recueil du signal au cours d'un test réalisé en position couchée est couramment utilisé pour mesurer l'influence de l'activité parasympathique sur le SNA (Aftyka et al., 2023). Bien que cette approche soit indispensable pour obtenir des mesures précises et fiables de la VFC, elle ne permet pas d'évaluer l'influence du système sympathique sur l'activité du SNA (Malik, 1996). Enfin, le test d'inclinaison (Tilt Test ou test orthostatique) impliquant un changement de posture (enregistrement du signal en position couchée puis debout), est également largement utilisés pour évaluer les réponses autonomes à travers les variations de la VFC (Cottin et al., 2004). Ce type de test donc une méthode précieuse pour évaluer l'équilibre du SNA en au stress orthostatique Pawlowski et al., 2021).

4.2. Influence d'un exercice à haute-intensité sur le système nerveux autonome

Comme mentionné précédemment, les exercices à H-I exercent une influence marquée sur le SNA, sollicitant particulièrement sa branche sympathique pour répondre aux exigences énergétiques accrues (Pierpont et al., 2000). En réponse à un exercice à H-I, le SNA active la branche sympathique, entraînant une libération accrue de catécholamines (adrénaline et noradrénaline). Cette activation favorise des adaptations cardiovasculaires essentielles, telles que l'augmentation de la fréquence cardiaque, l'accélération du débit cardiaque et la redistribution du flux sanguin vers les muscles actifs.

L'exercice à H-I induit ainsi une prédominance de l'activité sympathique au détriment de l'activité parasympathique. Ce basculement vers une dominance sympathique, accompagné d'une suppression parasympathique, constitue un mécanisme clé pour maintenir la performance lors d'efforts intenses (Buchheit et al., 2007).

Cependant, une sollicitation excessive et prolongée de la branche sympathique peut engendrer une fatigue aiguë, affectant négativement les capacités de récupération. Une récupération insuffisante du SNA, caractérisée par une reprise incomplète de l'activité parasympathique,

peut compromettre la capacité de l'organisme à répéter des exercices intenses. Cela souligne l'importance de stratégies adaptées pour moduler l'activité autonome et optimiser la récupération après un exercice à H-I, garantissant ainsi une performance durable et la prévention des déséquilibres autonomes.

4.3. Resynchronisation du système nerveux autonome et influence du niveau de pratique

Le délai de resynchronisation du SNA après un exercice à H-I, en particulier la réactivation de la branche parasympathique, dépend de plusieurs facteurs, notamment de l'intensité de l'exercice et du niveau d'entraînement des athlètes (Seiler et al., 2007). Plus l'exercice est intense, plus le délai de récupération du SNA est long. Les athlètes bien entraînés semblent récupérer plus rapidement que leurs homologues moins entraînés, grâce à une meilleure adaptation de leur SNA aux exigences physiques élevées (Seiler., 2007). En effet, ces athlètes développent une capacité accrue à réactiver le système parasympathique après l'exercice, bien qu'il soit difficile de déterminer si cette aptitude résulte d'une adaptation à l'entraînement ou d'une caractéristique intrinsèque.

Par ailleurs, un système cardiovasculaire mieux entraîné (caractérisé par une bradycardie de repos et une augmentation du volume systolique) permet de répondre plus efficacement aux besoins métaboliques pendant l'exercice et d'accélérer la récupération, réduisant ainsi la durée d'activation excessive du système sympathique. Cependant, chez les athlètes d'élite, ce délai de récupération à moyen terme pourrait être allongé, malgré leur système cardiovasculaire plus performant, en raison des perturbations métaboliques plus importantes induites par un exercice à H-I (Hanon et al., 2011).

La majorité des études montrent que la resynchronisation parasympathique peut prendre de 24 à 48 heures après un exercice à H-I, en fonction de l'intensité de l'effort et de la condition physique de l'athlète (Peçanha et al., 2017). Par exemple, James et al., (2012) ont observé que les marqueurs de la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) revenaient à leurs valeurs initiales 24 heures après des exercices sous-maximaux réalisés par des sujets modérément entraînés.

Dans l'ensemble, le niveau de pratique et la capacité aérobie de l'athlète influencent fortement la rapidité de la resynchronisation du SNA. Les athlètes ayant un $\dot{V}O_{2max}$ élevé récupèrent généralement plus rapidement, car leur SNA est mieux conditionné pour tolérer les fluctuations autonomes induites par l'exercice intense (Makivić et al., 2013). À l'inverse, les athlètes moins

entraînés ou soumis à des charges d'exercice intenses de manière irrégulière montrent souvent un retour plus lent aux valeurs basales de la VFC (Buchheit et al., 2007).

En somme, le suivi de la VFC constitue un outil précieux pour monitorer l'activité du SNA et évaluer l'état de récupération des athlètes après des exercices à H-I. Le délai de resynchronisation du SNA dépend à la fois de l'intensité de l'exercice et du niveau d'entraînement. Grâce à leur adaptation physiologique supérieure, les athlètes élités tendent à récupérer plus rapidement, tandis que les athlètes moins expérimentés ou irréguliers nécessitent davantage de temps pour retrouver un équilibre autonome (Seiler et al., 2007).

4.4. Conséquence d'une compétition sur les marqueurs de la variabilité de la fréquence cardiaque

La compétition, en tant qu'événement anxiogène dans le quotidien des athlètes de haut-niveau, peut entraîner des modifications significatives de l'activité du SNA et des marqueurs de la VFC, susceptibles d'affecter la performance sportive.

Au cours de compétitions de football, certaines études ont mis en évidence, chez des joueuses professionnelles, une diminution significative des indices temporels et fréquentiels de la VFC à l'issue des matchs (Ayuso-Moreno et al., 2021; Miranda et al., 2019). Cette réduction de l'activité parasympathique était indépendante du résultat final des matchs (victoire ou défaite) (Ayuso-Moreno et al., 2021) et associée à une augmentation de l'activité sympathique (Miranda et al., 2019). Une diminution significative du tonus vagal, couplée à une activation sympathique accrue au cours des matchs, a également été rapportée chez des volleyeurs de haut niveau. Ces perturbations du SNA étaient particulièrement marquées dans des contextes compétitifs où l'intensité et la pression psychologique étaient élevées (Podstawski et al., 2014). Bien que les athlètes de haut-niveau soient habitués à des charges physiques et mentales importantes, D'Ascenzi et al. (2014) ont observé une diminution significative des indices de l'activité parasympathique, ainsi qu'une augmentation de l'activité sympathique en amont des matchs, chez des volleyeuses élités.

Dans le cadre des sports individuels, García-González et al., (2022) ont mis en évidence une diminution significative de la VFC juste avant les matchs, en comparaison avec des périodes d'entraînement, chez de jeunes joueurs de tennis. Cette diminution était marquée par une réduction du RMSSD et une augmentation du ratio LF/HF, traduisant une prédominance sympathique au détriment de l'activité parasympathique. Par ailleurs, les athlètes ont montré une augmentation des indices d'anxiété somatique, signalant une anxiété précompétitive importante (García-González et al., 2022). Dans des disciplines où le résultat est déterminé

notamment par des évaluations subjectives, comme la gymnastique artistique, Sartor et al., (2017) ont également rapporté une diminution de la VFC avant les compétitions, associée à une réduction notable des capacités cognitives. Les baisses des indices HF et RMSSD traduisent ainsi une dominance sympathique accrue, suggérant que le stress compétitif perturbe également l'équilibre autonome chez ces athlètes avant la compétition (Sartor et al., 2017).

Cependant, chez certains athlètes de haut-niveau, l'activité du SNA peut être influencée en période de compétition, reflétant ainsi une adaptation anticipée aux stress induit par ce contexte spécifique (Plews et al., 2013). Ces réponses au stress, qui peuvent se manifester par une réduction des indices de la VFC en amont des compétitions, n'affectent pas nécessairement la performance. En effet, la réponse de la VFC semble plus variable chez les athlètes de haut niveau, en raison de leur capacité à tolérer un stress plus élevé sans que cela n'influence nécessairement leurs performances.

En somme, le stress psychophysiologique induit par la compétition perturbe l'activité du SNA, comme en témoignent les marqueurs de la VFC associés. Les études citées précédemment mettent en évidence une prédominance marquée de l'activité sympathique au détriment de l'activité parasympathique. Ces perturbations peuvent néanmoins varier en fonction des spécificités du sport, des exigences de la compétition et du niveau des athlètes.

4.5. Perturbations prolongées des marqueurs de la variabilité de la fréquence cardiaque à l'issue d'une compétition

La compétition entraîne une diminution significative de la VFC, une altération pouvant persister plusieurs jours après l'événement. Ces perturbations reflètent un stress psychophysiologique accru et une récupération autonome insuffisante chez les athlètes.

L'étude de Garrido Esquivel et al., (2011) a examiné les effets de trois matchs consécutifs de badminton sur la VFC d'athlètes adolescents. Les résultats ont mis en évidence une réduction progressive des indices de la VFC, traduisant une fatigue physiologique accumulée, marquée par une prédominance sympathique et une récupération parasympathique insuffisante (Esquivel et al., 2011). Ces observations soulignent que la répétition de matchs lors de tournois peut impacter significativement la capacité de récupération autonome, essentielle pour maintenir des performances optimales durant un enchaînement d'exercices (Esquivel et al., 2011).

Ces variations des indices de la VFC en réponse à la compétition ne sont pas exclusives aux sports individuels. Edmonds et al., (2013) ont exploré les variations de la VFC chez de jeunes joueurs de rugby au cours d'une semaine d'entraînement incluant un match compétitif. Les

résultats ont révélé, à l'issue du match, une réduction marquée de l'activité parasympathique, associée à une augmentation persistante de la fréquence cardiaque, qui s'est maintenue pendant deux jours. Les mesures effectuées en position debout ont montré une diminution prolongée de la modulation autonome, signe d'une récupération incomplète du SNA face à la charge imposée. De plus, Hernández-Cruz et al., (2017) ont observé une diminution significative de la puissance dans la bande HF, témoignant d'une réduction de l'activité parasympathique chez des joueuses de volley-ball au cours d'un tournoi. Ces altérations, persistantes après les compétitions, reflètent une récupération autonome insuffisante exacerbée par le cumul des charges physiques et mentales propres à ces événements. Par conséquent, la VFC est un outil précieux pour monitorer les effets du stress compétitif sur le SNA, qui peut durablement altérer les mécanismes de récupération après un exercice isolé en compétition ou lors d'un tournoi. Cependant, comme l'ont souligné Bosquet et al., (2008), l'interprétation des variations de la VFC doit tenir compte de la variabilité individuelle et du statut d'entraînement des athlètes. L'intégration d'autres marqueurs physiologiques et psychologiques peut enrichir l'analyse et offrir une meilleure compréhension des réponses du SNA face aux exigences de la compétition. Malgré un nombre conséquent d'études portant sur les conséquences de la compétition sur les marqueurs de la VFC, aucune étude à ce jour n'a exploré les effets du stress psychophysiologique induit par un enchaînement d'exercices à H-I en compétition sur le SNA et les marqueurs de la VFC associés chez des athlètes de haut-niveau. Les perturbations du SNA observées au cours d'une compétition, en particulier l'hyperactivation prolongée de la branche sympathique, témoignent des exigences physiologiques et psychologiques intenses imposées aux athlètes. Cependant, ces perturbations peuvent également être influencées par l'anxiété précompétitive, un facteur psychologique susceptible d'altérer les réponses autonomes des athlètes.

5. État d'anxiété pré-compétitif

5.1. Stress psychologique et anxiété pré-compétitive associée

Comme mentionné précédemment, les athlètes spécialisés dans les exercices à H-I peinent, au cours d'une compétition, à reproduire durant plusieurs jours un niveau de performance proche de leur record. Cependant, le stress physiologique, tel que décrit dans la littérature scientifique, ainsi que la fatigue associée à un exercice à H-I, ne suffisent pas à expliquer cette difficulté. En effet, les biomarqueurs témoins des perturbations de l'homéostasie reviennent généralement à leurs valeurs basales peu de temps après l'arrêt de l'exercice.

Les études précédentes se sont principalement concentrées sur les effets du stress physiologique induit par un exercice à H-I dans des conditions expérimentales. Or, l'enchaînement d'exercices à H-I, imposé aux athlètes de haut-niveau, s'effectue dans un contexte de compétition souvent associé à un stress psychophysiologique lié à cet environnement anxiogène (Hanton et al., 2004).

Dans le cadre de la compétition, où l'exercice à H-I déclenche une réponse adaptative à un stimulus externe régulée par le système du stress, l'homéostasie peut être perturbée indépendamment de l'intensité de l'exercice (Chennaoui et al., 2004). En effet, bien que les athlètes soient généralement préparés à réguler leurs émotions, le stress psychologique associé à la compétition et à ses enjeux peut néanmoins altérer l'homéostasie, entraînant potentiellement des effets néfastes sur la performance (Engert et al., 2011). Ce stress psychologique peut être qualifié d'anxiété précompétitive (ou « anxiété de performance ») et défini comme « un état psychologique désagréable en réaction à une menace perçue liée à l'exécution d'une tâche sous pression » (Cheng et al., 2009). Cet état d'anxiété peut notamment être représenté par le modèle tridimensionnel de Cheng et al., (2009), qui le décompose en trois dimensions comprenant cinq sous-composantes :

i) **la dimension cognitive** (se manifestant par l'inquiétude et l'attention centrée sur soi), ii) **la dimension régulatrice** (illustrée par le contrôle perçu), et iii) **la dimension physiologique** (caractérisée par la tension somatique et l'hyperactivité du système nerveux autonome) (Spielberger, 1972; Cheng et al., 2009).

Bien que le stress soit généralement perçu comme délétère, il est également associé à des mécanismes de régulation assurant une fonction protectrice et adaptative en réponse aux menaces perçues par l'organisme (Brosschot et al., 2016; Ellis & Del Giudice, 2019). En effet, en réponse au stress, l'organisme est capable de s'adapter en augmentant, par exemple, la sécrétion de cortisol, en accélérant la fréquence cardiaque ou encore en favorisant la concentration (Frazier & Parker, 2019; Weber et al., 2022). Ainsi, ce n'est pas le stress psychophysiologique en lui-même qui est délétère à la performance, mais davantage une exposition prolongée ou une mauvaise régulation de ce dernier.

5.2. Anxiété pré-compétitive et Competitive State Anxiety Inventory-2

En référence aux trois dimensions de l'anxiété précompétitive mentionnées ci-dessus, Martens (1990) a développé un outil spécifique visant à évaluer l'état d'anxiété avant une compétition. Ce questionnaire, révisé par la suite, a donné lieu au Competitive State Anxiety Inventory-2

(CSAI-2R), traduit en plusieurs langues et adapté aux particularités ainsi qu'aux exigences du sport de haut-niveau (Martinent et al., 2010). Cet outil, présenté ci-dessous, est largement utilisé en psychologie du sport pour mesurer l'état d'anxiété précompétitive tout en tenant compte des trois composantes : l'anxiété cognitive, l'anxiété somatique et la confiance en soi. Le CSAI-2R comporte 27 items répartis en 9 pour chaque sous-échelle. Les items d'anxiété cognitive incluent, par exemple, « Je suis préoccupé par cette compétition » et « J'ai peur de faire une mauvaise performance », tandis que ceux de l'anxiété somatique comprennent « Je me sens nerveux » et « Mon corps est tendu ».

Les participants évaluent l'intensité de chaque symptôme sur une échelle de 1 (pas du tout) à 4 (beaucoup), générant des scores de 9 à 36 pour chaque sous-échelle. De plus, une échelle de direction est incluse pour les items d'anxiété cognitive et somatique, permettant de mesurer dans quelle mesure chaque symptôme facilite ou inhibe la performance, sur une échelle allant de -3 (très handicapant) à +3 (très facilitant). Ainsi, les scores de direction varient de -27 à +27 : un score positif indique un état facilitant, tandis qu'un score négatif reflète un état handicapant.

En somme, le CSAI-2R est un outil fiable et robuste, capable d'évaluer l'état d'anxiété précompétitive et son impact potentiel sur la performance des athlètes de haut-niveau. Cet outil a fait ses preuves auprès d'athlètes de divers niveaux et disciplines sportives (Fig. 17).

Un exercice à H-I en compétition semble induire un stress physiologique lié à l'exercice, mais également un stress psychologique lié à l'anxiété précompétitive, créant ainsi un stress psychophysologique susceptible de perturber l'homéostasie. En effet, les perturbations de l'homéostasie induites par la compétition engendrent une augmentation de l'anxiété précompétitive, accompagnée de dérèglements du SNA et de l'axe HPA (Martens et al., 1990 ; Engert et al., 2011 ; Esquivel et al., 2011 ; Podstawski et al., 2014).

A la lumière des travaux de la littérature mentionnés précédemment et de nos propres données, il semble pertinent de s'interroger sur les effets du stress psychophysologique induit par la répétition d'exercices à H-I en compétition chez des athlètes élités.

Nom, Prénom : _____ Sexe : M / F Date de naissance : _____ Date du test : _____ Heure : _

Instructions : Un certain nombre d'affirmations que des sportifs ont utilisées pour décrire leur état d'esprit avant une compétition sont rapportées ci-dessous. Lisez chaque affirmation puis entourez le numéro approprié situé à droite de celle-ci pour indiquer ce que vous jugez vrai en ce moment. N'entourez qu'un seul numéro par phrase. Il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses. Ne passez pas trop de temps sur une des affirmations, mais choisissez la réponse qui décrit le mieux vos sentiments actuels.

Vous devrez évaluer ensuite le degré de chaque item en indiquant si celui-ci est facilitant pour la performance ou handicapant (de -3 -2 -1 négatif, très handicapant ; 0 pas important ; +1 + 2 +3 positifs, très facilitant). Enfin, vous évaluerez sur une échelle de 1 (jamais) à 7 (tout le temps) le degré de fréquence du symptôme dans les pensées, pour chaque item, au cours de la journée.

Echelle d'intensité :

Anxiété somatique : items 3, 5, 8, 11, 14 et 16.

Anxiété cognitive : items 1, 4, 7, 10 et 13.

Confiance en soi : items 2, 6, 9, 12 et 15.

Echelle de direction :

Anxiété somatique : items 3, 5, 8, 11, 14 et 16.

Anxiété cognitive : items 1, 4, 7, 10 et 13.

Confiance en soi : items 2, 6, 9, 12 et 15.

Echelle de fréquence :

Anxiété somatique : items 3, 5, 8, 11, 14 et 16.

Anxiété cognitive : items 1, 4, 7, 10 et 13.

Confiance en soi : items 2, 6, 9, 12 et 15

En ce moment	Pas du tout	Un peu	Moyen	Beaucoup	Note de l'item								Fréquence						
					Très handicapant				Très facilitant				Jamais			Tout le temps			
1 J'ai peur de ne pas exploiter pleinement mes capacités lors de cette compétition.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
2 Je suis sûr(e) de moi.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
3 Je me sens tendu(e).	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
4 J'ai peur d'échouer.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
5 Je sens mon estomac se nouer.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
6 Je suis sûr de pouvoir relever le défi.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
7 J'ai peur d'échouer à cause de la pression.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
8 Je sens mon cœur battre plus vite.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
9 Je suis sûr(e) de réussir.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
10 J'ai peur d'être peu performant(e).	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
11 Je sens mon estomac défaillir	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
12 J'ai confiance car je me vois en train d'atteindre mon but.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
13 J'ai peur de décevoir par un mauvais résultat.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
14 Mes mains sont moites.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
15 Je suis sûr (e) de pouvoir réussir malgré la pression.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7
16 Je sens que mon corps est tendu.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3		1	2	3	4	5	6	7

Figure 17 : Exemple du questionnaire Competitive State Anxiety Inventory-2 Revised (CSAI-2R) validé et traduit en Français, comprenant les échelles de fréquence et de direction ; Martinent et al., 2010.

PARTIE II : CE QU'IL FAUT RETENIR

⚠ Le stress physiologique induit par les exercices à H-I **stimule l'axe HPA** en augmentant la **sécrétion de cortisol** et d'autres hormones pour répondre aux **besoins métaboliques**.

→ Le **cortisol salivaire augmente** immédiatement après l'effort, avec un **retour à la normale** quelques heures à l'issue de l'effort.

→ Les concentrations de **testostérone salivaire, hormone anabolisante**, fluctuent selon l'**intensité de l'effort** et les **cycles circadiens**, avec des **augmentations transitoires** après les exercices H-I.

→ Le **taux d'alpha-amylase, marqueur de l'activité sympathique**, atteint un **pic immédiat** après l'effort puis **redescend progressivement** en post exercice.

⚠ L'**enchaînement d'exercices à H-I en compétition** (séries, demi-finales, finales) entraîne une **diminution progressive des niveaux hormonaux** en réponse au **stress psychophysique**.

→ Le **cortisol augmente** avant et pendant la compétition. Cependant, une réponse excessive peut **compromettre la performance**.

→ La **testostérone salivaire augmente de façon transitoire** avant et pendant la compétition, liée à la préparation et à l'intensité perçue.

→ L'**alpha-amylase** salivaire augmente de manière significative pendant la compétition. Son analyse offre des informations sur la **gestion du stress**.

⚠ La **VFC** est un outil intéressant, **peu coûteux et simple à mettre en place** pour **monitorer le SNA** et l'état de récupération des athlètes

⚠ Les exercices H-I sollicitent fortement la **branche sympathique du SNA** pour maintenir la performance, au **détriment de l'activité parasympathique**.

→ La **récupération parasympathique** après un exercice H-I peut prendre **24 à 48 heures**, selon l'**intensité de l'effort** et le **niveau d'entraînement**.

⚠ Une **compétition** induit une **réduction de l'activité parasympathique** et une **dominance sympathique**.

→ Une **récupération insuffisante** de la VFC peut **persister plusieurs jours** après la compétition, signalant une **fatigue accumulée** et une **adaptation autonome prolongée**.

⚠ L'**anxiété pré-compétitive** est une forme de stress psychologique spécifique à la compétition, définie comme une **réaction à une menace perçue liée à la performance**. Cet état peut éventuellement **perturber l'homéostasie** et **influencer négativement les performances**.

→ Le **CSAI-2R** est un outil standardisé pour **évaluer l'anxiété pré-compétitive**. Le **stress psychophysique** est une **combinaison d'effets cognitifs et physiologiques** qui se traduit en compétition par **des perturbations du SNA** et l'**axe**

Ainsi, le stress psychophysiologique induit par la compétition, en sollicitant de manière intense le système neuro-endocrinien et le système nerveux autonome, entraîne des perturbations significatives. Ces changements d'activité se retranscrivent notamment par une activation prolongée de la branche sympathique associée à une modulation hormonale marquée ainsi qu'un retrait de la branche parasympathique. Ces réponses, bien qu'essentielles pour répondre aux exigences compétitives, peuvent perturber l'homéostasie et par conséquent avoir des effets délétères sur le sommeil des athlètes. En effet, l'excès d'activation sympathique, associé à une inhibition parasympathique, ainsi que les variations hormonales post-compétition, peuvent altérer l'endormissement et la qualité du sommeil. Il est donc crucial d'étudier ces répercussions, car elles affectent directement le processus de récupération psychophysiologique des athlètes et pouvant à terme impacter leur performance.

PARTIE III :

**OPTIMISER LA RÉITÉRATION D'EXERCICES À HAUTE-
INTENSITÉ PAR LA RÉCUPÉRATION EN RÉGULANT LE
STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE**

1. Réguler les effets du stress psychophysiologique : optimisation du sommeil

1.1. Sommeil et stress psycho-physiologique : quid de l'œuf ou de la poule ?

Le sommeil, considéré comme un état physiologique essentiel, se caractérise par un désengagement perceptif et une absence de réaction aux stimuli externes. Ce processus cyclique universel joue un rôle clé dans le maintien de l'homéostasie en régulant les grandes fonctions biologiques de l'organisme (Chauvineau, 2024).

Sur le plan comportemental, le sommeil peut être défini comme un état réversible et naturellement récurrent, caractérisé par une déconnexion perceptive et une diminution des réponses aux stimuli environnementaux (Ogilvie et al., 1989). Il est structuré en plusieurs cycles comprenant des phases de sommeil lent et paradoxal, chacune ayant des rôles spécifiques. Le sommeil lent, notamment dans ses phases profondes, favorise la récupération métabolique et la réparation cellulaire, tandis que le sommeil paradoxal est essentiel aux fonctions cognitives, telles que la mémoire et l'apprentissage (Taylor et al., 1997).

Le sommeil agit également comme un régulateur clé des fonctions endocriniennes et métaboliques, en stimulant les processus anaboliques et cataboliques grâce à l'augmentation des hormones anabolisantes (Chennaoui et al., 2020). Une régulation efficace du SNE durant le sommeil entraîne une diminution de l'activité sympathique et une prédominance parasympathique, facilitant ainsi la récupération (Pressman & Fry, 1989; Chevrete, 2012). En parallèle, le sommeil influence de manière significative le système immunitaire en modulant les réponses inflammatoires. Les cytokines pro-inflammatoires, telles que l'interleukine1-bêta (IL1- β), atteignent des niveaux maximaux pendant le sommeil, favorisant une régulation homéostatique (Bollinger et al., 2010; Léger et al., 2018).

Cependant, le stress psychophysiologique peut altérer considérablement le sommeil, notamment en activant l'axe sympathique et en augmentant la sécrétion de cortisol (Chen, 2017). Ces mécanismes nuisent à la qualité et à la quantité du sommeil, prolongeant le délai d'endormissement, fragmentant les cycles et affectant la fonction réparatrice des phases profonde (Myllymäki et al., 2011).

Chez les sportifs de haut-niveau, les compétitions en soirée et les entraînements à H-I exacerbent ces perturbations. Elles se traduisent par une augmentation de la fréquence cardiaque et une diminution de l'activité parasympathique, compromettant ainsi l'homéostasie (Oda & Shirakawa, 2014).

Un sommeil perturbé peut avoir des répercussions notables sur les performances cognitives et physiques ainsi que sur la santé globale des athlètes. La restriction de sommeil, définie comme une période où la durée du sommeil est inférieure à six heures, est souvent associée à une diminution de la qualité du sommeil et à des impacts négatifs sur la performance sportive (Craven et al., 2022). Une méta-analyse réalisée par Craven et al., (2022) a montré qu'une réduction aiguë du sommeil pouvait entraîner une baisse significative des performances lors d'exercices à H-I, avec des diminutions allant de 3% à 10%. Cette restriction accentue également la perception de la difficulté de l'exercice et peut réduire la motivation, un facteur déterminant pour les exercices à H-I (Craven et al., 2022).

Enfin, selon Roberts et al., (2019), une durée de sommeil inférieure à cinq heures n'a pas affecté la performance lors d'une première course contre-la-montre en cyclisme, mais a conduit à une réduction d'environ 3% lors d'une seconde course (Roberts et al., 2019a & 2019b).

En conclusion, le sommeil est une composante essentielle de la préparation et de la récupération des athlètes olympiques (Robson-Ansley et al., 2009). Ses fonctions régulatrices, allant de la réparation métabolique à la modulation du stress, en font un élément indispensable pour la performance. Toutefois, le stress psychophysiologique et la privation de sommeil compromettent ces bénéfices, impactant à la fois la récupération et les performances. Investir dans des stratégies de récupération, telles que les techniques de relaxation visant à réguler l'activité du système nerveux autonome et à améliorer la qualité du sommeil, est essentiel pour préserver ces fonctions et optimiser les performances (Al Haddad et al., 2010).

1.2. Régulation du stress psychophysiologique à l'aide de la cohérence cardiaque

Au regard des conséquences du stress psychophysiologique mentionnées précédemment, il semble pertinent d'envisager des stratégies de relaxation destinées aux sportifs de haut-niveau pour en réguler les effets. Plusieurs méthodes de gestion du stress, telles que le yoga, la programmation neurolinguistique (PNL), les étirements, le training autogène de Schultz, l'hypnose ou encore le biofeedback, ont déjà été étudiées (Lehrer, 1996; Pelka et al., 2016).

Parmi ces techniques, la cohérence cardiaque, basée sur une respiration contrôlée, présente des bienfaits significatifs pour réguler le stress psychophysiologique. Cette méthode agit efficacement sur les réponses psychologiques et physiologiques au stress (Lehrer et al., 2020). En effet, ses effets bénéfiques s'expliquent par son impact direct sur le système nerveux autonome (SNA). Les techniques de respiration lente augmentent la VFC et l'arythmie sinusale respiratoire (variation fonctionnelle du rythme cardiaque induite par l'alternance entre les

phases d'inspiration et d'expiration), favorisant ainsi un meilleur contrôle émotionnel et une flexibilité psychologique accrue (Ma et al., 2017; You et al., 2021) (Fig.).

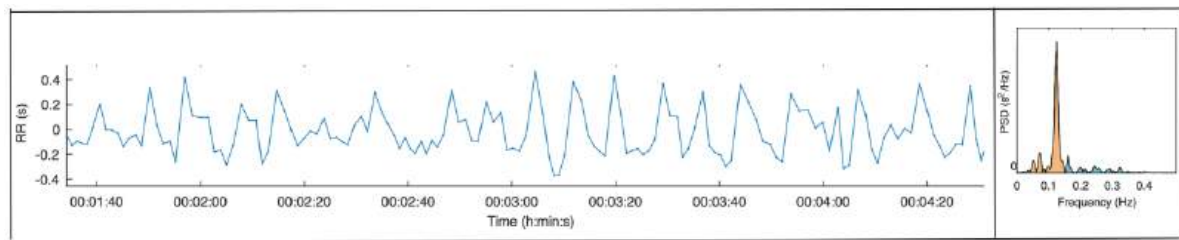


Figure 18 : Représentation temporelle et fréquentielle d'un enregistrement de variabilité cardiaque réalisé sur un athlète élite membre de l'équipe de France (donnée personnelle). L'athlète présente une fréquence de respiration libre d'environ 0,12 Hz et une arythmie sinusoïdale très prononcée.

La pratique de la cohérence cardiaque qui repose sur une respiration régulière associée à un rythme de 6 cycles par minute (5 secondes d'inspiration, 5 secondes d'expiration) régule l'activité du SNA en renforçant la dominance du parasympathique grâce à la stimulation du nerf vague. Ainsi, des études ont montré que la cohérence cardiaque réduit significativement l'anxiété, indépendamment du profil des sujets (Zaccaro et al., 2018; DeGraves et al., 2024). Elle régule l'activité du SNA, comme en témoigne l'amélioration de la VFC (Laborde et al., 2022) et la diminution des niveaux de cortisol salivaire via une régulation de l'axe HPA (Ma et al., 2017). Cette pratique favorise un état de relaxation en renforçant l'activité parasympathique, associée à la réduction du stress.

De plus, les pratiquants de la cohérence cardiaque rapportent des améliorations notables de leur humeur, de leur régulation émotionnelle et de leur bien-être psychologique général (Ma et al., 2017; Perciavalle et al., 2017; Laborde et al., 2022).

La cohérence cardiaque a également démontré des effets bénéfiques sur la qualité et la quantité de sommeil. Cette technique réduit la latence d'endormissement, diminue la somnolence diurne et améliore la qualité globale du sommeil (Migliaccio et al., 2023). Une étude a révélé qu'une pratique quotidienne de 15 minutes pendant un mois entraînait une amélioration significative de la qualité subjective du sommeil, comparée à l'utilisation des médias sociaux, chez 64 participants en bonne santé (Laborde et al., 2019). Ces bienfaits semblent limiter les effets délétères d'un stress psychophysiologique, caractérisé par une hyperactivation sympathique et une réduction de l'activité parasympathique (Jerath et al., 2019).

En somme, la cohérence cardiaque est une technique de relaxation non pharmacologique, facile à mettre en œuvre et peu coûteuse, qui vise à améliorer la qualité du sommeil et à réduire les effets du stress psychophysiologique. Cependant, peu d'études ont été menées auprès des athlètes de haut niveau, une population particulièrement exposée à ces perturbations (Migliaccio et al., 2023).

Par conséquent, à la lumière de la littérature existante, il serait intéressant d'examiner les effets de la cohérence cardiaque sur la régulation du stress psychophysiologique des athlètes et optimiser leur sommeil.

PARTIE III : CE QU'IL FAUT RETENIR

⚠ **Le sommeil est essentiel pour maintenir l'homéostasie, la récupération métabolique, et les fonctions cognitives.**

→ Il **régule les systèmes endocrinien et immunitaire**, réduit l'**activité sympathique**, et favorise une **prédominance parasympathique** pour **optimiser la récupération**.

→ Le **stress psychophysiologique**, en activant l'axe HPA et en augmentant le cortisol, **perturbe le sommeil** (prolongation du délai d'endormissement, fragmentation des cycles), ce qui **compromet les performances** et la **récupération** des athlètes.

→ Une **restriction de sommeil** (<6 heures) entraîne par conséquent une **baisse de performance** lors des exercices à H-I ainsi qu'une **perception accrue de l'effort** et une **diminution de la motivation**.

⚠ **La cohérence cardiaque** est une technique de **respiration contrôlée** qui améliore la **régulation du stress psychophysiologique**.

→ Elle **renforce l'activité parasympathique** et **réduit les niveaux de cortisol** et contribue à **réduire de l'anxiété** tout en **améliorant la gestion des émotions**.

→ Cette technique permet également **d'améliorer la qualité et la quantité de sommeil** en réduisant le **délai d'endormissement** et en favorisant le **sommeil plus réparateur**.

Alors que le sommeil constitue un pilier essentiel pour améliorer la récupération, d'autres stratégies destinées à réguler le stress métabolique peuvent être mises en place dans le but d'optimiser la réitération de performances maximales.

PARTIE IV :

**OPTIMISER LA RÉITÉRATION DE PERFORMANCE
MAXIMALE PAR LA NUTRITION EN RÉGULANT LE
STRESS MÉTABOLIQUE**

1. Retarder les effets du stress métabolique : amélioration de la capacité tampon

Lors des exercices de H-I, le SNA stimule également les glandes surrénales, libérant ainsi de l'adrénaline dans le sang. Cette dernière, en association avec le calcium, active la glycogénolyse musculaire, essentielle à la production d'énergie lors d'exercices de H-I. Cette production d'énergie entraîne d'importantes perturbations métaboliques, telles qu'une acidose métabolique marquée (avec un pH sanguin inférieur à 7, relevé à l'issue des épreuves de 400 m), pouvant constituer un frein à la performance. Il apparaît désormais pertinent d'explorer les différentes stratégies nutritionnelles et hydriques pouvant permettre de mieux réguler ce stress métabolique.

1.1. Limiter les effets de l'acidose métabolique : capacité tampon

En plus des mécanismes de régulation décrits en Partie I permettant de lutter contre l'acidose métabolique, l'organisme dispose également d'un système appelé « capacité tampon », permettant de prendre en charge les ions H^+ afin de limiter leurs effets négatifs et de réguler l'équilibre acido-basique.

Dans un premier temps, le muscle squelettique est le premier à tamponner ces ions H^+ afin d'assurer l'homéostasie de l'organisme. Ainsi, par l'intermédiaire d'acides aminés tels que l'histidine ou la bêta-alanine, du phosphate inorganique, ou encore du bicarbonate, la capacité tampon musculaire (β_m) permet de limiter l'acidose musculaire en retardant l'apparition de la fatigue (Castellini & Somero, 1981; Adams et al., 1990). Cependant au cours d'un exercice à H-I, cette capacité au sein du muscle ne permet pas de maintenir l'homéostasie tout au long de l'exercice en raison de l'intensité de ce dernier, qui entraîne une accumulation d'ions H^+ excédant leur élimination (Bishop et al., 2009). De ce fait, les ions H^+ sont ensuite transférés des muscles squelettiques vers le compartiment sanguin en traversant le sarcolemme grâce aux transporteurs MCT dont leur fonction a été décrite précédemment (Juel, 1997). Dans un second temps, par l'intermédiaire de l'hémoglobine et du bicarbonate, la capacité tampon sanguine régule le pH sanguin. Les ions bicarbonates (HCO_3^-) dont la concentration dans le sang varie entre 22 et 28 mmol/L au repos, constituent le principal mécanisme de cette capacité tampon extracellulaire.



En effet, le bicarbonate capte les ions H^+ pour former de l'acide carbonique (H_2CO_3), qui se dissocie ensuite en dioxyde de carbone (CO_2) et en eau (H_2O). Cette prise en charge rapide des ions H^+ stabilise ainsi le pH sanguin, essentiel au maintien de l'homéostasie (Baranauskas et al., 2020; Gurton et al., 2021). Par conséquent, la production de CO_2 , induite par la prise en charge des ions H^+ grâce aux ions HCO_3^- , entraîne une augmentation du gradient de pression du CO_2 dans le sang afin qu'il soit transporté vers les alvéoles pulmonaires puis enfin éliminé par les poumons lors de l'expiration. Ainsi, l'équilibre acido-basique est, entre autres, favorisé par cette capacité tampon extracellulaire, ce qui entraîne une diminution significative de la concentration en HCO_3^- dans le sang, associée à une augmentation de la ventilation.

Cependant, lorsque l'intensité de l'exercice dépasse le second seuil ventilatoire, une accumulation d'ions H^+ se produit en raison d'une production excédant les capacités d'élimination. Dans ces conditions, le système tampon devient incapable de réguler efficacement le pH sanguin impliquant une diminution des performances. De ce fait, une augmentation de la concentration en bicarbonate [HCO_3^-] pourrait représenter un atout non négligeable pour retarder les effets délétères de l'acidose métabolique (Fig. 18A et Fig. 18B).

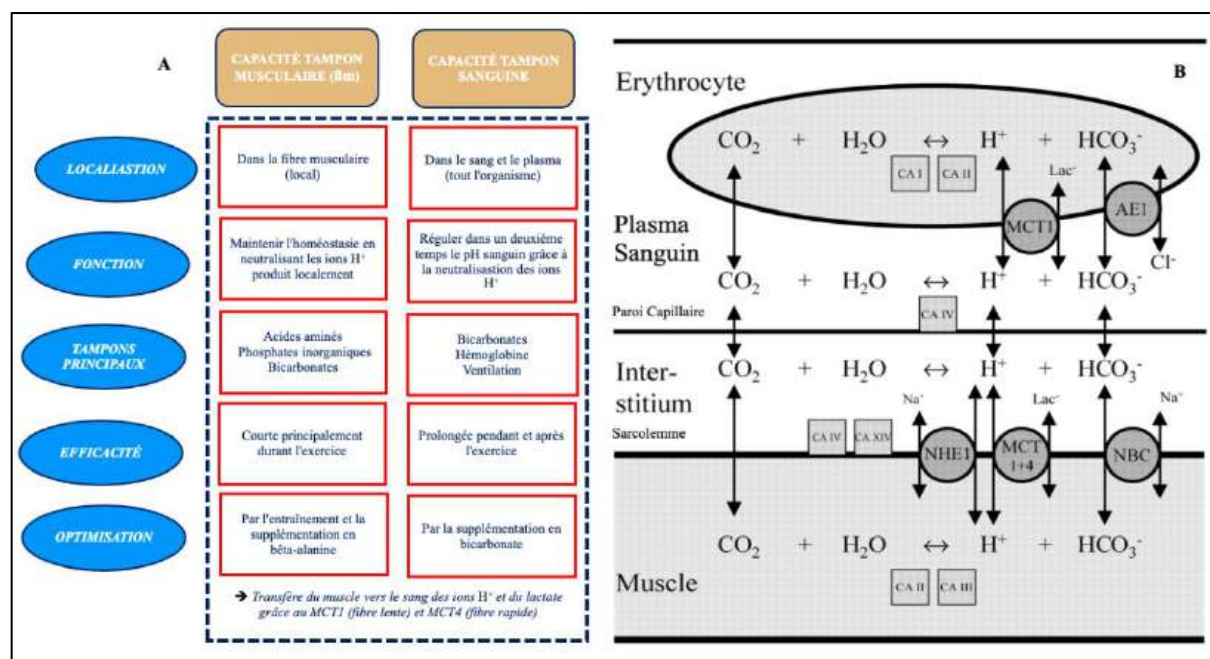


Figure 19A : Synthèse de la capacité tampon musculaire et sanguine.

Figure 19B : Résumé des systèmes de transport membranaires (cercles) et des enzymes (carrés) impliqués dans les flux de H^+ entre le muscle et le sang. Les anhydrases carboniques (CA) I, II, III, IV et XIV représentent les isoformes cytosoliques et membranaires de l'CA présentes dans les muscles et les érythrocytes. NHE1 : Na^+-H^+ isoforme échangeur 1.

MCT1 et MCT4 : transporteur de monocarboxylate (cotransporteur lactate- H^+) isoforme 1 et 4. NBC : $Na^+-HCO_3^-$ co-transporteur. AE1 : $Cl^-HCO_3^-$ échangeur 1. (Juel 2003)

1.2. Supplémentation en bicarbonate de sodium

1.2.1. Principe d'action

L'amélioration de la capacité tampon, en retardant les effets de l'acidose métabolique, semble ainsi être une stratégie non négligeable dans la perspective d'améliorer les performances lors d'exercices à H-I. Cette optimisation du pouvoir tampon peut être obtenue par l'entraînement à haute-intensité (Bishop et al., 2009) mais également par une supplémentation en agents tampons exogènes, tels que le bicarbonate de sodium (NaHCO_3) (McNaughton et al., 2001; Grgic et al., 2021). En effet, une supplémentation en bicarbonate de sodium induit une augmentation $[\text{HCO}_3^-]$ dans le sang entraînant par conséquent une augmentation du pH. Cette alcalinisation du pH sanguin permet d'augmenter le gradient de pression entre le muscle et le sang, facilitant de ce fait l'évacuation des ions H^+ du muscle vers le sang. Ainsi, une supplémentation en bicarbonate de sodium est une stratégie permettant de réguler l'équilibre acido-basique afin de limiter la fatigue musculaire pendant l'exercice (Lancha Junior et al., 2015), pouvant à terme améliorer la performance lors de courses de 400 m.

1.2.2. Posologie

La supplémentation en bicarbonate de sodium est une stratégie largement étudiée depuis plusieurs décennies (Matson & Tran, 1993). Destinée à augmenter la capacité tampon sanguine, elle est généralement recommandée à raison de 0,3 à 0,5 g par kg de poids corporel. Ce type de supplémentation peut se faire, en chronique au travers d'une prise quotidienne sur plusieurs jours avant une compétition ou durant une période d'entraînement (Edge et al., 2006), mais également en aiguë avec une prise 60 à 180 minutes avant le début de l'exercice (Grgic et al., 2021). Cette supplémentation permet d'atteindre un pic de concentration sanguine en bicarbonates avant le début de l'exercice dans l'objectif d'optimiser de tamponner les ions H^+ au cours de l'exercice et de retarder l'apparition de la fatigue musculaire liée à l'acidose métabolique (Matson & Tran, 1993; Burke, 2013; C. Thomas, 2021; Grgic et al., 2021).

Par ailleurs, la supplémentation en bicarbonate de sodium peut se faire sous différentes formes, telles que la prise de gélules, de poudre à mélanger avec de l'eau, de stratégies nutritionnelles naturelles ou encore via la consommation de gels (Gough et al., 2024).

1.2.3. Effets sur la performance au cours d'un exercice à haute-intensité

Grâce à l'optimisation du pouvoir tampon extracellulaire, la supplémentation en bicarbonate de sodium semble améliorer la performance au cours d'exercices à H-I, durant lesquels la filière

anaérobie contribue de manière prioritaire (Peart et al., 2012). Des effets bénéfiques sur la performance lors de sprints et de tests de Wingate ont été rapportés à la suite d'une supplémentation chronique de 28 jours et de 5 semaines (Ducker et al., 2013; Tobias et al., 2013). De plus un apport aigu de 0,3 g par kg de poids corporel a également eu des effets positifs sur les biomarqueurs sanguins et amélioré la performance à l'issue d'exercices à H-I (Lindh et al., 2008; Zajac et al., 2009; Mero et al., 2013). Bien que les effets d'une supplémentation en bicarbonate restent controversés sur la performance et dépendent du type d'exercice, du sexe, de l'âge et du niveau des athlètes, la majorité des études mettent en évidence des effets bénéfiques sur l'acidose métabolique lors d'exercices à H-I (Lindh et al., 2008; Hadzic et al., 2019; Calvo et al., 2021). De plus, une supplémentation en bicarbonate de sodium semble également avoir des effets positifs lors d'exercices répétés, associés à une réduction de la perception de la difficulté de l'exercice et à une meilleure préservation de la puissance musculaire (Thomas, 2021; De Oliveira et al., 2022; Gough et al., 2024).

1.2.4. Limites et inconvénients

Bien que la supplémentation en bicarbonate de sodium constitue un levier intéressant pour améliorer les performances lors d'exercices à H-I, les réponses peuvent varier d'un athlète à l'autre. Cette variabilité individuelle est notamment influencée par des facteurs tels que la typologie musculaire, comme la proportion de fibres rapides, et le niveau d'entraînement et d'expertise (Thomas, 2021; De Oliveira et al., 2022). De plus, des effets secondaires gastro-intestinaux peuvent compromettre les bénéfices attendus (Zhou et al., 2022). En effet, certaines études mettent en évidence des symptômes tels que nausées, douleurs abdominales et diarrhées, pouvant à terme nuire à la performance et réduire celle-ci jusqu'à 15% (Freis et al., 2017; Burke, 2013). Par conséquent, il est important de tester et d'individualiser cette stratégie pour chaque athlète afin d'éviter tout risque de surdosage. Une planification adéquate permet d'optimiser les bénéfices tout en minimisant les effets indésirables, maximisant ainsi les effets positifs d'une telle stratégie sur la performance (Burke, 2013; Lopes-Silva et al., 2019).

En somme, la supplémentation en bicarbonate de sodium offre un potentiel ergogène non négligeable pour les exercices à H-I, mais sa mise en place doit prendre en compte les risques d'effets secondaires associés (Siegler et al., 2016). Le choix d'une supplémentation, par le biais de stratégies considérées comme plus naturelles, pourrait ainsi maximiser les bénéfices tout en minimisant les inconvénients.

1.3. Optimisation du pouvoir tampon grâce à la consommation d'une eau riche en bicarbonate

Comme précisé ci-dessus, la supplémentation en bicarbonate de sodium est une stratégie largement étudiée dans la littérature scientifique. Bien que cette supplémentation puisse être efficace, certains athlètes ne tolèrent pas bien l'ingestion directe de bicarbonate en raison de ses effets secondaires (McNaughton et al., 2016; Ragone et al., 2020). De plus, certains entraîneurs et athlètes préfèrent éviter l'utilisation de suppléments en privilégiant des approches perçues comme plus naturelles. Dans ce contexte, la consommation d'eau naturellement riche en ions HCO_3^- pourrait représenter une alternative intéressante.

Les études examinant l'effet de l'eau riche en bicarbonate sur le pH et l'équilibre acido-basique après un exercice à H-I montrent des résultats contrastés. Une consommation chronique d'eau minérale, avec un pH autour de 6 et une concentration en HCO_3^- d'environ 1000 mg/L pendant une semaine, n'a montré aucun effet significatif sur l'équilibre acido-basique (Chycki et al., 2017) ou a simplement augmenté le pH urinaire (Brancaccio et al., 2012). Il est néanmoins intéressant de noter que l'apport modéré de 1,5 L/jour d'eau contenant 981 mg/L de HCO_3^- a induit une augmentation du pH urinaire (Brancaccio et al., 2012), alors qu'un apport plus important de 4 à 4,5 L/jour d'eau contenant 1300 mg/L de HCO_3^- n'a eu aucun effet significatif (Chycki et al., 2017). Cette disparité pourrait notamment s'expliquer par le moment de l'ingestion d'eau par rapport au prélèvement d'urine. Un pH urinaire plus élevé a été observé lorsque l'eau était consommée dans les heures précédant la collecte, suggérant un effet aigu plus marqué qu'une adaptation chronique (Brancaccio et al., 2012).

En outre, bien que ces études aient inclus des exercices physiques, elles n'ont pas directement mesuré l'impact de l'eau riche en bicarbonate sur la performance lors d'exercices à H-I, ni investigué de manière approfondie les conséquences sur les biomarqueurs sanguins témoins de l'équilibre acido-basique. Cependant, une étude a montré que la consommation d'eau très riche en bicarbonate (4368 mg/L) favorisait une restauration rapide de l'équilibre acido-basique après un exercice aérobie et maintenait une force résiduelle plus élevée lors d'un test isocinétique (Richard et al., 2000). Contrairement aux études précédentes (Brancaccio et al., 2012 ; Chycki et al., 2017), cette étude s'est concentrée sur une ingestion aiguë le jour même du test, avec une consommation répartie durant les deux heures précédant l'exercice. Ces résultats renforcent l'idée qu'un effet aigu pourrait être plus pertinent qu'une consommation chronique.

En résumé, la consommation d'une eau riche en bicarbonate semble présenter des résultats encourageants dans l'objectif d'optimiser le système tampon et d'améliorer la performance lors

d'un exercice à H-I. Cependant, il est nécessaire de mener davantage d'études pour explorer les effets de la consommation chronique et aiguë d'eau riche en bicarbonate sur l'équilibre acido-basique, en prenant en compte les variations des modes de consommation et les dosages.

1.4. Optimisation du pouvoir tampon grâce à un régime alimentaire alcalinisant

Outre l'optimisation du pouvoir tampon par la consommation d'eau riche en bicarbonate, les régimes alimentaires peuvent également jouer un rôle significatif dans la régulation de l'équilibre acido-basique de l'organisme. En effet, le type d'alimentation peut influencer cet équilibre par la consommation de régimes qualifiés d'acidifiants (Rodrigues Neto Angéloco et al., 2018).

Les régimes riches en protéines animales, contenant des acides aminés sulfurés et souvent privilégiés par les sportifs de haut-niveau, tendent à acidifier l'organisme. À l'inverse, les fruits et légumes, sources de bases, favorisent une alcalinisation (Raphael, 2019). Ainsi, la gestion de l'acidose métabolique via l'alimentation représente une stratégie complémentaire efficace pour moduler l'équilibre acido-basique (Di Iorio et al., 2017; Mahboobi et al., 2023).

Dans ce contexte, Remer et Manz (1995) avaient développé un modèle appelé Potential Renal Acid Load (PRAL), qui permet d'évaluer la charge acide induite au niveau rénal par les régimes alimentaires en fonction de l'apport en nutriments (Remer & Manz, 1995). Cet indice fournit une estimation de la charge acide ou alcaline des régimes alimentaires, facilitant ainsi l'analyse de leurs effets sur l'équilibre métabolique (Tab. 3).

Aliments acidifiants	PRAL associé	Aliments alcalinisants	PRAL associé
Parmesan	+34.2	Concombre	-0.8
Dinde	+9.9	Brocoli	-1.2
Poulet	+8.7	Pomme	-2.2
Œuf	+8.1	Ananas	-2.7
Porc	+7.9	Tomate	-3.1
Bœuf	+7.8	Cerises	-3.6
Spaghettis	+7.3	Pomme de terre	-4.0
Corn flakes	+6.0	Carotte	-4.9
Riz blanc	+4.6	Céleri	-5.2
Pain blanc	+3.7	Banane	-5.5
Lentilles	+3.5	Épinard	-14.0
Pois	+1.2	Raisins	-21.0

Tableau 3 : Exemple des aliments acidifiant ou alcalinisants en fonction de leur indice PRAL réalisé à partir de Remer et Manz 1995.

Ce type de stratégie nutritionnelle a également montré des effets bénéfiques sur les différents biomarqueurs sanguins en régulant l'équilibre acido-basique tout en améliorant de 2% la performance sur 400 m chez des étudiants en STAPS (Limmer et al., 2018) (Fig. 11).

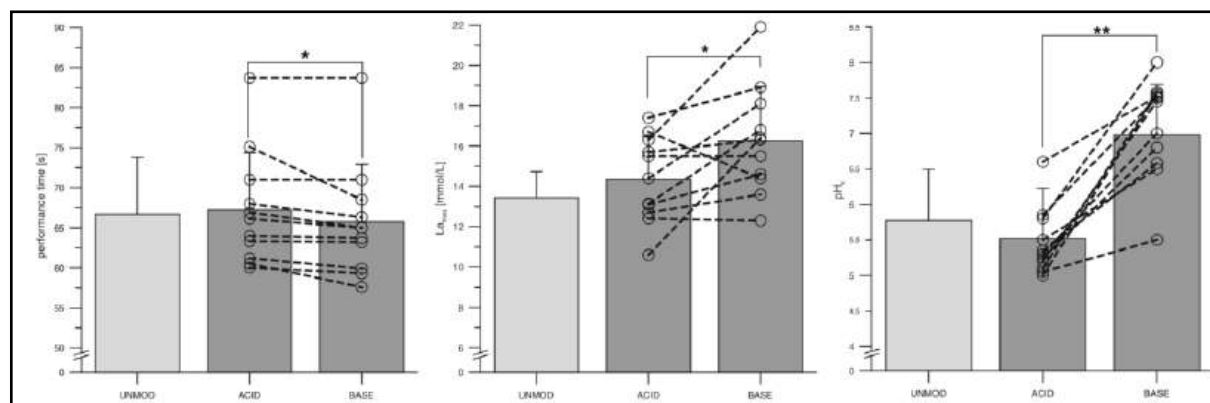


Figure. 20 : Effets d'un régime alimentaire alcalinisant (BASE), acidifiant (ACIDE) ou neutre (UNMOD) sur la performance réalisée, sur la lactatémie et sur le pH sanguin à l'issue d'un 400 m chez des étudiants en STAPS (Limmer et al., 2018).

Ainsi, l'association d'une eau bicarbonatée et d'un régime alimentaire alcalinisant pourrait renforcer les effets bénéfiques sur la capacité tampon de l'organisme. Cet effet tampon additionnel pourrait de ce fait améliorer la performance lors d'une course isolée et d'un enchaînement de 400 m.

Au regard de la littérature citée ci-dessus, il convient de s'interroger sur les effets de la consommation d'eau riche en bicarbonate associée à un régime alcalinisant dans la perspective d'améliorer les performances lors d'un exercice isolé et d'une réitération d'exercices à H-I chez des athlètes spécialisés.

PARTIE IV : CE QU'IL FAUT RETENIR

⚠ La consommation d'une **eau riche en bicarbonate** semble **limiter les effets de l'acidose** en **augmentant le pouvoir tampon**.

⚠ La mise en place d'un **régime alcalinisant** à base de fruits/légumes et limitant les aliments d'origine animale **favorisent un équilibre acido-basique** réduisant également **les effets de l'acidose**.

⚠ La consommation d'une **eau riche en bicarbonate** associée à un **régime alcalinisant** est une **stratégie nutritionnelle « naturelle »** susceptible **améliorer la performance** des exercices à H-I grâce à un **effet cumulé** permettant **d'optimiser la capacité tampon**.

SYNTHÈSE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE

Les exercices à H-I, tels que le 400 m en athlétisme, représentent un défi physiologique majeur pour les athlètes de haut-niveau. Ces exercices, réalisés à une vitesse proche de la maximale (passage aux 200m à 96% du record des coureurs), sollicitent majoritairement la filière anaérobie lactique. Cette sollicitation entraîne une accumulation de métabolites, notamment les ions H^+ , perturbant l'équilibre acido-basique et induisant une acidose métabolique. Bien que les biomarqueurs sanguins, tels que le lactate et le pH, reviennent généralement à des niveaux basaux en moins de 24 heures après un exercice H-I, les athlètes rapportent des difficultés à reproduire des performances maximales lors de compétitions impliquant plusieurs jours d'efforts consécutifs. Cette contradiction souligne la nécessité d'une approche plurifactorielle pour comprendre les mécanismes sous-jacents à ces limitations.

Le stress psychophysiologique, combinant le stress physiologique de l'exercice et l'anxiété psychologique liée à la compétition, constitue un facteur limitant de la performance. L'anxiété précompétitive illustre comment les dimensions cognitives, somatiques et émotionnelles du stress peuvent influencer négativement la performance. Bien que les athlètes de haut-niveau soient préparés à gérer ces contraintes, les compétitions intensifient ces réponses psychophysiologiques, compromettant potentiellement leur capacité à être performants.

À l'image des résultats préliminaires obtenus lors des championnats d'Europe de Berlin en 2018, des réponses dysfonctionnelles du SNE, combinées à une altération de la récupération autonome, pourraient expliquer les difficultés des athlètes à maintenir leur niveau de performance au cours de compétitions.

En réponse à un exercice H-I, le SNE est fortement sollicité. Ce système joue un rôle clé en stimulant la libération de cortisol, une hormone essentielle pour mobiliser les ressources énergétiques et gérer les demandes métaboliques accrues de l'exercice. Cependant, la régulation de l'activité du SNE peut varier en fonction de l'intensité des exercices et du niveau des athlètes. Si une activation modérée SNE favorise la mobilisation énergétique et les processus adaptatifs, une activation excessive ou prolongée peut entraîner une récupération insuffisante entre les exercices, perturbant la balance hormonale et exacerbant le stress métabolique.

L'activité du SNA, évaluée à travers la VFC, apparaît comme un indicateur clé de la récupération. Une dominance prolongée de la branche sympathique ou une récupération insuffisante de la branche parasympathique peut limiter la capacité à enchaîner des exercices

intenses, même lorsque les biomarqueurs physiologiques traditionnels indiquent une récupération complète.

Malgré de nombreuses études sur le stress compétitif et les mécanismes de récupération, peu d'entre elles se sont intéressées aux effets du stress psychophysiologique induit par la compétition chez des athlètes de haut niveau sur le SNE et le SNA. Une approche systémique pourrait permettre de mieux caractériser les effets du stress psychophysiologique dans cette population, afin de maintenir des performances optimales lors de compétitions impliquant des exercices H-I répétés.

Sachant que les compétitions et les exercices H-I peuvent perturber le sommeil en activant la branche sympathique du SNA, retardant ainsi l'endormissement et fragmentant les cycles de sommeil, il apparaît primordial d'évaluer et d'optimiser ce dernier. Ces perturbations, couramment décrites, compromettent la récupération (musculaire, métabolique et hormonale) et, in fine, réduisent la performance sportive.

La cohérence cardiaque, une méthode de respiration contrôlée, offre une solution efficace pour réguler les effets délétères du stress psychophysiologique. Elle régule l'activité parasympathique, réduit les niveaux de cortisol et améliore la qualité du sommeil. Malgré sa simplicité d'application, cette technique n'a pas encore été étudiée chez les athlètes de haut niveau dans l'objectif de réguler les effets du stress psychophysiologique et d'optimiser la récupération pour enchaîner des exercices H-I tels que le 400 m.

Par ailleurs, pour retarder les effets délétères sur la performance, plusieurs stratégies nutritionnelles ont été explorées pour optimiser le pouvoir tampon de l'organisme. La consommation d'eau riche en bicarbonates et l'adoption d'un régime alimentaire alcalinisant sont considérées comme des stratégies efficaces pour retarder l'acidose métabolique. Cet effet tampon vise à maintenir les performances sans provoquer de troubles gastro-intestinaux associés. Bien que ces stratégies aient démontré leur efficacité isolément, aucune étude, à notre connaissance, n'a exploré l'impact de leur combinaison sur l'amélioration des performances lors d'exercices H-I.

OBJECTIFS DU TRAVAIL DE THÈSE

L'objectif principal de ce travail de recherche a ainsi été de chercher à optimiser, chez des athlètes de haut-niveau, leur capacité à réitérer des performances maximales lors d'exercices de H-I en compétition. Pour y parvenir, nous avons, dans un premier temps, eu pour objectif de caractériser le stress psychophysiological induit par une saison pré-olympique (Étude 1) et par la compétition en Championnats de France chez des athlètes de niveau international et national et analyser ses effets sur le système nerveux autonome ainsi que sur système neuro-endocrinien (Étude 2). Puis, nous avons cherché à optimiser leur récupération en améliorant la qualité de leur sommeil grâce à des techniques de relaxation telle que la cohérence cardiaque visant à réguler les effets du stress psychophysiological (Étude 3). Enfin, nous avons eu pour objectif d'explorer les différentes stratégies nutritionnelles et hydriques sur la régulation de l'acidose métabolique au cours d'un exercice de haute-intensité, et mis en évidence l'intérêt de la consommation d'eau riche en bicarbonates associée à un régime alcalin (Étude 4). Aussi, nous avons ensuite étudié l'impact de ces stratégies hydriques et nutritionnelles sur la capacité des athlètes à maintenir un niveau de performance maximal lors de courses de 400 m répétées sur trois jours consécutifs (Étude 5).

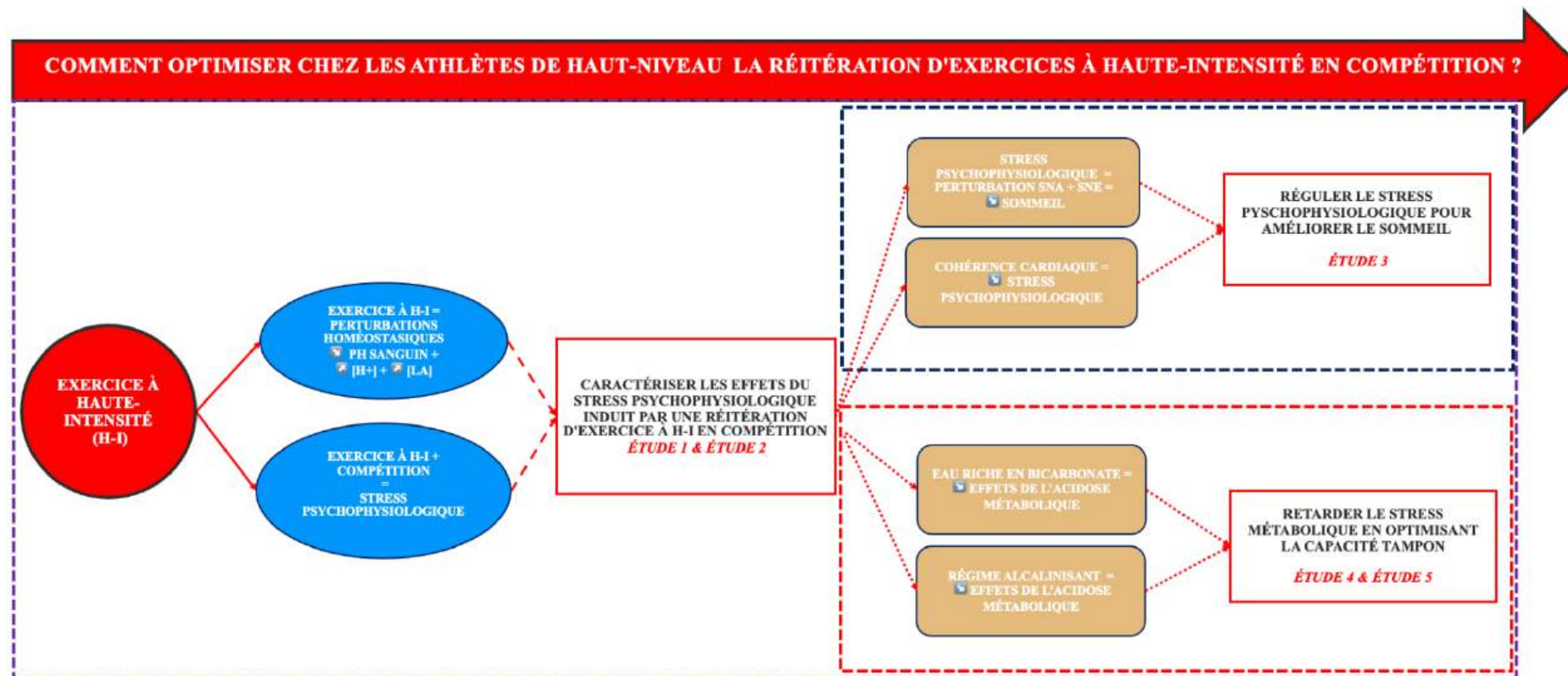


Figure 21 : Schéma de synthèse de la revue de littérature.

Ainsi, la suite de ce manuscrit est consacrée à la contribution personnelle scientifique. Dans un premier temps, les différentes études de ce travail de thèse sont exposées à travers les articles publiés ou en cours de soumission, précédés de synthèses détaillant les résultats des cinq études.

Puis, la partie discussion générale est destinée à contextualiser les résultats obtenus au cours des différentes études en les confrontant aux connaissances actuelles, tout en identifiant leurs implications scientifiques, méthodologiques et pratiques.

Ensuite, une section dédiée aux applications pratiques explore les retombées concrètes de ces résultats, en particulier dans le cadre du suivi des athlètes, de l'amélioration des stratégies de récupération et de la gestion du stress compétitif. Cette partie vise à faire le lien entre les connaissances théoriques développées dans les études et leur mise en œuvre dans ce contexte sportif.

Enfin, une conclusion générale vient synthétiser l'ensemble des travaux, soulignant les contributions scientifiques majeures et leur pertinence pour les domaines de la physiologie du sport et de la gestion du stress. Cette conclusion propose également des pistes pour des recherches futures, afin d'approfondir les connaissances et d'optimiser les pratiques dans ce domaine.

CONTRIBUTION SCIENTIFIQUE PERSONNELLE

ÉTUDE 1 - APPLICATION DE LA VARIABILITE DE LA FRÉQUENCE CARDIAQUE ET DES MARQUEURS SUBJECTIFS POUR OPTIMISER LA PRESCRIPTION D'ENTRAINEMENT : ÉTUDE DE CAS D'UNE ATHLETE OLYMPIQUE

Publication associée : **Chiron, F.**, Bennett, S., Thomas, C., Hanon, C., Léger, D., & Lopes, P. Application of Vagal-Mediated Heart Rate Variability and Subjective Markers to Optimise Training Prescription : An Olympic Athlete Case Report. *International Journal of Disabilities Sports and Health Sciences*, 7(1), 66-76.

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE 1:

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) médiée par le nerf vague est reconnue comme un indicateur clé pour le suivi du stress psychophysiologique chez les athlètes de haut-niveau, permettant d'optimiser la charge d'entraînement. Ce monitoring s'appuie notamment sur des travaux antérieurs qui démontrent que la VFC reflète l'activité du système nerveux autonome, notamment la branche parasympathique, et sa capacité d'adaptation face au stress et à la récupération.

Cette étude de cas s'est intéressée à une coureuse de steeple de niveau olympique et a examiné l'effet des variations de la VFC, couplées à des marqueurs subjectifs comme la qualité du sommeil, le niveau de fatigue musculaire et le stress perçu. Sur une durée de 291 jours, des mesures régulières de la VFC, via des tests orthostatiques (passage de la position couchée à debout), ainsi que des auto-évaluations subjectives, ont été réalisées durant les différentes périodes de la saison préolympique, y compris les camps d'entraînement en altitude. Cette étude longitudinale a donc eu pour objectif d'appréhender les réponses psychophysiologiques liées aux différentes phases d'entraînements intensifs (en stage, en altitude etc.).

Les résultats de cette étude ont ainsi mis en évidence une réduction significative du LnRMSSD en position couchée durant les périodes d'entraînement intensif et de stage d'entraînement, en comparaison à la baseline (LnRMSSD_{su} : 1.55 ± 0.30 (période d'entraînement) ; 1.69 ± 0.18 (stage d'entraînement) ; 1.80 ± 0.14 (baseline) ; $p < 0,05$). De plus, la FC en position couchée a significativement augmenté durant les périodes d'entraînement intensif et de camp d'entraînement en altitude en comparaison à la baseline (FC_{su} : 52.30 ± 2.56 bpm (entraînement) et 54.53 ± 2.15 bpm (stage d'entraînement en altitude) ; 49.87 ± 2.62 bpm (baseline) ; $p < 0,05$). Enfin, la qualité du sommeil a significativement diminuée durant les périodes de stage d'entraînement et de stage en altitude en comparaison à la baseline (Questionnaire de Spiegel : 25.89 ± 1.76 u.a (stage d'entraînement) ; 25.48 ± 1.85 u.a (stage en altitude) ; 28.00 ± 0.76 u.a (baseline) ; $p < 0,01$). Ces résultats confirment donc que la VFC, lorsqu'elle est combinée avec des marqueurs subjectifs, constitue un outil de suivi précieux pour ajuster la charge d'entraînement en fonction du stress psychophysiologique ressenti. En effet, le suivi de la VFC en lien avec des auto-évaluations permet aux entraîneurs d'adapter les séances, de moduler les périodes de repos et de maintenir un équilibre entre adaptation et récupération. Le suivi du stress psychophysiologique s'avère particulièrement pertinent pour les athlètes de haut-niveau

qui, confrontés à des exigences élevées et à des pressions constantes, sont exposés à un risque accru de surcharge mentale et physique.

Ainsi, cette étude souligne l'importance d'une approche de suivi individualisé, intégrant la VFC et des indicateurs subjectifs pour offrir une vue d'ensemble du stress psychophysiological et permettre une gestion plus fine de la charge d'entraînement, ce qui est essentiel dans le contexte exigeant du sport de haut-niveau.



RESEARCH ARTICLE

Application of Vagal-Mediated Heart Rate Variability and Subjective Markers to Optimise Training Prescription: An Olympic Athlete Case Report

François CHIRON^{1*}, Samuel BENNETT², Claire THOMAS³, Damien LEGER⁴, Christine HANON⁵ and Philippe LOPES⁶

^{1,3,6}Laboratoire de Biologie de l'Exercice pour la Performance et la Sante, Université d'Évr, Paris-Saclay / France

²Liverpool John Moores University, Liverpool / United Kingdom

³Centre du sommeil et de la vigilance et Institut national du sommeil et de la vigilance, université Paris Descartes / France

⁴Fédération Française d'Athlétisme, Paris / France

*Corresponding author: francois.chiron49@gmail.com

Abstract

Purpose: The aim of this case study was to investigate whether the variation in parasympathetic branch activity, in conjunction with subjective data, could optimize the training prescription for an elite athlete during an Olympic season. **Methods:** During the preparatory phase for the Tokyo Olympic Games, a world-class female 3000m steeplechase runner (Age: 20 years, Height: 168 cm, Weight: 52 kg, VO₂max: 67.1 mL·min⁻¹·kg⁻¹) recorded Heart Rate Variability (HRV), conducted orthostatic tests, and completed subjective evaluations four times a week throughout the different training periods that constitute a pre-Olympic season. The Pearson correlation coefficient and the Shapiro-Wilk test, along with paired T-tests, were used to assess correlations and compare mean differences between variables concerning baseline measurements and each of the other training periods. **Results:** The natural logarithm of the root mean square of the standard deviation during supine measurement (LnRMSSD_{su}) exhibited a significant negative correlation with the training load based on Rating of Perceived Exertion (RPE) and sleep quality ($P < 0.05$). Heart rate during supine measurement (HR_{su}) showed a significant positive correlation with subjective perceived exertion, sleep quality, stress, muscle soreness, and fatigue ($P < 0.01$). Compared to the baseline (rest), LnRMSSD_{su}, HR_{su}, RPE, and sleep quality were significantly different during the training, camp, and altitude training camp periods. Conversely, markers of standing Heart Rate Variability (HRV) did not differ during competition periods. **Conclusion:** Standing Heart Rate Variability, when combined with subjective markers, serves as a relevant monitoring tool for adapting training periods to regulate psychophysiological effects.

Keywords

Training Monitoring, Psychophysiological Stress, Olympic Athlete

INTRODUCTION

Careful planning of an athlete's training regimen is essential to optimize their performance during competitions. Coaches and sports scientists must strike a delicate balance between maintaining sufficient training load to induce adaptation and safeguarding their overall health, with a specific

focus on preventing maladaptation and injury (Morton 1991). Periodisation is a training method that breaks the season into several phases. This enables the modification of training parameters to achieve performance goals by targeting necessary adaptations (Bompa 1983; Bompa 1987). Periodically during specific training phases, elite athletes face periods of intense training, often characterised by multiple sessions in a single day (Hartman et al. 2007) and compounded by

Received: 13 August 2023 ; Revised : 08 September 2023 ; Accepted: 07 December 2023; Published: 25 January 2024

How to cite this article: Chiron, F., Bennett, S., Thomas, C., Leger, D., Hanon, C. and Lopes, P. (2024). Application of Vagal-Mediated Heart Rate Variability and Subjective Markers to Optimise Training Prescription: An Olympic Athlete Case Report. *Int J Disabil Sports Health Sci*;7(1):66-76. <https://doi.org/10.33438/ijdshts.1342537>

heightened psychological pressures imposed by recovery and nutritional strategies, travel, and media obligations that disrupt an athlete's daily routine (Faustin et al. 2022). As a result, these athletes face a unique combination of psychophysiological stressors that, if not managed appropriately, may impair vital cognitive functions such as learning, memory, and neuroendocrine function (Kim and Diamond 2002; Kuipers and Keizer 1988) and increase overuse injury risk (Martin and Amos 2021).

During increased physical activity and mental stress, observable changes occur in autonomic nervous system (ANS) activity. A commonly used indirect indicator of ANS is heart rate variability (HRV), which represents the variation in time intervals between successive heartbeats (Malik 1996; Saboul 2013). HRV analysis indicates the contribution of the parasympathetic nervous system, which is primarily regulated by the vagal nerve (Brodal 2004) referred to as vagal-mediated Heart Rate Variability (vmHRV). The analysis of HRV can be performed via multiple methods, with temporal analysis of vmHRV more reliable than spectral indices (Al Haddad et al. 2011) and is frequently used to reflect the activity of the parasympathetic branch (Berntson et al. 1997).

Using time domain parameters of vmHRV to measure training load (Saboul, Pialoux, and Hautier 2013), optimize training intensity (Earnest et al. 2004), monitor psychophysiological stress adaptation (Flatt and Esco 2016) and track recovery in athletes (Abaji et al. 2016), vmHRV is increasingly used as a tool to monitor psychophysiological adaptation to stress and recovery (Brodal 2004). It is now frequently incorporated into athletic training load management to enhance the efficacy of training programs in athletes undergoing strenuous training regimes (Plews et al. 2012; Gordan, Gwathmey, and Xie 2015).

Critically, several studies have reported the measurement of vmHRV in a single position is insufficient for fatigue detection in athletes (Abaji et al. 2016; Fatisson, Oswald, and Lalonde 2016; Massin et al. 2000). Thus, HRV data should be collected in several positions including supine or standing. Incorporating an orthostatic test, transitioning from lying to standing, during vmHRV testing prompts specific changes in

vmHRV due to diminished vagal output and heightened sympathetic output. This test provides insight into the dynamic adaptations of the ANS during the transition from lying to standing (Lutfullin and Almetova 2014) and can provide additional information about changes in parasympathetic activity (Tulppo et al. 2001). Additionally, many studies treat vmHRV as a singular marker of the stress response, despite the physiological response despite the complex and systemic nature of the stress (Baumann and Turpin 2010; Charmandari, Tsigos, and Chrousos 2005; Seaward 2006). The intricate relationships between stress and vmHRV can often be hard to interpret based on the nature of the stressor. While vmHRV is a beneficial monitoring tool for understanding the effects of psychophysiological stress during different training phases of a season (competition, training phases), it can also be influenced by non-sport-related stressors (Mosley and Laborde 2022). As such, vmHRV analysis should ideally be coupled with a subjective assessment of self-reported variables. Using subjective measures of psychophysiological stress (RPE, sleep, muscle soreness, fatigue, and stress) can optimise the interpretation of vmHRV analysis by providing both physiological and psychological context to HRV changes (Saboul, Pialoux, and Hautier 2013). The inclusion of self-reported variables in subjective assessments is important, given the association of the parasympathetic nervous system with numerous factors relevant to psychophysiology, including cognitive, affective, social, and health phenomena (Plews 2014; Dobbs et al. 2019; Manresa-Rocamora et al. 2021; Carrasco-Poyatos et al. 2022). Despite the availability of many easy-to-use and non-invasive measurement tools, few studies have investigated changes in vagal system activity across different phases of an athletic season and multiple training periods in elite athletes. And to our knowledge, no study has investigated the changes in vagal system activity associated with the evolution of related self-reported variables in elite athletes during different training periods of a pre-Olympic season.

This case study examines the changes in vmHRV and associated subjective data collected during various training phases of a pre-Olympic season in an elite female athlete. More specifically,

the goal was to investigate whether the variation of parasympathetic branch activity with subjective data could optimize the training planning of an elite athlete. The athlete was monitored over 291 days of the investigation and was an international athlete preparing for the 2020 Tokyo Olympic Games. Analyzing the results of vmHRV in combination with subjective data provided feedback to the coach, allowing them to adapt the training program for each training period, fine-tune the planning as the competition neared, and adjust the training content.

MATERIALS AND METHODS

Subject

A Tier 5, World-class female 3000m steeplechase runner (Age: 20 years, Height: 168 cm, weight: 52kg, $\text{VO}_{2\text{max}}$: $67.1 \text{ mL}\cdot\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$) (McKay et al. 2022) collected vmHRV data and provided accompanying subject information for 291 days in preparation for Tokyo 2022 Olympic Games. All data presented were collected as part of routine professional practice in collaboration with exercise physiologists and athletic trainers from the French Institute of Sport (INSEP) and the French Athletics Federation, respectively. Year-round support was provided by INSEP, including accommodation (Paris, France), nutrition (advice and provision), physiological testing, and on-site medical treatment. Exercise training was prescribed and monitored by athletic trainers of the French Athletics Federation, with sessions completed on-site and in the immediate surrounding area (2500-acre Public Park). Specifically, the athlete completed regular endurance and track-based running sessions 10 to 12 times weekly, totalling 75-85km/week, with run sessions supplemented by two strength and conditioning and two yoga sessions. Data were

collected through 5 distinct periods of the season (described below). The participating athlete was informed about the study protocol, their rights, and the associated risks of participation before providing written informed consent. All procedures were approved by the CERSTAPS ethics committee (Approval No. 2022-A00644-39) and conducted in accordance with the Helsinki Declaration (1964, revised in 2001). Regarding vulnerable and disadvantaged groups, the authors took into account the needs and priorities of the groups/individuals in which the study was conducted, in accordance with Articles 19 and 20 of the WMA Declaration of Helsinki, and the situation that the study could not be carried out outside these groups and individuals was taken into account. “Additional precautions were taken by the investigator(s) to protect the volunteers in this study.”

Periods of the season

The composition of the training programme and the distribution of the different training periods during a season are shown in figures 1 and 2, respectively (Fig. 1 and Tab. 1)

- Baseline (rest): a period of no training
- Competition: reduced training volume whilst intensity is maintained around periods of competition.
- Training: a period during which the athlete trained daily in their usual environment, typically within the French Institute of Sport and surrounding public park.
- Training Camp: a short period during which the athlete trains in a different training environment.
- Altitude Training Camp: All altitude training camps were completed at the National
- Altitude Training Centre, Font Romeu, France (~1800m elevation)

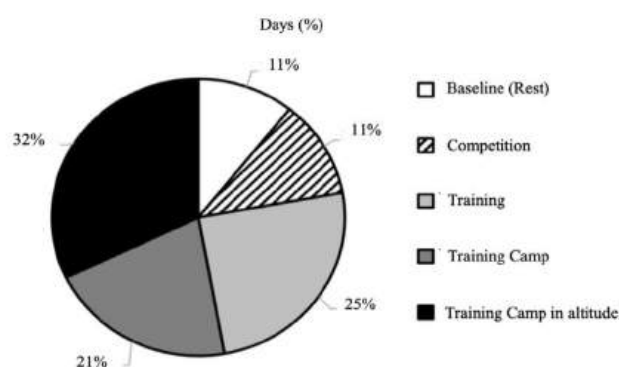


Figure 1. Distribution of the different periods of the season of a high-level athlete

Table 1. Example of a typical training week according to the different periods

	Rest	Competition	Training	Training Camp	Train Camp in altitude
Day 1	Morning Rest	Rest	Footing + Bike	Footing + stretching	Bike session + yoga
	Afternoon Rest	Footing + stretching + yoga	Footing + technical + straight lines	Footing + technical + straight lines	Footing + Musculation
Day 2	Morning Rest	Footing + Musculation	Track session	Track session	Footing + stretching
	Afternoon Rest	Rest	Footing + Musculation	Footing	Bike session + stretching
Day 3	Morning Rest	Track session	Footing	Footing	Rest
	Afternoon Rest	Rest	Rest	Rest	Bike session + musculation
Day 4	Morning Rest	Rest	Footing + stretching	Hill session	Track session
	Afternoon Rest	Rest	Bike session + musculation	Footing + Yoga + stretching	Rest
Day 5	Morning Rest	Footing + stretching	Track session	Track session	Footing + yoga
	Afternoon Rest	Rest	Footing	Footing + musculation	Bike session
Day 6	Morning Rest	Footing + straight lines	Active footing	Active footing	Track session
	Afternoon Rest	Rest	Rest	Rest	Rest
Day 7	Morning Rest	Competition	Bike session	Footing + yoga + stretching	Footing
	Afternoon Rest	Rest	Track session	Rest	Rest

Lying to standing test: Orthostatic test

The orthostatic test, a variant of the tilt test, to collect R-R intervals for 10 minutes was completed 4 times weekly at approximately the same time (~8:50 am) in a darkened room (i.e. curtains drawn) (Bourdillon et al. 2017). Before starting the test, the athlete had to go to the toilet before recording their heart rate to avoid sympathetic activation during the recording. Upon waking, the subject attached a Garmin heart rate belt around their chest, maintained a supine position on their bed for 5 minutes, and asked to breathe normally and spontaneously before quickly standing and standing still for 5 minutes. Data were recorded throughout the test via a Garmin Forerunner 245 Music watch connected to the Garmin HRM-Pro heart rate monitor. All data were uploaded to Garmin Connect before exportation for further analysis.

Analysis of vagally mediated Heart Rate Variability (vmHRV)

After exporting the data, each data file was viewed to correct for artefacts manually and then analysed using specialised vmHRV analysis software "Kubios HRV Standard" (The Biomedical Signal and Medical Imaging Analysis Group,

Department of Applied Physics, University of Kuopio, Finland) (Tarvainen et al. 2014). A systematic average correction was applied to all data to reduce the number of artefacts present. A test was considered unusable if the percentage of artefacts was less than 5%. The following vmHRV of the parasympathetic branch indices were calculated and processed:

Time-domain indices

Mean Heart Rate: HR (global activation indicator of the SNA)

Natural logarithm of the RMSSD
LnRMSSD: (*Parasympathetic modulation (short-term components of vmHRV)*)

Subjective assessment of self-reported variables

In addition to collecting vagally mediated vmHRV indices, self-reported subjective markers were collected to provide psychophysiological and behavioural context to facilitate the interpretation of the analyses of vmHRV data. In this context, the athlete provided information on her previous day's activities, including subjective questionnaires, which the coach routinely considered in the management of training load and recovery. Rating Perceived Exertion (RPE) - Each evening, the perceived difficulty of the day's training was self-reported by

the athlete using the Borg Category Report Scale (CR-10) (Borg, Ljunggren, and Ceci 1985). Subjective sleep assessment - Qualitative and quantitative sleep assessments were assessed via the Spiegel scale in conjunction with self-reported sleep duration. The Spiegel scale consists of six items that assessed sleep quality in the previous month, including sleep latency, duration, night waking occurrences, sleep depth, night-time dreams, and feeling upon waking up. Each item was scored from 0 to 5, with the final score ranging between 0 and 30 (Ren et al. 2018). Subjective assessment of fatigue, sleep, muscle soreness, and perceived stress (Total Subjective) - Perceived tiredness, sleep, muscle soreness, and stress was assessed using subjective questionnaires based on the Hooper scale (Hooper et al. 1995). Each of the 4 items was scored out of 7. These self-reported data were then summed to produce a single variable.

Statistical analyses

The Pearson correlation coefficient was calculated to estimate the correlation between each pair of variables. The results are presented in a correlation matrix in figure and table form. Levene's tests were performed to verify the homogeneity of variables. Before univariate analysis, the Shapiro-Wilk test was performed to check for normal data distribution before comparing each variable as a function of training

load and period by one-way ANOVA. Paired T-tests were used to compare mean differences between variables from the baseline and each of the other training periods. All statistical analyses were performed with R (version 3.6.1; The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria) and the R-compatible Jamovi software (The jamovi project (2021); Version 1.6.23; Retrieved from <https://www.jamovi.org>). All data reported as mean $\pm$ standard deviation unless otherwise stated. The results were considered significant at $P < 0.05$.

RESULTS

A correlation matrix representing the relationships between the multiple vmHRV indices, and the self-reported subjective markers is summarised in a table (Tab. 2). This type of analysis makes it possible to visualise the intensity (significant or not) and direction (positive or negative) of the relationships between several variables. Among the main observations, LnRMSSDsu significantly correlated with the RPE and Sleep quality ($P < 0.05$). HRsu correlates significantly with RPE, Sleep quality, Stress and Muscle Soreness ($P < 0.05$). Lastly, RPE significantly correlates with Muscle Soreness and Tiredness ($P < 0.01$).

Table 2. Correlation matrix (Pearson's r^2) of the different HRV indices and self-reported
The different training periods were compared to the rest period representing the baseline. The vmHRV

	Ln RMSSDsu	Hrsu	LnRMSSDsu - LnRMSSDst	RPE	Spiegel questionnaire	Sleep duration	Sleep quality	Stress	Muscle Soreness	Tiredness	Total Subjective
Ln RMSSDsu	—										
Hrsu	-0.260 ***	—									
LnRMSSDsu - LnRMSSDst	0.766 ***	0.001	—								
RPE	-0.120	0.134 *	-0.149 *	—							
Spiegel questionnaire	0.011	0.052	-0.014	-0.107	—						
Sleep duration	-0.102	0.110	-0.087	-0.067	0.343 ***	—					
Sleep quality	0.122 *	0.116 *	0.124 *	0.122	-0.564 ***	-0.353 ***	—				
Stress	0.084	0.164 **	0.064	-0.082	-0.009	-0.002	0.208 ***	—			
Muscle Soreness	0.029	-0.001	-0.019	0.202 **	-0.342 ***	-0.455 ***	0.436 ***	0.216 ***	—		
Tiredness	-0.106	0.122 *	-0.177 **	0.290 ***	-0.145 ***	-0.079	0.219 ***	0.136	0.353 ***	—	
Total Subjective	0.033	0.132 *	-0.022	0.261 ***	-0.458 ***	-0.398 ***	0.679 ***	0.490 ***	0.801 ***	0.680 ***	—

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

indices and self-reported subjective markers classified according to the training period can be seen in Tab. 3. The evolution of LnRMSSDsu as a function of RPE and training periods during the different training periods is presented in Fig. 2. The comparison of HR, LnRMSSD according to

the different training periods of the season is shown in Fig. 3. During competition, only RPE ($P > 0.05$) and Sleep Quality (Spiegel questionnaire) ($P > 0.01$) were significantly different during the competition period compared to the Baseline (Tab. 3).

Table 3. HRV indices and subjective markers classified according to training period

	Baseline (rest)	Competition	Training	Training Camp	Altitude Training Camp
LnRMSSDsu	1.80 ± 0.14	1.80 ± 0.04	1.55*** ± 0.30	1.69* ± 0.18	1.82 ± 0.15
HRsu (bpm)	49.87 ± 2.62	50.19 ± 2.31	52.30 ± 2.56	53.5** ± 2.47	54.53*** ± 2.15
RPE (au)	0.00 ± 0.00	3.57* ± 2.65	5.18*** ± 2.04	4.64*** ± 1.44	4.62*** ± 2.09
Spiegel questionnaire (au)	28.00 ± 0.76	26.2** ± 1.6	26.56 ± 1.89	25.89*** ± 1.76	25.48** ± 1.85
Sleep duration (minutes)	530.00 ± 35.86	546.00 ± 57.13	529.85 ± 39.40	535.00 ± 53.39	504.03 ± 59.00
Total subjective (au)	13.00 ± 2.67	12.27 ± 1.06	12.85 ± 1.54	12.29 ± 1.19	13.84 ± 1.63

All data reported as mean ± SD. Significant differences represented by * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$,

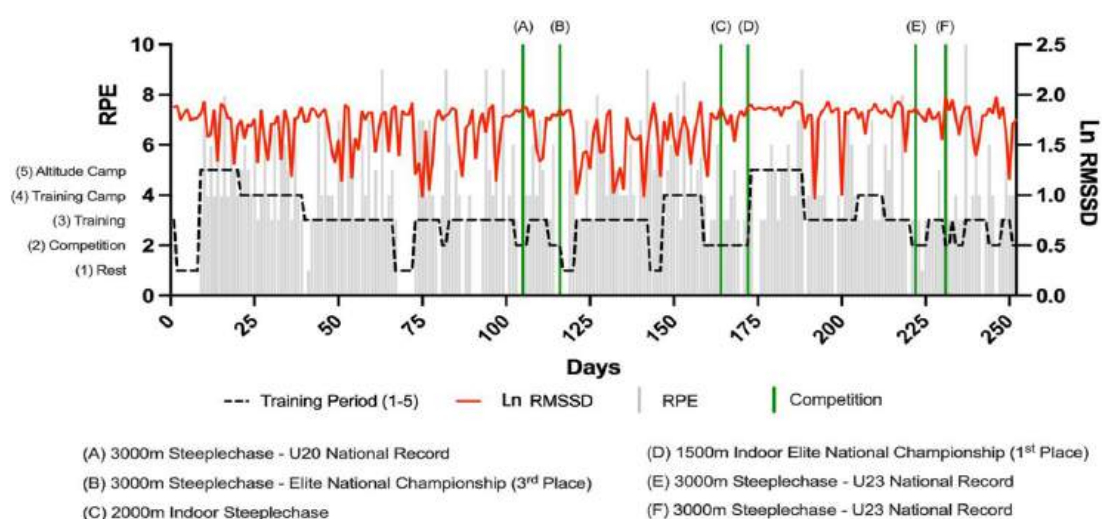


Figure 2. Evolution of the LnRMSSDsu depending of RPE and the training period during a pre-Olympic period

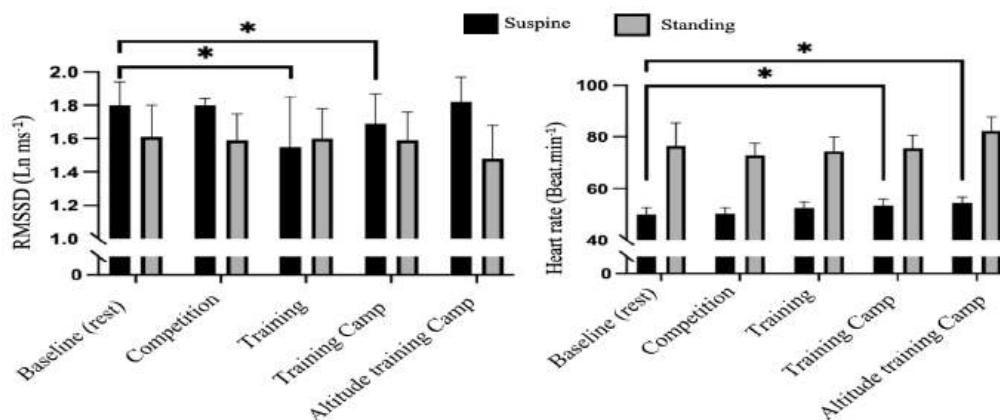


Figure 3. Heart Rate and LnRMSSD responses according to the period of the season

By comparison, during training, LnRMSSDSu were significantly lower ($P > 0.001$), and the RPE ($P > 0.001$) was significantly higher in comparison to the training and the Baseline (Tab. 3. and Fig. 3). Furthermore, during training camps, LnRMSSDSu and Sleep Quality (Spiegel Questionnaire) were significantly lower ($P > 0.05$ and $P > 0.001$). At the same time, the HRsu and RPE were significantly higher ($P > 0.5$ and $P > 0.001$) between the Training Period and the Baseline (Tab. 3 and Fig. 3). HRsu and RPE were significantly higher ($P > 0.001$), and Sleep Quality (Spiegel Questionnaire) was significantly lower ($P > 0.01$) during altitude training camps in comparison to training camps and the baseline (Tab. 3 and Fig. 3).

DISCUSSION

The primary focus of this study was to assess the utility of vmHRV combined with subjective markers for optimising training load prescription and management throughout an Olympic season in a high-performance athlete. During the monitoring period, the data generated from vmHRV and subjective reports were used by coaches to manipulate critical training variables, including intensity, duration, and recovery periods based on alterations in ANS activity and psychophysiological stress. This approach represented a data-informed approach and enabled the athlete to excel during critical competitions (Fig. 3).

Tapering is a common approach athletes employ to ensure optimal physiological condition in preparation for competition. Tapering involves a gradual decrease in the training volume with the maintenance of exercise intensity (Mujika et al. 2000). The resultant changes in vmHRV activity throughout tapering remain to be resolved. Nevertheless, the present case study observed that LnRMSSDSu and HRsu were similar during the competition and rest (baseline) (Tab. 3). Additionally, in contrast to previous work by Iellamo et al. (2002), LnRMSSDSu was elevated following periods of intense training loads during specific preparation phases for competition (Fig. 2 and Fig. 3). This vagal activity change demonstrates that applying a tapering strategy enables a return of vmHRV to its baseline level, even while training continues. In this instance, the athletic support staff used daily vmHRV and

subjective data to ensure sufficient tapering preceding competition.

We observed significant correlations between perceived training load, self-reported subjective data, and vmHRV indices, which contrasted the study by Morales et al. (2017) (Tab. 2). In conjunction with the observed decline in sleep quality, this data emphasises the value of coupling vmHRV with subjective markers for tracking the psychophysiological stress in elite athletes, particularly during competition periods. The performance results from national and international competitions and various national records associated with positive vmHRV adaptations in response to training modifications highlight the necessity for a data-informed tapering strategy (Plews et al., 2014). Therefore, monitoring vmHRV with subjective markers enables training-specific alterations to training prescription for example, by adapting training content or postponing important training sessions and recovery periods increasing recovery time or switching from running to cycling to ensure optimal performance at competition.

During the Training and Training Camp periods, it was observed that LnRMSSDSu and HRsu values significantly deviated from those during the rest period (Tab. 3). These substantial alterations in vmHRV indices align with periods of peak RPE (Fig. 3). Baumert et al., (2006) similarly reported changes in the parasympathetic branch activity during periods of high training load typically occurring during training camp periods. Consequently, monitoring the autonomic nervous system (ANS) using vmHRV is recommended to keep track of individual adaptations to increased training loads (Manzi et al., 2009). Effective training planning and programming for endurance sports necessitate an optimal physiological stress level to trigger positive adaptations in response to the training load (Buchheit et al. 2010). Critically, when exercise training is mismanaged (characterised by high training load, intensity and inadequate recovery) performance may be impaired or worsened and increased risk of overuse injuries.

In our case study, coupling vmHRV monitoring with subjective markers empowered the coach to tailor his training programs and content to optimise the positive adaptations brought on by the increased psychophysiological stress from the increased training load. This

approach to training periods and camps prepared the athlete adequately for competitions (Fig. 2.). Monitoring vmHRV and subjective markers enables personalised training (Plewset al., 2014) and training load adjustment (Pichot et al. 2000), enhancing different training periods for optimal performance and injury prevention.

During Altitude camps, RPE and HRsu were significantly increased (Tab. 3 and Fig. 3), which may be partly explained by the increase in relative hypoxia (Naeije 2010). Despite the significant rise in HRsu, correlating with the increased training load, it's crucial to mention that LnRMSSDsu didn't decrease substantially. Like Field Schmitt, Regnard, and Millet (2015), LnRMSSD monitoring during altitude training failed to effectively monitor changes in ANS activity induced by training-related stress, which can't be separated from hypoxic stress. Moreover, it's widely acknowledged that altitude significantly impacts both the quality and quantity of sleep (Bloch et al. 2015), a hypothesis supported by this case study (Tab. 3). This deterioration in sleep quality can be attributed to the shift in the sleep environment, further exacerbating the effects of hypoxic stress on sleep. Therefore, using vmHRV in combination with subjective markers to monitor ANS activity is crucial to track the effects of psychophysiological stress induced by increased training load, intensified by hypoxic stress.

Practical application

Tracking shifts in ANS activity, particularly the parasympathetic branch, can provide a beneficial instrument for coaches to manage training across varying season periods. However, accounting for the cast range of inter-individual variabilities between athletes is crucial. Therefore, practitioners providing feedback to coaches must consider these personal differences and offer customised training load management to facilitate the stress/adaptation process. It's also vital to understand that elite athletes must impose a sufficiently high-stress level to trigger psychophysiological adaptations that ultimately enhance performance. Unlike some suggestions, elite athletes might need to train even with reduced vagal tone (parasympathetic activity) to elicit necessary adaptations for performance improvement. As such, tracking changes in ANS activity, particularly via specific vmHRV markers, can furnish valuable insights for coaches about the autonomic adaptations resulting from the psycho-

physiological stress applied to the athlete, effectively averting any overload phenomenon (Bosquet et al. 2007). In this regard, monitoring the training load and conducting a comprehensive analysis of the training program, including associated indirect factors, is imperative to facilitate long-term modifications to the training schedule (Mujika 2012).

However, there remains a necessity for more studies on elite athletes employing this methodology before we can assert that vmHRV, in conjunction with subjective markers, forms an effective tool for training planning.

Conclusion

In conclusion, this case study has reported alterations in ANS activity, specifically focusing on the parasympathetic branch, in conjunction with subjective data during varying phases of an Olympic season for an elite athlete. Combined with self-reported indicators, this approach supplied critical information that allowed practitioners to fine-tune the psycho-physiological stress imposed on their athletes during their decision-making process. Ultimately, this study underscores the sensitivity of vmHRV throughout different stages of an athletic season and pinpoints an imbalance in vagal tone during high training load periods (Training period and Training Camp period), manifested as a reduction in parasympathetic activity. Conversely, during lower training load phases (Competition Period), vmHRV improved, providing indirect feedback for perfecting pre-competition tapering and ensuring appropriate athlete recovery. From a monitoring perspective, vmHRV, along with subjective markers, could be an effective tool to adapt training periods, allowing the regulation of psychophysiological stress effects throughout an Olympic season.

Conflict of interest

No conflict of interest is declared by the authors. In addition, no financial support was received.

Ethics Statement

This study was approved by the CERSTAPS ethics committee (Approval No. 2022-A00644-39) and conducted in accordance with the Helsinki Declaration (1964, revised in 2001).

Author Contributions

Planned by the author: Study Design, Data Collection, Statistical Analysis, Data Interpretation, Manuscript Preparation, Literature

Search. Author have read and agreed to the published version of the manuscript

REFERENCES

- Abaji, J.P., Curnier, D., Moore, R.D., Ellemberg, D. (2016). Persisting Effects of Concussion on Heart Rate Variability during Physical Exertion. *Journal of neurotrauma*, 33(9), 811–817. [\[PubMed\]](#)
- Al Haddad, H., Laursen, P. B., Chollet, D., Ahmaidi, S., Buchheit, M. (2011). Reliability of resting and postexercise heart rate measures. *International journal of sports medicine*, 32(8), 598–605. [\[PubMed\]](#)
- Baumann, N., Turpin, J. (2010). Neurochemistry of stress. An overview. *Neurochemical research*, 35(12), 1875–1879. [\[CrossRef\]](#)
- Baumert, M., Brechtel, L., Lock, J., Voss, A. (2006). Changes in heart rate variability of athletes during a training camp. *Biomedizinische Technik. Biomedical engineering*, 51(4), 201–204. [\[PubMed\]](#)
- Berntson, G., Bigger, J., Jr, Eckberg, L., Grossman, P., Kaufmann, P., Malik, et al. (1997). Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*, 34(6), 623–648. [\[PubMed\]](#)
- Bloch, K., Buenzli, J., Latshang, T., Ulrich, S. (2015). Sleep at high altitude: guesses and facts. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 119(12), 1466–1480. [\[PubMed\]](#)
- Bompa, T. (1983). Theory And Methodology Of Training. Dubuque. Iowa: Kendall/Hunt Publishing Company.
- Bompa, T. (1987). Periodisation as a key element of planning. *Sports Coach*, 11(1), 20–23.
- Borg, G., Ljunggren, G., Ceci, R. (1985). The increase of perceived exertion, aches and pain in the legs, heart rate and blood lactate during exercise on a bicycle ergometer. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 54(4), 343–349. [\[PubMed\]](#)
- Bosquet, L., Montpetit, J., Arvisais, D., Mujika, I. (2007). Effects of tapering on performance: a meta-analysis. *Medicine and science in sports and exercise*, 39(8), 1358–1365. [\[PubMed\]](#)
- Bourdillon, N., Schmitt, L., Yazdani, S., Vesin, J. M., Millet, G. (2017). Minimal Window Duration for Accurate HRV Recording in Athletes. *Frontiers in neuroscience*, 11, 456. [\[PubMed\]](#)
- Brodal, P. (2004). *The central nervous system: structure and function*. oxford university Press.
- Buchheit, M., Simon, C., Piquard, F., Ehrhart, J., Brandenberger, G. (2004). Effects of increased training load on vagal-related indexes of heart rate variability: a novel sleep approach. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology*, 287(6), [\[PubMed\]](#)
- Buchheit, M., Chivot, A., Parouty, J., Mercier, D., Al Haddad, H., Laursen, P., et al. (2010). Monitoring endurance running performance using cardiac parasympathetic function. *European journal of applied physiology*, 108(6), 1153–1167. [\[PubMed\]](#)
- Carrasco-Poyatos, M., González-Quílez, A., Altini, M., Granero-Gallegos, A. (2022). Heart rate variability-guided training in professional runners: Effects on performance and vagal modulation. *Physiology & behavior*, 244, 113654. [\[PubMed\]](#)
- Charmandari, E., Tsigos, C., & Chrousos, G. (2005). Endocrinology of the stress response. *Annual review of physiology*, 67, 259–284. [\[PubMed\]](#)
- Dobbs, W., Fedewa, M., MacDonald, H., Holmes, C., Cicone, Z., Plews, D. J., et al. (2019). The Accuracy of Acquiring Heart Rate Variability from Portable Devices: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 49(3), 417–435. [\[PubMed\]](#)
- Earnest, C. P., Jurca, R., Church, T. S., Chicharro, J. L., Hoyos, J., Lucia, A. (2004). Relation between physical exertion and heart rate variability characteristics in professional cyclists during the Tour of Spain. *British journal of sports medicine*, 38(5), 568–575. [\[PubMed\]](#)
- Fatissou, J., Oswald, V., Lalonde, F. (2016). Influence diagram of physiological and environmental factors affecting heart rate variability: an extended literature overview. *Heart international*, 11(1), e32–e40. [\[PubMed\]](#)
- Faustin, M., Burton, M., Callender, S., Watkins, R., Chang, C. (2022). Effect of media on the

- mental health of elite athletes. *British journal of sports medicine*, 56(3), 123–124. [[PubMed](#)]
- Flatt, A., Esco, M. (2016). Evaluating Individual Training Adaptation With Smartphone-Derived Heart Rate Variability in a Collegiate Female Soccer Team. *Journal of strength and conditioning research*, 30(2), 378–385. [[PubMed](#)]
- Gamble, P. (2007). Challenges and game-related solutions to metabolic conditioning for team sports. *Strength & Conditioning Journal*, 29(4), 60–65. [[CrossRef](#)]
- Gordan, R., Gwathmey, J., Xie, L. (2015). Autonomic and endocrine control of cardiovascular function. *World journal of cardiology*, 7(4), 204–214. [[PubMed](#)]
- Hartman, M., Clark, B., Bembens, D., Kilgore, J., Bemben, M. (2007). Comparisons between twice-daily and once-daily training sessions in male weight lifters. *International journal of sports physiology and performance*, 2(2), 159–169. [[PubMed](#)]
- Hooper, S., Mackinnon, L., Howard, A., Gordon, R., Bachmann, A. (1995). Markers for monitoring overtraining and recovery. *Medicine and science in sports and exercise*, 27(1), 106–112. [[PubMed](#)]
- Iellamo, F., Legramante, J., Pigozzi, F., Spataro, A., Norbiato, G., Lucini, D., et al. (2002). Conversion from vagal to sympathetic predominance with strenuous training in high-performance world class athletes. *Circulation*, 105(23), 2719–2724. [[PubMed](#)]
- Kim, J., Diamond, D. M. (2002). The stressed hippocampus, synaptic plasticity and lost memories. *Nature reviews. Neuroscience*, 3(6), 453–462. [[PubMed](#)]
- Kuipers, H., Keizer, H. A. (1988). Overtraining in elite athletes. Review and directions for the future. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 6(2), 79–92. [[PubMed](#)]
- Lutfullin, I., Al'metova, R. R. (2014). *Fiziologiya cheloveka*, 40(2), 105–111.
- Malik, M. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use: Task force of the European Society of Cardiology and the North American Society for Pacing and Electrophysiology. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 1(2), 151–181. [[PubMed](#)]
- Manresa-Rocamora, A., Sarabia, J., Javaloyes, A., Flatt, A., Moya-Ramón, M. (2021). Heart Rate Variability-Guided Training for Enhancing Cardiac-Vagal Modulation, Aerobic Fitness, and Endurance Performance: A Methodological Systematic Review with Meta-Analysis. *International journal of environmental research and public health*, 18(19), 10299. [[PubMed](#)]
- Manzi, V., Castagna, C., Padua, E., Lombardo, M., D'Ottavio, S., Massaro, M., et al. (2009). Dose-response relationship of autonomic nervous system responses to individualized training impulse in marathon runners. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology*, 296(6), H1733–H1740. [[PubMed](#)]
- Martin, S., Amos, W. (2021). Signatures of Introgression across the Allele Frequency Spectrum. *Molecular biology and evolution*, 38(2), 716–726. [[PubMed](#)]
- Massin, M., Maeyns, K., Withofs, N., Ravet, F., Gérard, P. (2000). Circadian rhythm of heart rate and heart rate variability. *Archives of disease in childhood*, 83(2), 179–182. [[PubMed](#)]
- McKay, A., Stellingwerff, T., Smith, E., Martin, D., Mujika, I., Goosey-Tolfrey, V. L., et al. (2022). Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework. *International journal of sports physiology and performance*, 17(2), 317–331. [[PubMed](#)]
- Morales, J., Álamo, J., García-Massó, X., López, J. L., Serra-Añó, P., González, L. M. (2014). Use of heart rate variability in monitoring stress and recovery in judo athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(7), 1896–1905. [[PubMed](#)]
- Morton, R. (1991). The quantitative periodization of athletic training: a model study. *Research in Sports Medicine: An International Journal*, 3(1), 19–28. [[CrossRef](#)]
- Mosley, E., Laborde, S. (2022). A scoping review of heart rate variability in sport and exercise psychology. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 1–75. [[CrossRef](#)]
- Mujika I. (2014). Olympic preparation of a world-class female triathlete. *International journal of sports physiology and performance*, 9(4), 727–731. [[PubMed](#)]
- Naeije R. (2010). Physiological adaptation of the

- cardiovascular system to high altitude. *Progress in cardiovascular diseases*, 52(6), 456–466. [[PubMed](#)]
- Pichot, V., Roche, F., Gaspoz, J., Enjolras, F., Antoniadis, A., Minini, P., et al. (2000). Relation between heart rate variability and training load in middle-distance runners. *Medicine and science in sports and exercise*, 32(10), 1729–1736. [[PubMed](#)]
- Plews, D. (2014). *The practical application of heart rate variability-monitoring training adaptation in world class athletes* (Doctoral dissertation, Auckland University of Technology).
- Plews, D., Laursen, P., Le Meur, Y., Hausswirth, C., Kilding, A., Buchheit, M. (2014). Monitoring training with heart rate-variability: how much compliance is needed for valid assessment?. *International journal of sports physiology and performance*, 9(5), 783–790. [[PubMed](#)]
- Plews, D., Laursen, P., Kilding, A., Buchheit, M. (2012). Heart rate variability in elite triathletes, is variation in variability the key to effective training? A case comparison. *European journal of applied physiology*, 112(11), 3729–3741. [[PubMed](#)]
- Ren, J., Zhao, M., Liu, B., Wu, Q., Hao, Y., Jiao, M., et al. (2018). Factors Associated With Sleep Quality in HIV. *The Journal of the Association of Nurses in AIDS Care: JANAC*, 29(6), 924–931. [[PubMed](#)]
- Saboul, D. (2013). *Apports de la variabilité de la fréquence cardiaque dans l'évaluation de la charge d'entraînement et le suivi d'athlètes: aspects méthodologiques et applications pratiques* (Doctoral dissertation, Université Claude Bernard-Lyon I).
- Saboul, D., Pialoux, V., Hautier, C. (2013). The impact of breathing on HRV measurements: implications for the longitudinal follow-up of athletes. *European journal of sport science*, 13(5), 534–542. [[PubMed](#)]
- Schmitt, L., Regnard, J., Millet, G. (2015). Monitoring Fatigue Status with HRV Measures in Elite Athletes: An Avenue Beyond RMSSD?. *Frontiers in physiology*, 6, 343. [[PubMed](#)]
- Seaward, B. (1999). *Managing stress: Principles and strategies for health and wellbeing*. Jones & Bartlett Learning.
- Tarvainen, M., Niskanen, J., Lipponen, J., Ranta-Aho, P., Karjalainen, P. (2014). Kubios HRV--heart rate variability analysis software. *Computer methods and programs in biomedicine*, 113(1), 210–220. [[PubMed](#)]
- Thayer, J., Ahs, F., Fredrikson, M., Sollers, J., Wager, T. (2012). A meta-analysis of heart rate variability and neuroimaging studies: implications for heart rate variability as a marker of stress and health. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 36(2), 747–756. [[PubMed](#)]
- Tulppo, M., Hughson, R., Mäkikallio, T., Airaksinen, K., Seppänen, T., Huikuri, H. (2001). Effects of exercise and passive head-up tilt on fractal and complexity properties of heart rate dynamics. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology*, 280(3), H1081–H1087. [[PubMed](#)]



ÉTUDE 2 - COURIR SOUS PRESSION PARTIE I: COMMENT LE STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE INFLUENCE-T-IL LES SPORTIFS DE HAUT-NIVEAU?

Publication associée (companion paper en cours de révision) : **Chiron, F.**, Erblang, M., Gulören, B., Poirier, C., Servonnet, A., Gaudin, M., Le Coz, C., Chennaoui, M., Hanon., Léger, D., & Thomas, C. (2025). Racing Under Pressure Part I: How Psychophysiological Stress Impacts Top Elite Athletes?. *Journal of Strength and Conditioning Research*. (under review).

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE 2 :

Les compétitions d'athlétisme de haut-niveau, exposent les athlètes élités à des efforts intenses répétés dans un court laps de temps. À l'image des disciplines telles que le 400 m, le 400 m haies ou le 800m, ces efforts mobilisent principalement les systèmes énergétiques anaérobie lactique et aérobie, entraînant des perturbations métaboliques et neuro-musculaires. Toutefois, ces perturbations métaboliques ne suffisent pas à expliquer la difficulté de ces athlètes à réitérer des performances à leur meilleur niveau, suggérant ainsi un rôle central du stress psychophysologique. Ce stress cumulé est associé à l'intensité des épreuves ainsi que l'enjeu de la compétition impactant le système nerveux autonome (SNA) et le système neuro-endocrinien. À notre connaissance, aucune étude n'a exploré les effets combinés des perturbations psychophysologiques sur ces systèmes durant les compétitions, ni la variabilité des réponses individuelles.

L'objectif principal de cette étude était donc d'évaluer les effets des exercices supra-maximaux consécutifs sur le SNA et le SNE chez des athlètes élités, en utilisant une approche multifactorielle tout en identifiant des profils d'athlètes particulièrement sensibles.

L'étude a été réalisée sur 22 athlètes élités (10 femmes, 12 hommes) participant aux Championnats de France Élite d'Athlétisme 2023. Les mesures incluaient la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) via l'indicateur RMSSD (Root Mean Square of Successive Differences) avant, pendant (séries et finales), et après la compétition, des biomarqueurs salivaires (cortisol, alpha-amylase et testostérone) prélevés au réveil et post-course, ainsi que l'anxiété précompétitive évaluée par le questionnaire CSAI-2R.

Les résultats de cette étude ont mis en évidence une diminution significativement du RMSSD en position couchée entre la baseline et les courses réalisées en séries (baseline : $110,66 \pm 21,30$ ms ; séries : $92,37 \pm 35,44$ ms ; $p < 0,05$). Cette diminution a été renforcée le matin des finales (finales : $77,40 \pm 48,14$ ms ; $p < 0,05$). Conjointement, la fréquence cardiaque mesurée en position couchée a augmenté significativement entre la baseline et les finales (baseline : $53,63 \pm 3,31$ bpm ; finales : $58,88 \pm 11,00$ bpm ; $p < 0,05$). Au niveau des marqueurs salivaires, les concentrations d'alpha-amylase salivaire ont augmenté significativement entre les mesures pré-course et post-course durant l'ensemble de la compétition ($p < 0.001$). Les niveaux de testostérone salivaire ont diminué significativement entre la baseline et les finales (baseline : $0,0194 \pm 0,0136$ µg/dL ; finales : $0,0158 \pm 0,0070$ µg/dL ; $p < 0,05$). Le ratio T/C a également diminué significativement entre la phase baseline et les différentes phases de la compétition (baseline : $0,0618 \pm 0,0440$; séries : $0,0376 \pm 0,0312$; finales : $0,0387 \pm 0,0257$; $p < 0,001$). Par ailleurs, l'intensité de l'anxiété somatique a augmenté significativement entre la phase

baseline et les séries (baseline : $10,14 \pm 2,23$ u.a ; séries : $12,27 \pm 3,28$ u.a ; $p < 0,001$). Enfin, une corrélation significativement négative ($r = -0,75$; $p < 0,05$) obtenue à partir de la soustraction entre le RMSSD et le score CSAI-2R a permis de mettre en évidence que 7 athlètes répondaient davantage au stress induit par la compétition en particulier le premier jour de la compétition (séries).

En conclusion, cette étude met en évidence l'impact systémique du stress compétitif sur les athlètes d'élite. Les perturbations du SNA et du SNE, bien que transitoires, peuvent compromettre la récupération. Des interventions ciblées, comme les techniques de relaxation et de régulation de l'activité parasympathique, peuvent ainsi être envisagées afin d'optimiser le sommeil processus important dans la récupération des athlètes de haut-niveau. Enfin, du fait de son approche multifactorielle, cette étude apporte un éclairage nouveau sur l'impact systémique du stress induit par la compétition.

RACING UNDER PRESSURE PART I: HOW PSYCHOPHYSIOLOGICAL STRESS IMPACTS TOP ELITE ATHLETES?

François Chiron ^{1,2}, Mégane Erblang ¹, Bora Gulören ¹, Canelle Poirier ², Aurelie Servonnet ⁴, Mariette Gaudin ⁴, Christine Le Coz ⁴, Mounir Chennaoui ^{3,4}, Christine Hanon ², Damien Léger ³ and Claire Thomas ¹

¹ *Exercise Biology for Performance and Health Laboratory (LBEPS), Univ Evry, IRBA, University Paris Saclay, 91025 Evry, France*

² *French Athletics Federation (FFA), 33 Avenue Pierre de Coubertin, 75640 Paris CEDEX, France*

³ *Université Paris Cité, VIFASOM (Vigilance, Fatigue, Sleep and Public Health), Hôtel-Dieu, Paris, France*

⁴ *French Armed Forces Biomedical Research Institute (IRBA), Fatigue and Vigilance Unit, Bretigny-sur-Orge, France*

Abstract

This study aimed to investigate the impact of psychophysiological stress on the autonomic nervous system (ANS) and hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis in World Class during consecutive supra-maximal exercises in competition. The research sought to provide a multifactorial understanding of the physiological and psychological responses to competition stress, while accounting for individual variations.

Twenty-two elite athletes (N = 22) competing in the French Elite Athletics Championships participated in this study. Heart rate variability (HRV), salivary biomarkers (alpha-amylase, testosterone, cortisol) and pre-competition anxiety (CSAI-2R) were measured during three distinct periods: baseline (pre-competition), competition (heats and finals), and post-competition.

Repeated measures ANOVA was used to assess changes across these periods, with post-hoc tests for specific comparisons.

Significant disruptions in homeostasis were observed during the competition. In the morning, parasympathetic activity, measured by the root mean square of successive differences (RMSSD), decreased significantly during competition ($p < 0.05$), while heart rate (HR) increased ($p < 0.05$). Salivary alpha-amylase concentrations rose significantly post-race ($p < 0.05$), indicating heightened sympathetic activity. Testosterone levels decreased significantly throughout the competition, accompanied by a reduction in the testosterone-to-cortisol (T/C) ratio ($p < 0.05$). CSAI-2R score increased significantly from Baseline to Heats ($P < 0.001$). 7 athletes exhibited a greater sensitivity to competition-induced stress, characterized by a negative correlation between RMSSD and CSAI-2R scores ($r = -0.75$; $p < 0.05$; $n = 7$).

This study is the first to demonstrate that psychophysiological stress induced by consecutive supra-maximal exercises in competition disrupts ANS and the HPA axis. This stress leads to a decrease in parasympathetic activity, hormonal imbalances such as reduced salivary testosterone concentration, and an increase in pre-competitive anxiety. The results also highlight variable responses among athletes, underscoring the need for targeted stress management for those athletes who are most sensitive to stress.

Key words: World Class athlete, Autonomic nervous system, Neuroendocrine system

Introduction

Athletes competing in events like the 400m, 800m, or 400m hurdles often face the challenge of performing in multiple rounds (series, semifinals, and finals) over consecutive days in a highly competitive international context. These events, which rely on both anaerobic and aerobic energy systems (24,44), particularly the lactate anaerobic pathway, lead to metabolic (24,44) and neuromuscular (12) disruptions. Although these disturbances typically return to baseline within 90 minutes post-exercise (37), elite athletes report difficulties in maintaining peak performance throughout multi-day championships (personal data, European Athletics Championships, Berlin 2018). This suggests that metabolic stress alone cannot fully explain performance declines, highlighting the need for a more systemic, psychophysiological understanding of the stress athletes experience. Indeed, international competition could be an external stimulus that can trigger an adaptive response coordinated by the stress system (10), which included the autonomic nervous system (ANS) and the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis. Both are sensitive to psychological and physiological stressors (21,23,45), which could be induced during intense exercise (39) and competitive stress (46).

The ANS regulates the stress response through the parasympathetic and sympathetic nerves. Studies in both individual and team sports have shown that heart rate variability (HRV) fluctuations during and Olympic season (11) and competition (41, 23), reflecting changes of the parasympathetic branch of the ANS, are mainly linked to emotional state and competitive stress. Supra-maximal exercise and prolonged competitions can significantly alter HRV, reducing parasympathetic activity, which can persist for several days and disrupt homeostasis (5,8,19,27). These ANS disruptions, combined with psychological stress, emphasize the need for stress management to optimize recovery, as reduced parasympathetic activity often related to pre-competition anxiety can affect both immediate performance and recovery quality, particularly sleep (47). Additionally, ANS responses to psychophysiological stress may vary depending on factors such as gender, training level, and exercise type (23). Furthermore, the ANS stimulate the adrenal medulla to release catecholamines, while steroid hormones act as the final effectors of the HPA axis.

Salivary biomarkers produced by the HPA axis, such as cortisol and alpha-amylase, also offer a reliable, non-invasive way to assess these physiological and psychological responses to stress (39). Research has shown that changes in salivary hormone concentrations, alongside self-reported questionnaires, reflect disruptions in homeostasis due to psychophysiological stress from training, pre-competition, and competition (27). Alpha-amylase is particularly useful in sports science to monitor ANS activity, with its levels rising during physical exercise due to increased sympathetic activity (33). However, the relationship between alpha-amylase and cortisol in response to stress remains unclear and warrants further investigation (18). Cortisol, a key catabolic hormone, is critical for regulating tissue degradation and is often used as a marker of physiological stress, especially during intense exercise (9) and competitive stress (42). The cortisol response to competition varies across studies, with some showing increased cortisol levels linked to anxiety (33, 22), while others find no such relationship (46, 51), suggesting that individual factors may influence cortisol secretion (49). In contrast, testosterone (T), an anabolic hormone, and the testosterone/cortisol (T/C) ratio, have been shown to track psychophysiological stress during repeated exertion and competition (4). While many studies have explored testosterone levels in response to victory or defeat (22) or the type of exercise (1), the effects of repeated supramaximal exercise during competition in elite athletes remain underexplored. Notably, interindividual variability in testosterone responses highlights the importance of considering factors such as the type of competition, athlete skill level, and individual characteristics when studying psychophysiological stress and biomarker changes.

To our knowledge, no study has explored how substantial metabolic disturbances during high-level athletic competition exacerbate ANS disruptions. The cumulative impact of psychophysiological stress on ANS activity, especially its parasympathetic branch, during repeated supramaximal exercises in competition remains unstudied. Additionally, the lack of consensus on the effects of psychophysiological stress on the HPA axis highlights the need to consider individual athlete responses to better understand competition's impact. This study aims to examine the effects of competition-induced psychophysiological stress in elite athletes using a systemic approach that combines various stress markers. Specifically, we seek to understand the consequences of repeated supramaximal exercises on the ANS and HPA axis, and to explore individual responses to competition-related stress. We hypothesize that repeated supramaximal efforts during national competitions disrupt ANS and HPA axis activity, reducing parasympathetic function, altering salivary biomarker levels, and increasing psychological stress.

Material & Methods

Experimental approach to the problem

In order to better understand and characterise the evolution of psychophysiological stress in elite athletes, our study was conducted during the 2023 French Elite Athletics Championships. This competition provided a framework for observing and analysing the physiological and psychological responses of athletes under conditions of maximum performance. The data collected allows us to deepen our understanding of the stress mechanisms in elite athletes and to assess the impact of competition on these essential variables. In order to compare the measurements obtained during the competition, the baseline was established during the three days prior to the competition, while the post-test period corresponded to the three days following the final day of the competition. The athletes followed their usual competition routines, which included mobility exercises, jogging, stretching, technical drills, sprints, and block-start practice (only for sprint races).

Subjects

Classification of Elites and World Class athletes

Twenty-two ($N = 22$) athletes (elite = 7; world class = 15), including 10 women (age: 27.20 ± 3.82 years, weight: 58.30 ± 4.47 kg, height: 170.00 ± 3.7 cm) and 12 men (age: 25.08 ± 3.99 years, weight: 68.42 ± 4.58 kg, height: 182.21 ± 5.7 cm) were included in this study. Of the 22 subjects, 8 athletes competed in the 400 metres (4 men and 4 women), 12 athletes competed in the 800 metres (7 men and 5 women) and 2 athletes competed in the 400 metres hurdles (1 man and 1 woman). The minimum performance required for inclusion in the study was 46.64 s for men and 53.44 s for women in the 400 m; 51.24 s for men and 59.04 s for women in the 400 m hurdles; and 108.00 s for men and 126.00 s for women in the 800 m. In addition, 20 athletes had already represented the French national team in the 400 m, 400 m hurdles or 800 m and met international performance standards (45.84 s for men and 52.04 s for women in the 400 m; 50.14 s for men and 56.84 s for women in the 400 m hurdles; and 106.24 s for men and 121.84 s for women in the 800 m). Of the 22 athletes, 12 had participated in the 2024 Olympic Games, 3 were medalists at the most recent World Championships (2023), 6 had medalists at the most recent European Championships (2023 and 2024), 6 were French national champions, and 13 had podium finishes at the French Championships. All participants were informed of the study protocol, their rights and the risks involved before giving their written informed consent. All procedures were approved by the CERSTAPS Ethics Committee (CERSTAPS No. 2022-A00644-39/approval date 15 March 2022) and conducted in accordance with the Declaration of Helsinki (1964, revised 2001). No subjects were excluded from the study.

Procedures

The races supporting our study took place during the 2023 French Elite Athletics Championships. Performance times (for the 400 m, 400 m hurdles, and 800 m, measured in seconds), including overall and split times recorded during the championships, were provided by MatSport (Saint-Ismier, France) and collected from the French Athletics Federation's database. The races were held on a 400 m outdoor track (Complexe Sportif du Stade, Albi, France). Over the two days of competition (Day 1 and Day 2) (Fig. 1), participants competed daily in a 400 m, 400 m hurdles, or 800 m race (heats and finals). The competition period included a specific warm-up, a call room, a head-to-head race (with starting blocks for sprint events), and recovery. Athletes' warm-up sessions lasted one hour and preceded the call room (held 20 minutes before the race).

Lactatemia

Blood lactate concentration ([La]) was measured by fingertip puncture (20 µL) to assess acid-base regulation. Samples were collected during the initial visit (Baseline) and at the end of each race, 3 minutes (+3') and 6 minutes (+6') post-race. The samples were analyzed using a Lactate Pro 2 device (Arkray, LT-1730, Kyoto, Japan).

Heart Rate Variability

Lying to standing test: Orthostatic test

The orthostatic test, a variant of the tilt test, aimed to collect R-R intervals over 10 minutes, alternating 5 minutes in a lying position with 5 minutes in a standing position. This test was to be conducted at the same time each day (~30 minutes) in a dark room (i.e., curtains drawn) (5). Before starting the test, athletes were instructed to use the bathroom to avoid sympathetic activation during recording. Upon waking, participants attached a Polar H10 heart rate strap (H10, Polar Electro GmbH, Finland, Gilgen-Ammann et al., 2019) around their chest and remained lying on their bed for 5 minutes before standing up and remaining still for 5 minutes. Participants were required to breathe normally and spontaneously. Data were recorded continuously throughout the 10-minute test via Bluetooth using the Elite HRV app (version 5.2.1, Elite HRV Inc., Asheville, NC, USA), which allows recording of the most common HRV indices. All data were then downloaded into Kubios HRV Premium software (version 3.4.3) for signal analysis.

Analysis of vagally mediated Heart Rate Variability (vmHRV)

After data export, each data file was manually inspected to correct artifacts, and then analyzed using specialized analysis software "Kubios HRV Standard" (The Biomedical Signal and Medical Imaging Analysis Group, Department of Applied Physics, University of Kuopio, Finland). A systematic mean correction was applied to all data to reduce the number of artifacts. A test was considered unusable if the percentage of artifacts was greater than 5%. Indices such as the average heart rate (HR: an indicator of overall ANS activation) and the root mean square of successive differences (RMSSD: an indicator of vagal activity) were calculated and considered as indices of the parasympathetic branch of the ANS.

Competitive State Anxiety Inventory-2 (CSAI-2R) questionnaire

A modified version of the Competitive State Anxiety Inventory-2 (CSAI-2R) (30) was used to measure cognitive anxiety, somatic anxiety, and self-confidence before performance. The CSAI-2 includes 27 items, with nine items in each subscale. Examples of cognitive anxiety items include "I am concerned about this competition" and "I am worried about performing poorly," while somatic anxiety items include "I feel nervous" and "My body feels tense." The response scale allowed participants to rate the intensity of each symptom on a scale from 1 (not at all) to 4 (very much), resulting in scores ranging from 9 to 36 for each subscale. Additionally, a direction scale was included for the cognitive and somatic anxiety items, where participants rated the extent to which the intensity of each symptom facilitated or debilitated subsequent performance on a scale from -3 (very debilitating) to +3 (very facilitating). Thus, the possible direction scores for each subscale ranged from -27 to +27, with a positive score indicating a facilitating state and a negative score indicating a debilitating state. Each participant completed the CSAI-2R questionnaire during the pre-test period (Baseline). Subsequently, all participants completed the questionnaire prior to each race before starting their warm-up. The athletes were isolated to avoid disturbances during the questionnaire completion, ensuring reproducible conditions.

Salivary samples

First, salivary samples were collected during the morning of each period (Baseline, Competition-Period and Post-Competition), right after the HRV testing. Samples were collected three days prior to the competition (during a low training load period to establish baseline levels) and during the three days after the competition (Post-Competition period), in order to assess the recovery kinetics. Moreover, Pre-Race and Post-Race sample has been collected during competition period. Pre-Race sample has been collected before warming up, and Post-Race sample has been collected 10 minutes after the end of the exercise. Salivary samples were collected by passive drooling into a plastic Eppendorf tube. Subjects were instructed to not eat, drink, oral rinse or brush their teeth 30 minutes before salivary collection and to stay seated comfortably during the supervised collection time. Once collected, the samples were immediately conserved at -20°C during the testing periods then stored at -80°C until assay. The day of the measurement assay, samples were centrifuged at 14,000 x g, 2min to remove particulate matter, and obtain clear samples. The cortisol and testosterone measurements were assessed by commercial kits using ELISA kit (Salimetrics LLC, State College, PA, USA) while alpha-amylase was determined by another commercial kit (IBL-Tecan, Hamburg, Germany). As precised by manufacturer ,alpha-amylase samples were diluted at 1/301st while for cortisol and testosterone, samples were dosed pure during the measurements. Intra- and inter assay coefficients of variation (CVs) were 4.6-6.0% for cortisol, 5.22-7.5 % for testosterone and 3.7-6.9 % for alpha-amylase respectively. The analytical range of sensitivity for cortisol, testosterone and alpha-amylase are 0.012-3000 µg/dL, 6.1-600 pg/mL, 3.13-200 pg/mL and 0-400 U/mL, respectively. Salivary testosterone values are expressed in picograms per milliliter (pg/ml) but converted micrograms per deciliter (µg/dl) for T/C ratio calculation.

Statistical Analyses

All values are presented as means ± standard deviations. The Shapiro-Wilk test was used to assess the normality of the data distribution. An a priori power analysis indicated that 22 participants per condition were needed to detect significant differences, based on an estimated alpha level of 0.05 and a power of 95%, following performance improvement data from a previous study by (33). A two-way repeated measures ANOVA was used to interpret the results. Post-hoc tests were also applied to compare specific measures between the two competition days. Greenhouse-Geisser correction was applied to the two-way repeated measures ANOVA results. The analysis covered different testing periods (baseline, heats, finals, post-competition). The alpha level was set at $p < 0.05$, and analyses were performed using SPSS 24 (IBM Corp.). Cohen's d effect sizes (mean residual/SD) were calculated for performance parameters to classify the magnitude of estimation error as large (≥ 0.8), moderate (0.5 - 0.8), or small (< 0.5). All statistical analyses and graphical figures were conducted using R software (version 3.6.1; The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria), GraphPad (Prism 9), and JASP (v. 0.16.3). Following the study by Bonafiglia et al., we were also able to estimate, based on various markers, the intra-individual variations in athletes' responses to psychological stress (4). Based on the work of Swinton et al., (41) we considered that the smallest acceptable change in the evolution of the markers was an increase or decrease of 25% compared to the baseline.

Results

Performance

The population studied during the French Elite Championships, which served as the basis for our experiment, included 77% finalists, 13 national medalists, and 100% of the winners in the 400m, 400m hurdles, and 800m events for both men and women. All performances are recorded in Table 1 (Tab.1).

Lactatemia

The set of blood lactate values is represented in the Figure 2 (Fig.2).

For male athletes, the peak blood lactate concentration in the heats of the 400m, 400m hurdles, and 800m was 19.9 ± 3.4 , 19.3 ± 0.0 mmol, and 19.2 ± 0.8 mmol, respectively. For female athletes, the peak performance in the heats of the 400m, 400m hurdles, and 800m was 23.5 ± 1.5 , 16.0 ± 0.0 mmol, and 19.3 ± 1.6 mmol, respectively.

For male athletes, the peak blood lactate concentration in the finals of the 400m, 400m hurdles, and 800m was 23.4 ± 1.9 mmol, 22.3 ± 0.00 mmol, and 20.3 ± 1.1 mmol, respectively. For female athletes, the peak performance in the finals of the 400m, 400m hurdles, and 800m was 24.3 ± 1.3 mmol, 19.4 ± 0.0 mmol, and 22.9 ± 1.6 mmol, respectively.

Heart Rate Variability

All heart rate variability (HRV) results are reported in Table 2 (Tab. 2) and depicted in Figure (Fig.3) as means and standard deviations.

The RMSSD of elite athletes, measured in the morning while lying down, significantly decreased from Baseline or the day of the heats compared to the day of the final ($P < 0.05$; RMSSD Baseline: 110.66 ± 21.30 ms-1; RMSSD Heat: 92.37 ± 35.44 ms-1; RMSSD Final: 77.40 ± 48.14 ms-1). However, RMSSD measured in the morning while lying down significantly increased from the day of the final compared to the post-test ($P < 0.001$; RMSSD Final: 77.40 ± 48.14 ms-1; RMSSD Post-Competition: 105.76 ± 11.47 ms-1) (Fig 3. A).

Conversely, the heart rate (HR) of elite athletes, measured in the morning while lying down, significantly increased from baseline or the day of the heats compared to the day of the final ($P < 0.05$; HR Baseline: 53.63 ± 3.31 bpm; HR Heat: 54.07 ± 8.81 bpm; HR Final: 58.88 ± 11.00 bpm). Morning HR while lying down significantly decreased between the day of the final and the Post-Competition ($P < 0.001$; HR Final: 58.88 ± 11.00 bpm; HR Post-Competition: 53.48 ± 2.22 bpm) (Fig 3 B).

For RMSSD and heart rate (HR) in the standing position, no significant difference was observed between the Baseline, Competition Period, and Post-Competition Period.

CSAI-2R

Only somatic anxiety, specifically the intensity of somatic anxiety, significantly increased between the Baseline and the day of the heats ($P < 0.001$; Somatic Anxiety Intensity Baseline: 10.14 ± 2.23 u.a.; Heats: 12.27 ± 3.28 u.a.) (Fig.4).

Cognitive anxiety and self-confidence did not show significant differences between the Baseline and the day of the heats or the final ($P > 0.05$).

Salivary samples

Salivary sampling data are reported in Table 2 (Tab. 2) and depicted in Figure (Fig. 5).

Salivary alpha-amylase concentrations revealed a significant increase during the Heats and Final when comparing Pre-Race and Post-Race samples ($P < 0.001$; Heat Pre-Race: 182.21 ± 102.49 U/mL vs. Heat Post-Race: 318.28 ± 114.03 U/mL, and Final Pre-Race: 57.96 ± 44.56 U/mL vs. Final Post-Race: 310.71 ± 163.83 U/mL) (Fig. 5A).

Cortisol concentrations increased, but not significantly, between Baseline and Competition-Period ($p = 0.08$) (Fig. 5B). However, salivary cortisol levels were significantly higher in Post-Race measurements compared to Pre-Race measurements during both the Heats and Final (Cortisol Heats Pre-Race: $0.53 \pm 0.31 \mu\text{g/dL}$ vs. Cortisol Heats Post-Race: $1.25 \pm 0.82 \mu\text{g/dL}$; Cortisol Final Pre-Race: $0.43 \pm 0.34 \text{ pg/mL}$ vs. Cortisol Final Post-Race: $1.28 \pm 0.84 \text{ pg/mL}$). The salivary testosterone concentration of elite athletes, measured in the morning upon waking, showed a significant decrease from Baseline compared to the Final and Post-Competition ($P < 0.05$; Baseline: $0.0194 \pm 0.0136 \text{ pg/mL}$; Final: $0.0158 \pm 0.0070 \text{ pg/mL}$; Post-Competition: $0.0178 \pm 0.0134 \text{ pg/mL}$) (Fig. 5C). The Testosterone-Cortisol (T/C) ratio, based on morning measurements, showed a significant decrease from Baseline (0.0618 ± 0.0440) compared to the Heats ($P < 0.01$; 0.0376 ± 0.0312), Final ($P < 0.001$; 0.0387 ± 0.0257), and Post-Competition days ($P < 0.05$; 0.0558 ± 0.0434) (Fig. 5D).

Correlation between stress markers

For the athletes, there was a significant correlation ($P < 0.04$) during the Competition Period between somatic anxiety and HR ($R = -0.38$), RMSSD ($R = 0.47$), salivary cortisol concentration ($R = -0.43$). We also found a significant correlation ($P < 0.03$) during the Through the creation of a correlation matrix, we found a significant correlation during the competition period between somatic anxiety and HR ($r = -0.38$; $P < 0.05$; $n = 22$), between somatic anxiety and RMSSD ($r = 0.47$; $P < 0.05$; $n = 22$), and between somatic anxiety and salivary cortisol concentration ($r = -0.43$; $P < 0.05$; $n = 22$). We also identified a significant correlation ($P < 0.03$) during the competition period between self-confidence scores and salivary testosterone concentration ($r = 0.42$; $P < 0.03$; $n = 22$). Finally, a significant correlation exists between HR and salivary cortisol concentration ($r = 0.41$; $P < 0.01$; $n = 22$). However, no correlation could be established between salivary markers and athletic performance ($P > 0.05$). Finally, a negative correlation between RMSSD and CSAI-2R scores was obtained during the Competition-Period ($r = -0.75$; $p < 0.05$; $n = 7$).

Discussion

The objective of this study was to determine the effects of competition and associated psychophysiological stress in elite and world-class athletes, while accounting for the specificities of individual responses. Using an innovative systemic approach that combines various stress markers, the results of this study demonstrate that psychophysiological stress induced by supra-maximal exercise sequences significantly disrupts homeostasis in World class and elite athletes. Specifically, a significant reduction in parasympathetic activity was observed, as evidenced by a decrease in RMSSD ($p < 0.05$) and an increase in HR ($p < 0.05$) during the competition period compared to the baseline (Fig. 3). Cortisol and alpha-amylase levels increased in response to each exercise, suggesting activation of the sympathetic nervous system and a neuroendocrine response to stress (Fig. 5 A & B). Compared to the baseline, testosterone levels decreased throughout the competition period, accompanied by a reduction in the T/C ratio, indicating hormonal imbalance ($p < 0.05$) (Fig. 5 C & D). Individual response analysis revealed that seven athletes were particularly sensitive to the effects of competitive stress, characterized by a significant negative correlation between RMSSD scores and CSAI-2R ($r = -0.75$; $p < 0.05$; $n = 7$), highlighting a more pronounced stress response in these athletes, particularly during heats (Tab. 3).

Firstly, the elevated blood lactate concentrations measured in our study at +3 minutes and 6 minutes post-race confirm the athletes' performance level, as well as indicate that the relative intensity of this type of exercise was maximal (Fig. 2). Our results are consistent with some previous studies who previously showed that supramaximal exercises, such as 400 m or 800 m races, strongly activate the anaerobic lactic system, leading to significant metabolic disturbances (28,24) and substantial homeostatic disruptions. Despite the distinction between 400m, 400m hurdles, and 800m races, high blood lactate concentrations characterize these three disciplines as supra-maximal exercises. This allows us to subsequently study the effects of a sequence of supra-maximal exercises in competition on various psychophysiological stress markers.

In addition to significant metabolic disturbances our results revealed a significant disruption of ANS activity in the morning during Competition-Period, characterized by a decrease in parasympathetic activity, as measured by HRV, and an increase in HR (Fig. 3). In line with the work of Buchheit et al. (7) on repeated sprints in moderately trained athletes (9), the 16% reduction in RMSSD observed on the morning of the heats and 30% on the morning of the finals compared to baseline indicates a decrease in parasympathetic activity and a greater activation of the sympathetic system. Therefore, our results confirm that competition-induced stress, particularly during supra-maximal exercises, negatively impacts the balance of the ANS by increasing sympathetic activity while reducing parasympathetic activity. However, in agreement with the work of Plews et al. (35), our results highlight that RMSSD and HR measured during morning orthostatic tests returned to near-normal values immediately after the competition period, indicating a rapid and effective recovery of the ANS. Therefore, our results confirm that competition-induced stress, particularly during a sequence of supra-maximal exercises, negatively impacts the balance of the ANS. The stress induces an increase in sympathetic activity while reducing parasympathetic activity, but it seems to be better regulated by elite athletes compared to lower-level athletes (Tab. 3). This demonstrates a greater capacity for recovery after intense efforts and better resilience to competition stress (13). Managing this stress, whether physiological or psychological, should therefore be given greater consideration in the preparation and recovery strategies of high-level athletes. Indeed, competition, by its anxious nature, thus disrupts the body's homeostatic processes controlled by the ANS.

In addition to HRV, stress was assessed using subjective questionnaires on anxiety levels (psychological stress), providing valuable insights into the interactions between stress and changes in ANS activity. The CSAI-2R questionnaire results revealed a significant increase in somatic anxiety before the qualification events, confirming that anxiety plays a central role in modulating athletes' psychophysiological responses (Fig. 4). Consistent with the work of Martens et al., 1990, our results confirm that state anxiety triggered by competitive events directly affects autonomic responses, notably by amplifying sympathetic nervous system activation and reducing RMSSD (30). Furthermore, in line with Hanton et al. (2004), the CSAI-2R scores revealed higher levels of anxiety during the competition period, specifically prior to the heats (qualifying phase) (25). The pressure related to expected performance and selection for the final may exacerbate this anxiety, leading to increased HR and parasympathetic inhibition, further reinforcing the disruptions already observed in the ANS. Finally, as indicated by the correlations obtained between various stress markers during the competition, our results confirm that anxiety linked to psychological stress can disrupt homeostasis, supporting the idea that the ANS is sensitive to psychophysiological stress, even in elite athletes.

To our knowledge, this is the first study to characterize the effects of psychophysiological stress during competition in elite athletes using a complementary systemic approach. Thus, using the CSAI-2R questionnaire and monitoring the ANS through HRV, our study also focused on salivary concentrations of alpha-amylase, cortisol, and testosterone, which reflect the activity of the HPA axis. The significant increase in salivary alpha-amylase observed in Post-Race during the heats and finals (Fig. 5A) confirms that the activity of ANS is disrupted in response to supra-maximal efforts, specifically with a withdrawal of parasympathetic activity in favor of sympathetic nervous system activation as demonstrated by Nater and Rohleder (32). Although the relationship between alpha-amylase and cortisol responses to psychophysiological stress remains poorly understood (18), it appears that combining these two markers can provide a more comprehensive view of chronic stress responses, in line with the proposals of Ali and Pruessner (2). Regarding to the salivary cortisol the non-significant (Tab. 2 ; $p = 0,08$; Cohen's $d = -0.43$) (Fig. 5B) but observable elevation in our study reflects HPA axis activation, particularly in competitive stress situations, as suggested by Chennaoui et al. (2016) and Aubets et al. (1995) in elite swimmers (9;3). The increase in salivary cortisol can be explained by the fact that competition, as an anxiety-inducing situation, stimulates the adrenal glands, which are involved in cortisol production (6). The lack of statistical significance ($p = 0.08$) can be explained, in part, by the high inter-individual variability (coefficient of variation $> 25\%$) in salivary cortisol concentrations within the studied population. This high heterogeneity may be attributed to the different profiles of athletes as has been reported in other studies (16).

Conclusively, our results regarding salivary alpha-amylase and cortisol concentrations suggest that, in addition to being sensitive to psychophysiological stress, salivary cortisol concentration may also be influenced by exercise-induced stress. Indeed, the increase in alpha-amylase concentration, indicative of heightened sympathetic activity, triggers the release of catecholamines, which in turn stimulate the pituitary gland to secrete ACTH (adrenocorticotrophic hormone). ACTH then acts on the adrenal glands to release cortisol. Thus, monitoring salivary cortisol alongside alpha-amylase may provide a complementary approach to characterizing the nature of stress.

Our results showed also a progressive decrease in salivary testosterone levels from Baseline through the heats and finals, confirming the impact of competitive stress on the HPA axis (Fig 5C). This drop in testosterone levels, combined with the reduction in the T/C ratio (Fig 5D), indicates an endocrine disturbance marked by an imbalance between anabolic and catabolic hormones (14). This phenomenon, well-documented in the literature, shows that competition,

due to stress and intense efforts, can lead to a decrease in testosterone concentrations (17) as observed in rugby players during competitive matches. Moreover, the decrease in testosterone levels and the progressive reduction in the T/C ratio support the idea of a homeostatic stress induced by the repeated supra-maximal exercises, consistent with findings from previous studies (39, 48). The reduction of anabolic hormones, such as testosterone, may have detrimental effects on recovery and performance, particularly if athletes do not adequately mitigate these disruptions with appropriate recovery strategies, given its role in muscle repair and metabolic recovery following intense exercise (48). Thus, our study is the first to demonstrate that a sequence of supramaximal exercises induces a reduction in salivary testosterone concentration in elite athletes during competition.

Finally, our results confirm that repeated supra-maximal exercises disrupt not only the ANS but also the HPA axis, emphasizing the importance of managing psychophysiological stress to optimize performance and recovery in athletes (33).

Another major objective of our study was to determine the individual responses of athletes to competition-induced stress. A particularly interesting and novel finding from our research lies in the identification of a specific athlete profile that is more sensitive to the effects of psychophysiological stress (Tab. 3). Specifically, through a more in-depth analysis of individual results (41), we found that one-third of the athletes ($n = 7$) could be considered more sensitive to competition-induced stress. To identify this profile, we developed a new indicator based on the difference in RMSSD and CSAI-2R scores obtained during Baseline and the heats. Using these two indices, and by isolating these seven athletes, we identified a significant negative correlation of -0.75, highlighting a marked increase in stress effects, particularly on the first day of competition (heats). The significant reduction in RMSSD coupled with a significant increase in CSAI-2R scores (especially somatic anxiety) could reflect a pronounced psychophysiological stress response on the first day of competition. Compared to other athletes in the study ($n = 15$), this profile appears particularly sensitive to stress even before the competition begins. Moreover, considering the most sensitive markers of psychophysiological stress, and referring to a variation of more than 25% in these stress markers compared to baseline, 50% of the athletes were particularly stressed on the day of the qualifying events, regardless of their final performance. (Tab. 3) (4).

Although salivary biomarkers are commonly used to study the effects of psychophysiological stress during competition (12), our results highlight that this type of salivary biomarker must be combined with other stress markers due to the heterogeneity of individual responses to this type of stress in elite athletes. Finally, monitoring changes in ANS activity via HRV appears to be a simple yet reliable marker for assessing the effects of competition-related stress. Indeed, the evolution of RMSSD, which decreases during the competition compared to baseline and returns to its baseline values post-competition (or inversely proportional to heart rate), suggests that these markers are particularly sensitive to psychophysiological stress. Thus, monitoring ANS through HRV, combined with subjective questionnaires, proves to be a relevant approach for tracking stress in elite athletes (11).

Although the baseline measurements were taken during the period preceding the competition, these reference data were collected under the same conditions for all athletes, which helps to avoid variations related to factors such as training load. While recruiting this type of population (World Class and elite athletes) poses a challenge for such studies, future research should aim for more balanced subject groups and consider measuring baseline stress levels during neutral periods, far from competitive environments.

This study is the first to examine the effects of stress induced by a sequence of supramaximal exercises during competition in World Class and Elite athletes. It is also the first to adopt a

multifactorial approach, combining various complementary markers to better characterize the effects of stress on the autonomic nervous system (ANS) and the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis, while accounting for inter-individual variations. Our results highlight a significant reduction in parasympathetic activity, an activation of the sympathetic branch, and hormonal imbalances. Finally, certain athletes appear more sensitive to the effects of competition-induced stress, particularly during the qualifying rounds. Consequently, optimal stress management, especially through recovery strategies targeting the regulation of the ANS and the HPA axis, could enhance both performance and recovery.

Practical Applications

In addition to the results presented above, only 30% of the athletes were more sensitive to stress on the day of the finals. This finding may seem surprising, as one might expect an increase in stress effects due to the stakes of the final. Beyond intra-individual differences and regardless of final performance, the significant number of athletes experiencing stress during the qualifying rounds can be explained by the fear of underperforming and not advancing to the final. Although the heats are supposed to be a formality for athletes of this level, our explanation becomes clear when considering the consequences of underperformance. Indeed, even though their skill level should guarantee them a spot in the final, these elite athletes experience anxiety during the heats because poor performance could have significant repercussions for the rest of their season (sponsorship contracts, national team selection, competition with rivals).

Thus, more than metabolic stress, we believe that pre-competition anxiety combined with the repetition of supra-maximal exercises disrupts homeostasis. The psychophysiological stress induced by competition affects the body's major functions, which negatively impacts recovery processes, particularly by altering sleep quality and quantity (9). Sleep is recognized as a crucial element in the preparation and recovery of elite athletes (38). Therefore, improving recovery by optimizing sleep quality and quantity would thus enhance the athletes' ability to maintain high-level performance. Breathing and relaxation techniques aimed at regulating stress by modulating ANS activity and the HPA axis should therefore be considered for these athletes to improve sleep and the associated recovery processes.

References

1. Adlercreutz H, HaÈrkoÈnen M, Kuoppasalmi K, Kosunen K, Näveri H, Rehunen S. Physical activity and hormones. *Adv Cardiol.* 1976;18:144-57.
2. Ali N, Pruessner JC. The salivary alpha amylase over cortisol ratio as a marker to assess dysregulations of the stress systems. *Physiol Behav.* 2012;106(1):65-72.
3. Aubets J, Segura J. Salivary cortisol as a marker of competition related stress. *Sci Sports.* 1995;10(3):149-54.
4. Bonafiglia JT, Rotundo MP, Whittall JP, Scribbans TD, Graham RB, Gurd BJ. Inter-Individual Variability in the Adaptive Responses to Endurance and Sprint Interval Training: A Randomized Crossover Study. *Calbet JAL, éditeur. PLOS ONE.* 9 déc 2016;11(12):e0167790.
5. Bourdillon N, Schmitt L, Yazdani S, Vesin JM, Millet GP. Minimal window duration for accurate HRV recording in athletes. *Front Neurosci.* 2017;11:456.
6. Brooks DM, Kelly A, Sorkin JD, Koren D, Chng SY, Gallagher PR, et al. The relationship between sleep-disordered breathing, blood pressure, and urinary cortisol and catecholamines in children. *J Clin Sleep Med.* 2020;16(6):907-16.
7. Buchheit M, Papelier Y, Laursen PB, Ahmaidi S. Noninvasive assessment of cardiac parasympathetic function: postexercise heart rate recovery or heart rate variability? *Am J Physiol-Heart Circ Physiol.* 2007;293(1):H8-10.
8. Carvalho Leme L, Flávio Milanez V, Santos Oliveira R, de Paula Ramos S, Leicht A, Yuzo Nakamura F. The influence of a weekend with passive rest on the psychological and autonomic recovery in professional male handball players. *Kinesiology.* 2015;47(1.):108-14.
9. Chennaoui M, Bougard C, Drogou C, Langrume C, Miller C, Gomez-Merino D, et al. Stress biomarkers, mood states, and sleep during a major competition: “Success” and “failure” athlete’s profile of high-level swimmers. *Front Physiol.* 2016;7:94.
10. Chennaoui M, Gomez-Merino D, Drogou C, Bourrilhon C, Sautivet S, Guezennec CY. Hormonal and metabolic adaptation in professional cyclists during training. *Can J Appl Physiol.* 2004;29(6):714-30.
11. Chiron F, Bennett S, Thomas C, Hanon C, Léger D, Lopes P. Application of Vagal-Mediated Heart Rate Variability and Subjective Markers to Optimise Training Prescription: An Olympic Athlete Case Report. *Int J Disabil Sports Health Sci.* 7(1):66-76.
12. Claudino JG, Cronin J, Mezêncio B, McMaster DT, McGuigan M, Tricoli V, et al. The countermovement jump to monitor neuromuscular status: A meta-analysis. *J Sci Med Sport.* 2017;20(4):397-402.
13. Córdova A, Sureda A, Tur J, Pons A. Immune response to exercise in elite sportsmen during the competitive season. *J Physiol Biochem.* 2010;66:1-6.
14. Curzi D, Amatori S, Silvestri F, Marcelli L, Campanella M, Perroni F, et al. Professional football training and recovery: A longitudinal study on the effects of weekly conditioning session and workload variables. *Plos One.* 2024;19(9):e0310036.
15. De Pero R, Minganti C, Cibelli G, Cortis C, Piacentini MF. The Stress of Competing: Cortisol and Amylase Response to Training and Competition. *J Funct Morphol Kinesiol.* 4 janv 2021;6(1):5.
16. Duclos M, Tabarin A. Exercise and the hypothalamo-pituitary-adrenal axis. *Sports Endocrinol.* 2016;47:12-26.
17. Elloumi M, Maso F, Michaux O, Robert A, Lac G. Behaviour of saliva cortisol [C], testosterone [T] and the T/C ratio during a rugby match and during the post-competition recovery days. *Eur J Appl Physiol.* 2003;90(1):23-8.
18. Engert V, Vogel S, Efanov SI, Duchesne A, Corbo V, Ali N, et al. Investigation into the cross-correlation of salivary cortisol and alpha-amylase responses to psychological stress. *Psychoneuroendocrinology.* 2011;36(9):1294-302.

19. Esquivel AG, Torres B, Corrales MM, Salazar MG, Orellana JN. Heart rate variability after three badminton matches. Are there gender differences? *Arch Med Deporte*. 2011;28(144):257-64.
20. Filaire E, Sagnol M, Ferrand C, Maso F, Lac G. Psychophysiological stress in judo athletes during competitions. *J Sports Med Phys Fitness*. 2001;41(2):263-8.
21. Gatti R, De Palo E. An update: salivary hormones and physical exercise. *Scand J Med Sci Sports*. 2011;21(2):157-69.
22. Geniole SN, Bird BM, Ruddick EL, Carré JM. Effects of competition outcome on testosterone concentrations in humans: An updated meta-analysis. *Horm Behav*. 2017;92:37-50.
23. Guilhem G, Hanon C, Gendreau N, Bonneau D, Guével A, Chennaoui M. Salivary hormones response to preparation and pre-competitive training of world-class level athletes. *Front Physiol*. 2015;6:333.
24. Hanon C, Lepretre PM, Bishop D, Thomas C. Oxygen uptake and blood metabolic responses to a 400-m run. *Eur J Appl Physiol*. 2010;109(2):233-40.
25. Hanton S, Mellalieu SD, Hall R. Self-confidence and anxiety interpretation: A qualitative investigation. *Psychol Sport Exerc*. 2004;5(4):477-95.
26. Hashim H, Baghepour T. Validating the factorial structure of the Malaysian version of revised competitive state anxiety inventory-2 among young taekwondo athletes. 2016;
27. Hellebrandt FA, Houtz SJ, Partridge MJ, Walters CE. Tonic neck reflexes in exercises of stress in man. *Am J Phys Med Rehabil*. 1956;35(3):144-59.
28. Lacour J, Bouvat E, Barthelemy J. Post-competition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races. *Eur J Appl Physiol*. 1990;61(3):172-6.
29. Lehrer P, Kaur K, Sharma A, Shah K, Huseby R, Bhavsar J, et al. Heart rate variability biofeedback improves emotional and physical health and performance: A systematic review and meta analysis. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 2020;45:109-29.
30. Martens R. Competitive anxiety in sport. *Hum Kinet*. 1990;
31. McKay J, Selig SE, Carlson J, Morris T. Psychophysiological stress in elite golfers during practice and competition. *Aust J Sci Med Sport*. 1997;29(2):55-61.
32. Nater UM, Rohleder N. Salivary alpha-amylase as a non-invasive biomarker for the sympathetic nervous system: current state of research. *Psychoneuroendocrinology*. 2009;34(4):486-96.
33. Neves RS, da Silva MAR, de Rezende MA, Caldo-Silva A, Pinheiro J, Santos AM. Salivary Markers Responses in the Post-Exercise and Recovery Period: A Systematic Review. *Sports*. 2023;11(7):137.
34. Passelergue P, Lac G. Saliva cortisol, testosterone and T/C ratio variations during a wrestling competition and during the post-competitive recovery period. *Int J Sports Med*. 1999;20(02):109-13.
35. 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.
36. Podstawski R, Boraczyński M, Nowosielska-Swadźba D, Zwolińska D. Heart rate variability during pre-competition and competition periods in volleyball players. *Biomed Hum Kinet*. 2014;6(1).
37. Robergs R, Hutchinson K, Hendee S, Madden S, Siegler J. Influence of pre-exercise acidosis and alkalosis on the kinetics of acid-base recovery following intense exercise. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2005;15(1):59-74.
38. Robson-Ansley PJ, Gleeson M, Ansley L. Fatigue management in the preparation of Olympic athletes. *J Sports Sci*. 2009;27(13):1409-20.

39. Rosmond R, Björntorp P. Alterations in the hypothalamic-pituitary-adrenal axis in metabolic syndrome. *The Endocrinologist*. 2001;11(6):491-7.
40. Singh A, Petrides JS, Gold PW, Chrousos GP, Deuster PA. Differential hypothalamic-pituitary-adrenal axis reactivity to psychological and physical stress. *J Clin Endocrinol Metab*. 1999;84(6):1944-8.
41. Swinton PA, Hemingway BS, Saunders B, Gualano B, Dolan E. A statistical framework to interpret individual response to intervention: paving the way for personalized nutrition and exercise prescription. *Front Nutr*. 2018;5:41.
42. Takai N, Yamaguchi M, Aragaki T, Eto K, Uchihashi K, Nishikawa Y. Effect of psychological stress on the salivary cortisol and amylase levels in healthy young adults. *Arch Oral Biol*. 2004;49(12):963-8.
43. Thatcher J, Thatcher R, Dorling D. Gender differences in the pre-competition temporal patterning of anxiety and hormonal responses. *J Sports Med Phys Fitness*. 2004;44(3):300.
44. Thomas C, Hanon C, Le Chevalier JM, Couturier A, Vandewalle H. Assessment and distribution of aerobic and anaerobic contribution during 800m race in the competition. *Sci Sports*. 2003;18(1):32-3.
45. Tsigos C, Chrousos GP. Hypothalamic-pituitary-adrenal axis, neuroendocrine factors and stress. *J Psychosom Res*. 2002;53(4):865-71.
46. Vingren JL, Kraemer WJ, Ratamess NA, Anderson JM, Volek JS, Maresh CM. Testosterone physiology in resistance exercise and training: the up-stream regulatory elements. *Sports Med*. 2010;40:1037-53.
47. Walsh NP, Halson SL, Sargent C, Roach GD, Nédélec M, Gupta L, et al. Sleep and the athlete: narrative review and 2021 expert consensus recommendations. *Br J Sports Med*. 2021;55(7):356-68.
48. Zare R, Devrim-Lanpir A, Guazzotti S, Ali Redha A, Prokopidis K, Spadaccini D, et al. Effect of soy protein supplementation on muscle adaptations, metabolic and antioxidant status, hormonal response, and exercise performance of active individuals and athletes: A systematic review of randomised controlled trials. *Sports Med*. 2023;53(12):2417-46.
49. Zilioli S, Watson NV. The hidden dimensions of the competition effect: Basal cortisol and basal testosterone jointly predict changes in salivary testosterone after social victory in men. *Psychoneuroendocrinology*. 2012;37(11):1855-65.

Tables & Figures

Mean $\pm$ SD		
$n = 4$	Heat 400m	52.95 $\pm$ 0.62
	FInal 400m	53.03 $\pm$ 0.93
$n = 4$	Heat 400m	46.42 $\pm$ 1.13
	FInal 400m	45.81 $\pm$ 0.21
$n = 1$	Heat 400m H	58.27 $\pm$ 0.00
	FInal 400m H	55.85 $\pm$ 0.00
$n = 1$	Heat 400m H	51.57 $\pm$ 0.00
	FInal 400m H	48.57 $\pm$ 0.00
$n = 5$	Heat 800m	124.15 $\pm$ 1.25
	FInal 800m	122.54 $\pm$ 0.54
$n = 7$	Heat 800m	108.62 $\pm$ 0.75
	FInal 800m	108.65 $\pm$ 0.47

Table 1: Summary table of Elite performances in the 400 m, 400 m hurdles, and 800 m during the heats and finals

ELITE							
		Baseline (D-3 to D-1)	Heats (D1)	Final (D2)	Post-Competition (D3 to D5)	P value (Baseline vs competition)	Cohen's d
		Means $\pm$ SD	Means $\pm$ SD	Means $\pm$ SD	Means $\pm$ SD		
HRV (ms-1 - bpm)	RMSSD	110.66 $\pm$ 21.30	92.37 $\pm$ 35.44	77.40 $\pm$ 48.14	105.76 $\pm$ 11.47	0,01	0,41
	HR	53,63 $\pm$ 3,31	54.07 $\pm$ 8.81	58.88 $\pm$ 11.00	53.48 $\pm$ 2.22	0,03	-0,09
Alpha-amylase (U/mL)	Morning	53.71 $\pm$ 45.98	57.37 $\pm$ 36.96	57.96 $\pm$ 44.56	56.50 $\pm$ 39.88		
	Pre-race	-	182.21 $\pm$ 102.49	139.73 $\pm$ 91.25	-	0,01	-0,09
	Post-race	-	318.28 $\pm$ 114.03	310.71 $\pm$ 163.83	-		
Cortisol (μ g/d)	Morning	0.39 $\pm$ 0.29	0.53 $\pm$ 0.31	0.48 $\pm$ 0.23	0.35 $\pm$ 0.21		
	Pre	-	0.53 $\pm$ 0.31	0.43 $\pm$ 0.34	-	0,08	-0,43
	Post	-	1.25 $\pm$ 0.82	1.28 $\pm$ 0.84	-		
Testosterone (μ g/dL)	Morning	0.0194 $\pm$ 0.0136	0.0165 $\pm$ 0.0078	0.0158 $\pm$ 0.0070	0.0178 $\pm$ 0.0134		
	Pre-race	-	0.0165 $\pm$ 0.0057	0.0157 $\pm$ 0.0110	-	0,18	0,44
	Post-race	-	0.0274 $\pm$ 0.0152	0.0296 $\pm$ 0.0169	-		
Ratio T/C	Morning	0.0618 $\pm$ 0.0440	0.0376 $\pm$ 0.0312	0.0387 $\pm$ 0.0257	0.0558 $\pm$ 0.0434		
	Pre-race	-	0.041 $\pm$ 0.0335	0.0422 $\pm$ 0.0248	-	0,00	0,65
	Post-race	-	0.0299 $\pm$ 0.0257	0.0314 $\pm$ 0.257	-		
IL1-Beta (pg/mL)	Morning	1137.71 $\pm$ 956.23	1132.92 $\pm$ 965.59	1181.16 $\pm$ 858.83	1262.81 $\pm$ 801.84		
	Pre-race	-	337.14 $\pm$ 271.86	220.25 $\pm$ 162.39	-	0,08	-0,02
	Post-race	-	493.47 $\pm$ 542.93	367.84 $\pm$ 406.21	-		
CSAI-2R (a.u)	Somatic anxiety	9.82 $\pm$ 10.75	11.08 $\pm$ 11.70	9.82 $\pm$ 11.31	-	0,68	-0,04
	Cognitive anxiety	8.32 $\pm$ 10.82	8.98 $\pm$ 11.65	8.71 $\pm$ 11.71	-	0,76	-0,07
	Self-confidence	14.77 $\pm$ 9.05	14.29 $\pm$ 8.96	14.49 $\pm$ 8.92	-	0,77	0,07

Table 2: Summary table of Elites during Baseline, competition period, and post-test period

Table 3: Table of individual responses of the 22 elite athletes to psychophysiological stress following a series of supramaximal exercises (heats and final) during a French Elite Championship.

A decrease (white cells) or an increase (black cells) indicated a change greater than 25% in the various stress markers compared to the baseline. A gray cell indicated stabilization of the marker (change < 25%). A hatched cell indicates that data were not available for a given variable.

n° subject	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18		19		20		21		22		
	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	Heat	Final	
RMSSD																																													
HR																																													
Alpha-amylase																																													
Cortisol																																													
Testosterone																																													
IL1-Beta																																													
Somatic anxiety																																													
Cognitive anxiety																																													
Self-confidence																																													
Speciality	400m W	400m W	400m W	800m W	800m W	400H M	800m M	800m M	800m M	800m M	800m M	800m W	400m M	800m M	800m M	800m M	400m W	800m M	800m W	800m W	400H W	400m M	400m M	400m M																					
Final Ranking	4	6	1	8	5	1	2	1	5	8	1	1	8	7	3	3	2	3	1	2	8	3																							

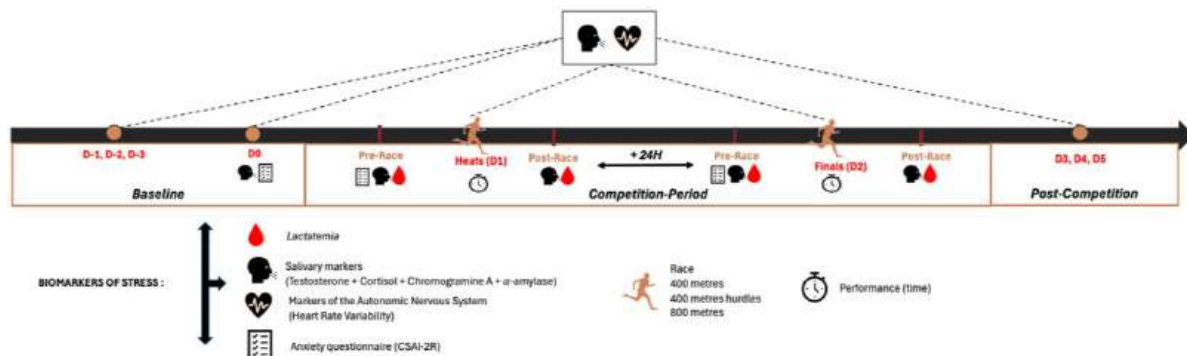


Figure 1: Experimental design of the protocol during the French Elite Championships
ANS markers and salivary biomarkers, were collected throughout the protocol. Blood lactate levels and salivary biomarkers were measured before and after each race during the Competition-Period. The CSAI-2R was realized during the Baseline as well as before during each race of the Competition-Period..

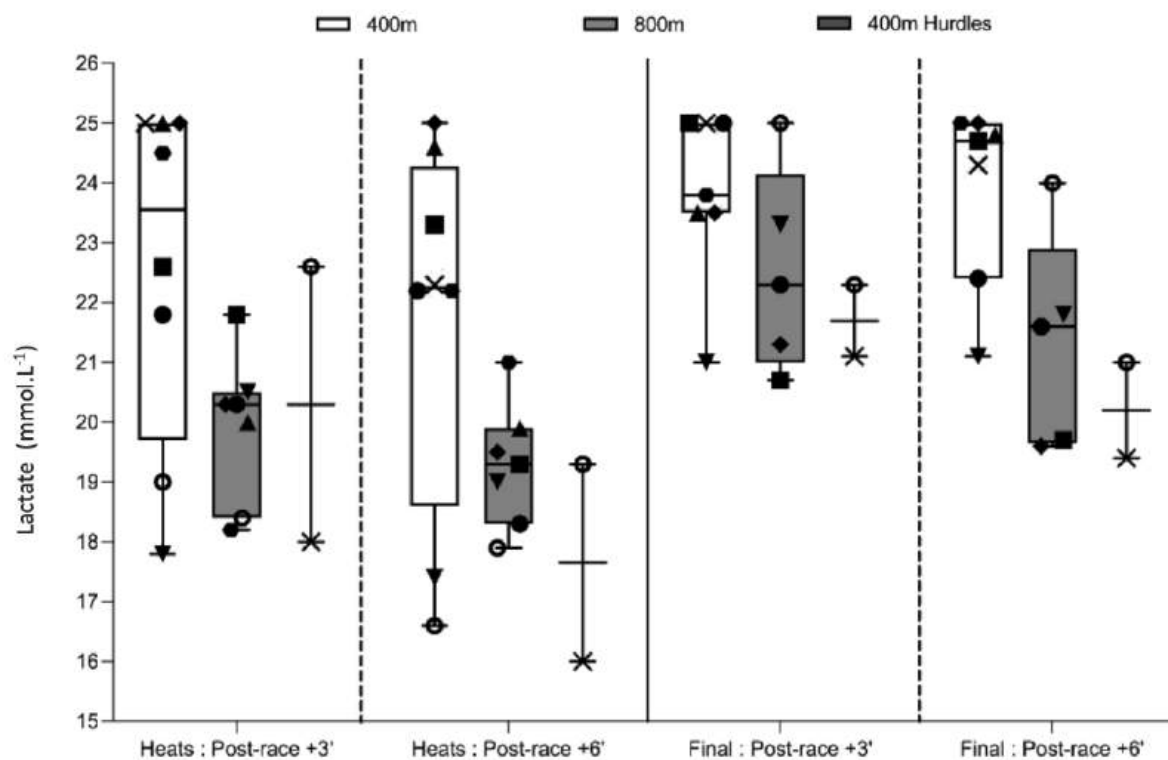


Figure 2: Measurement of blood lactate concentration at 3 minutes and 6 minutes post-exercise for elite athletes in heats and finals

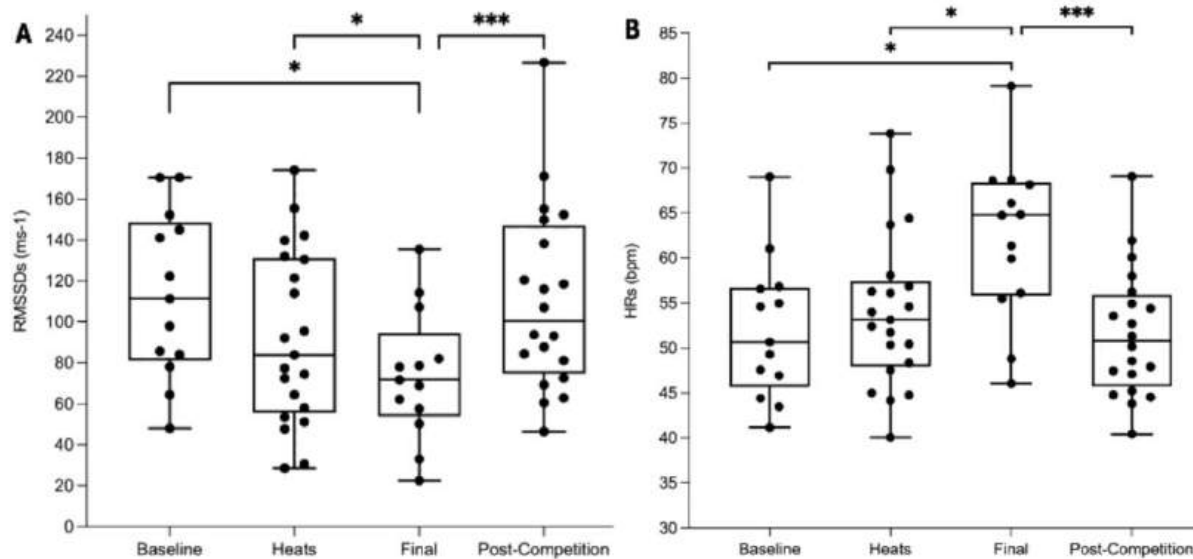


Figure 3 : Evolution of the root mean square of successive differences (RMSSD) in the supine position (A) and heart rate (B) measured during an orthostatic test conducted in the morning with elite athletes throughout the baseline, heats, finals, and post-test period. * P < 0.05 and *** P < 0.001.

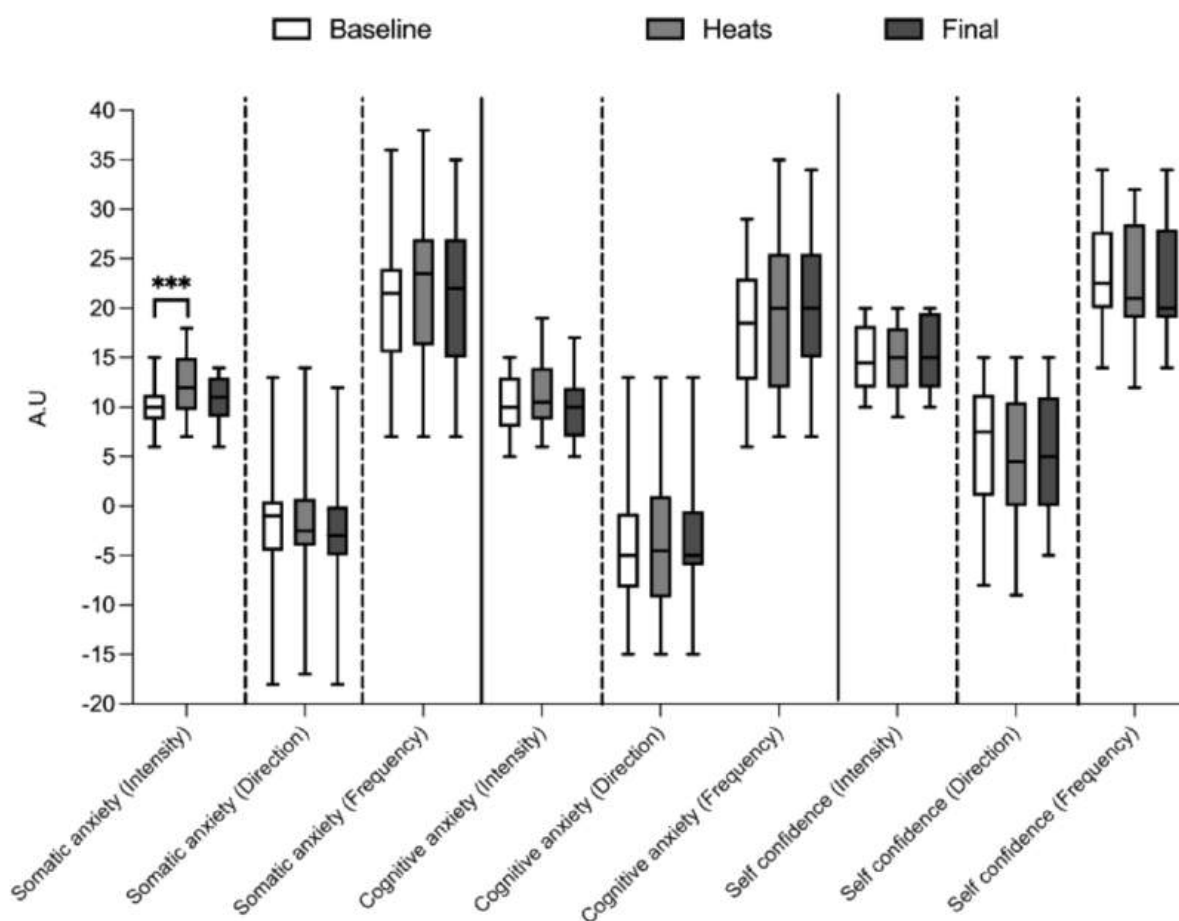


Figure 4: Evolution of the pre-competition anxiety score (CSAI-2R) obtained before the competition (Baseline) and during the competition before each race (heats and finals). *** P < 0.001.

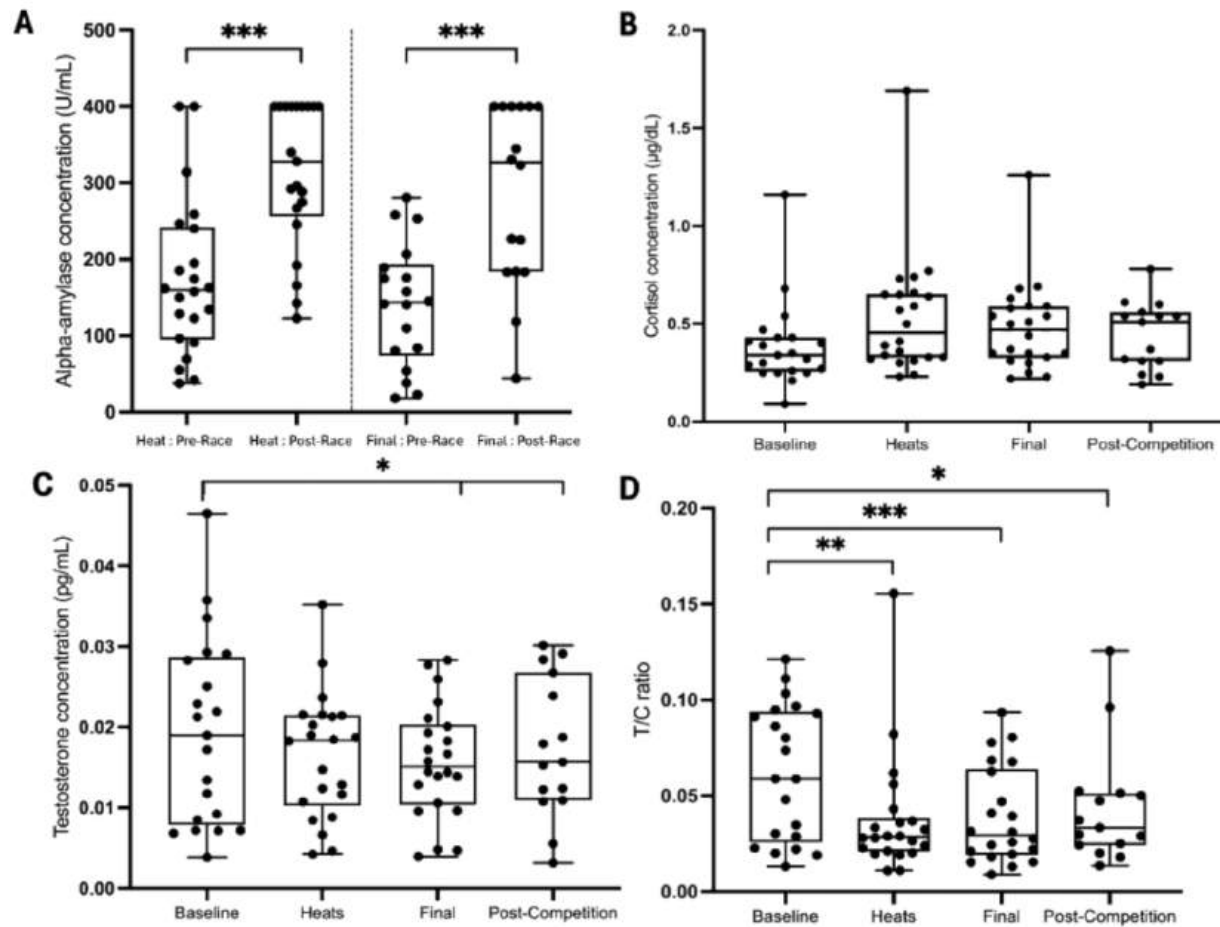


Figure 5: Evolution of the dynamic changes in key salivary biomarkers related to stress, recovery, and hormonal balance across the competition protocol.

Fig A: Evolution of alpha-amylase levels collected before and after the heats and finals.

Fig B: Evolution of the cortisol collected in the morning upon waking throughout the entire protocol.

Fig C: Evolution of the testosterone collected in the morning upon waking throughout the entire protocol.

Fig D: Evolution of the testosterone-cortisol ratio collected in the morning upon waking throughout the entire protocol.

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ and *** $P < 0.001$

ÉTUDE 3 - COURIR SOUS PRESSION PARTIE II: COMMENT RÉGULER LE STRESS PSYCHOPHYSIOLOGIQUE CHEZ TRÈS ENTRAÎNÉS?

Publication associée (companion paper en cours de révision) : **Chiron, F.**, Gulören, B., Erblang, M., Poirier, C., Elbaz, M., Servonnet, A., Gaudin, M., Le Coz, C., Lopes, L., Chennaoui, M., Hanon., Léger, & Thomas, C. (2025). Racing Under Pressure Part II: How To Regulate Psychophysiological Stress In Highly Trained Athletes?. *Journal of Strength and Conditioning Research* (under review).

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE 3 :

Les athlètes de haut-niveau sont confrontés à un défi majeur : gérer un environnement compétitif souvent anxiogène. Ce stress psychophysiologique induit par la compétition implique de ce fait des changements comportementaux, psychologiques et physiologiques. Ces perturbations de l'homéostasie entraînent notamment des perturbations du système nerveux autonome et du système neuro-endocrinien pouvant par conséquent altérer la récupération et notamment le sommeil des athlètes. Réguler ce stress psychophysiologique représente donc un enjeu crucial dans l'objectif de pouvoir maintenir un niveau de performance maximal. Dans ce contexte, des stratégies de relaxation, comme la cohérence cardiaque, pourraient optimiser le sommeil et la récupération. Cette méthode accessible, en stimulant des processus physiologiques tels que la modulation parasympathique, semble améliorer la qualité du sommeil et réguler les fonctions neuroendocrines et immunitaires, tout en réduisant l'anxiété. L'objectif de cette étude était donc d'évaluer les effets de la cohérence cardiaque sur le SNA, SNE, et la réponse inflammatoire chez des athlètes très entraînés soumis à la répétition d'exercices à haute-intensité. De plus, cette étude visait démontrer les bienfaits de ce type de stratégie de relaxation sur le sommeil afin d'améliorer la récupération des athlètes.

Ce travail a été réalisé sur 22 athlètes élités (7 femmes, 15 hommes), répartis aléatoirement en deux groupes : un groupe contrôle (CONT, $n = 11$) et un groupe qui a pratiqué la cohérence cardiaque (RELAX, $n = 11$). Le protocole expérimental incluait trois courses de 400 m réalisées sur trois jours consécutifs, simulant une compétition internationale. Les mesures comprenaient les indices temporels de la variabilité de la fréquence cardiaque (RMSSD) lors de tests orthostatiques réalisés le matin, les biomarqueurs salivaires (cortisol, testostérone, alpha-amylase, IL1- β) prélevés au réveil, avant et après chaque course, des scores associés à l'état d'anxiété précompétitif (CSAI-2R) avant chaque course, ainsi que des paramètres du sommeil (durée totale et latence).

Les résultats de cette étude ont mis en évidence au sein du groupe CONT une diminution significative du RMSSD en position couchée entre les jours J4 et J5 alors qu'aucune différence n'a été observée pour le groupe RELAX (J4 : $90,29 \pm 21,26$ ms vs. J5 : $79,58 \pm 20,46$ ms. ; $p < 0,01$) qui a effectué la cohérence cardiaque tout au long de la compétition simulée. Le cortisol salivaire a significativement augmenté dans les deux groupes ($p < 0,001$) entre les valeurs pré-course et post-course au cours des trois jours de course (J4, J5, J6), mais a significativement diminué en post-course dans le groupe CONT entre le J4 et le J6 (post-course J4 : $0,796 \pm 0,385$ $\mu\text{g/dL}$. ; post-course J6 : $0,494 \pm 0,247$ $\mu\text{g/dL}$; $p < 0,01$). Les concentrations en l'IL1- β du groupe CONT ont significativement augmenté significative entre la période pré-test et post-test

J5 alors qu'aucune différence n'a été observé pour le groupe RELAX (pré-test J5 : $835,55 \pm 646,20$ pg/mL ; Post-test J5 : $1309,80 \pm 837,50$ pg/mL ; $p < 0,05$). Par ailleurs, la durée du sommeil du groupe RELAX a significativement augmenté entre la période de pré-test et le jour J4 alors qu'aucune différence n'a été observé pour le groupe CONT (pré-test : $24\,555 \pm 4\,697$ s ; D4 : $27\,960 \pm 3\,684$ s ; $p < 0,05$). Cependant, aucune différence significative n'a été observé sur les performances au 400 mètres.

En conclusion, cette étude met en évidence l'impact systémique des exercices supra-maximaux sur le SNA, le SNE, et les mécanismes inflammatoires. La pratique de la respiration cohérence a permis de stabiliser ces systèmes et d'améliorer les paramètres de sommeil, essentiels pour la récupération des athlètes. Ces résultats suggèrent que des stratégies de relaxation simples à mettre en place telle que la cohérence cardiaque proposées aux athlètes afin de réguler les effets délétères du stress psychophysiologique. Grâce à cette approche holistique, cette étude apporte un éclairage nouveau sur les bénéfices de stratégies simples et accessibles dans la perspective de réguler le stress psychophysiologique des athlètes de haut-niveau en compétition.

RACING UNDER PRESSURE PART II: HOW TO REGULATE PSYCHOPHYSIOLOGICAL STRESS IN HIGHLY TRAINED ATHLETES?

François Chiron ^{1,2}, Bora Gulören ¹, Mégane Erblang ¹, Canelle Poirier ², Maxime Elbaz ³,
Aurelie Servonnet ⁴, Mariette Gaudin ⁴, Christine Le Coz ⁴, Philippe Lopes ¹, Mounir
Chennaoui ^{3,4}, Christine Hanon ², Damien Léger ³ and Claire Thomas ¹

¹ *Exercise Biology for Performance and Health Laboratory (LBEPS), Univ Evry, IRBA, University Paris
Saclay, 91025 Evry,*

² *French Athletics Federation (FFA), 33 Avenue Pierre de Coubertin, 75640 Paris CEDEX, France*

³ *Université Paris Cité, VIFASOM (Vigilance, Fatigue, Sleep and Public Health), Hôtel-Dieu, Paris,
France*

⁴ *French Armed Forces Biomedical Research Institute (IRBA), Fatigue and Vigilance Unit, Bretigny-
sur-Orge, France*

Abstract

Managing psychophysiological stress is crucial for elite athletes, particularly during intense competitions. This study explored the effects of coherent breathing on the autonomic nervous system (ANS), hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis regulation, inflammatory response and sleep parameters in highly trained athletes undergoing repeated supra-maximal efforts. Twenty-two athletes (N = 22) were randomly assigned to a control group (CONT, n = 11) or a coherent breathing group (RELAX, n = 11). Over an 8-day protocol, athletes completed three 400m races simulating a competitive sequence. Heart rate variability (HRV), salivary biomarkers (alpha-amylase, cortisol, testosterone IL1-β), and sleep parameters were assessed before, during, and after the competition period.

The coherent breathing group demonstrated significant improvements in parasympathetic activity during the morning orthostatic test, as indicated by increased of the root mean square of successive differences (RMSSD, $p < 0.01$), and a more regulated cortisol response compared to the control group ($p < 0.01$). Additionally, the coherent breathing group experienced lower inflammatory responses (IL1-β, $p < 0.05$) and improved sleep quality, evidenced by longer total sleep duration ($p < 0.05$) and reduced sleep latency ($p < 0.05$). While no significant differences were observed in athletic performance between groups, coherent breathing showed clear benefits in stress regulation and sleep parameters.

The results of this study suggest that coherent breathing is effective in regulating the effects of psychophysiological stress on the ANS, HPA axis, inflammatory response, and sleep parameters. This accessible breathing method thus improves recovery in athletes by promoting autonomic balance and better sleep quality.

Keywords: *Coherent breathing, heart rate variability, salivary samples, highly trained athletes, sleep regulation.*

RACING UNDER PRESSURE PART II: HOW TO REGULATE PSYCHOPHYSIOLOGICAL STRESS IN HIGHLY TRAINED ATHLETES?

Introduction

One significant challenge for elite athletes is their ability to cope with an often anxiety-inducing external environment, also associated with the stress induced by competition and repeated maximal performance. Stress, characterized by its cognitive and physiological components, can be defined as a state of real or perceived threat to the organism that surpasses normal functioning, thereby disrupting homeostasis (24;38). As a result, stress can lead to various disruptions, such as behavioral (35), psychological (3), and physiological changes (40). It is also common to observe biological modulation in response to stress, such as the deregulation of inflammatory activity, which can increase the risk of various pathophysiology (34).

A lot of studies has already demonstrated the impact of stress and the associated imbalance of homeostasis during supramaximal exercise or competition on the autonomic nervous system (ANS) and the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis (14,18,20,32). More specifically, as described in our previous study (see Part I (46)), psychophysiological stress induced by a series of supramaximal exercises in World Class and elite athletes during competition reduces parasympathetic activity and disrupts the concentration and production of salivary hormones indicative of homeostasis (see Part I (46)). Thus, the demand for supramaximal effort, combined with the psychological stress of competition, significantly disturbs the neuroendocrine and autonomic functions of elite athletes, leading to homeostatic disruptions that can ultimately impair recovery and performance (16). Therefore, regulating psychophysiological stress is a crucial challenge for elite athletes competing internationally.

Although recovery is considered particularly important in events where athletes must compete repeatedly within a limited time frame (27), many elite athletes do not always prioritize their recovery strategies. Indeed, the sometimes unpredictable nature of competition may prevent athletes from adhering to recommendations aimed at reducing stress and enhancing recovery, particularly with regard to sleep management, despite their awareness of the impact of insufficient or poor-quality sleep on recovery (41). Sleep is therefore recognized by the high-performance community (coaches and athletes) as affected by stress-induced disruptions (13). Furthermore, the causal links between psychophysiological stress and sleep disturbances can be highlighted through quantitative sleep analysis, such as sleep quality or sleep latency, as well as qualitative analysis by referring to different sleep stages, particularly the slow-wave sleep phase (13).

In this context, to regulate psychophysiological stress, it may be useful to implement breathing strategies to optimize sleep and, ultimately, recovery. Slow breathing, also known as coherent breathing, has been proposed as an optimization tool due to its cost-effectiveness and accessibility for this population (4). Beyond the simplicity of this breathing method, the practice of coherent breathing has been described as having positive physiological and psychological effects aimed at improving performance and recovery (29). Coherent breathing stimulates various physiological processes that enhance neuroendocrine, autonomic, and inflammatory alterations, potentially improving sleep quality through the restoration of parasympathetic modulation after high-intensity exercise (12). Moreover, by activating the afferent vagus nerve, this breathing method appears to have beneficial effects on regulating neuroendocrine (21) and immune functions (2), while also significantly influencing anxiety regulation (22). Therefore, breathing methods such as coherent breathing may be an effective recovery strategy for regulating stress during competition (28). However, no study has investigated the effects of a

controlled breathing strategy on various complementary and innovative biomarkers of the ANS and the HPA axis during a sequence of supramaximal exercises in highly trained athletes. The purpose of this study was to investigate the effects of a breathing method on psychophysiological stress using a multifactorial approach, considering ANS and HPA biomarkers in a population of highly trained athletes during a simulated competition. Before implementing this breathing method in high-level athletes, the aim of the present study was to determine whether coherent breathing could regulate psychophysiological stress and its associated effects on the ANS and HPA, while improving sleep during a simulated competition. Specifically, we hypothesized that in highly trained athletes specializing in supramaximal efforts, coherent breathing can regulate parasympathetic activity, salivary biomarkers indicative of homeostasis and inflammatory processes. We also posited that stress regulation will facilitate the succession of 400-meter races by improving sleep, specifically by reducing latency and increasing total sleep duration.

Material & Methods

Experimental approach to the problem

At the conclusion of the first part of our study (see Part I), we implemented a simulated competition to closely replicate the effects of an actual competition. After characterizing the effects of psychophysiological stress in World Class and elite athletes during competition, this interventional protocol aimed to regulate psychophysiological stress during a series of 400m races in a simulated competition. The data collected, based on the same psychophysiological markers as in the previous study and a biomarker of inflammatory stress, combined with sleep monitoring, allowed us to verify whether coherent breathing can help regulate stress and thereby improve recovery in athletes specialized in supra-maximal exercises. To compare the measurements obtained during the simulated competition, the baseline was established over the three days preceding the testing phase, while the post-test period corresponded to the two days following the last race (Fig.1).

Subjects

In accordance with previous studies (14), to achieve a statistical power of 95% with a 5% significance level, twenty-two ($n = 22$: (15 males: 22.8 ± 3.3 years, 67.2 ± 7.5 kg, 178 ± 6.9 cm and 7 females: 21.3 ± 2.4 years, 58.2 ± 4.4 kg, 170 ± 5.6 cm) highly trained athletes (national level) from the French Athletics Federation were included in this study. According to the classification by McKay et al., 2022, these highly trained athletes had personal best (PB) performances that met the criteria for national-level competition (50.44 s for men and 59.14 s for women in the 400 m; 56.24 s for men and 67.04 s for women in the 400 m hurdles; and 177.00 s for men and 140.00 s for women in the 800 m), as indicated in the Hungarian table of the World Athletics Quotation Table (WA) for the 400 m, 400 m hurdles, or 800 m events. The Hungarian table is internationally recognized as the most accurate performance scoring table in world athletics and is certified by World Athletics for ranking athletes based on their performance level. All participants were informed about the study protocol, their rights, and the associated risks before providing written informed consent. All procedures were approved by the CERSTAPS ethics committee (CERSTAPS No. 2022-A00644-39/approval date March 15, 2022) and were conducted in accordance with the Declaration of Helsinki (1964, revised in 2001).

Procedures

The participants ($N = 22$) completed their first visit (Day 0: Familiarization), during which the initial measurements were taken. The preliminary assessments included the Competitive State Anxiety Inventory-2 (CSAI-2R) questionnaire, a micro blood sample (for lactate levels), and instructions for the collection of salivary markers, sleep data, and autonomic nervous system data (heart rate variability). Written informed consent was also obtained from the participants. The participants were then randomly assigned to one of two groups: either the control group (CONT, $n = 11$) or the group practicing a relaxation technique known as coherent breathing (RELAX, $n = 11$). Subsequently, participants independently continued (Pre-test: Days 1, 2, and 3) to collect all psychophysiological stress markers, with the RELAX group implementing their relaxation strategy three times per day. Participants then returned for three consecutive days to perform three 400 m races, with 24 hours of recovery between each, simulating a sequence of heats, semi-finals, and finals in a major championship (Test: Days 4, 5, and 6). All psychophysiological stress markers were collected during this period. After the three test days, participants continued independently while continuing to collect psychophysiological stress markers (Post-test: Days 7 and 8).

Strategy of recovery application (coherent breathing with Respi Relax⁺ ©)

Among the 22 participants, 11 were randomly assigned to form the RELAX condition (n = 11). They were instructed to practice coherent breathing three times a day (in the morning after waking and saliva sampling, after lunch, and just before bedtime). Coherent breathing is a gentle relaxation method based on breathing, which helps reduce stress by regulating heart rate. It adheres to the 365 rules: 3 times a day; 6 breaths per minute, for 5 minutes. The exercise was to be performed while seated, with a straight back, feet flat on the ground, and legs uncrossed to free the abdomen. Inhalation was to be deep, regular, and reach the abdomen, with each inhalation and exhalation lasting five seconds, resulting in six breathing cycles per minute. Participants were to perform the exercise using the RespiRelax application (available on Android and Apple stores, Allevard, France), which assists in regulating breathing (inhalation and exhalation) during the 5-minute exercise with the help of a ball that follows the rhythm corresponding to the correct breathing frequency. Participants had a familiarization session with the experimenters during the initial visit to ensure they could practice independently.

Heart Rate Variability

Lying to standing test: Orthostatic test

The orthostatic test, a variant of the tilt test, aimed to collect R-R intervals over 10 minutes, alternating 5 minutes in a lying position with 5 minutes in a standing position. This test was to be conducted at the same time each day (~30 minutes) in a dark room (i.e., curtains drawn) (5). Before starting the test, athletes were instructed to use the bathroom to avoid sympathetic activation during recording. Upon waking, participants attached a Polar H10 heart rate strap (H10, Polar Electro GmbH, Finland) around their chest and remained lying on their bed for 5 minutes before standing up and remaining still for 5 minutes. Participants were required to breathe normally and spontaneously. Data were recorded continuously throughout the 10-minute test via Bluetooth using the Elite HRV app (version 5.2.1, Elite HRV Inc., Asheville, NC, USA), which allows recording of the most common HRV indices. All data were then downloaded into Kubios HRV Premium software (version 3.4.3) for signal analysis.

Analysis of vagally mediated Heart Rate Variability (vmHRV)

After data export, each data file was manually inspected to correct artifacts, and then analyzed using specialized analysis software "Kubios HRV Standard" (The Biomedical Signal and Medical Imaging Analysis Group, Department of Applied Physics, University of Kuopio, Finland). A systematic mean correction was applied to all data to reduce the number of artifacts. A test was considered unusable if the percentage of artifacts was greater than 5%. Indices such as the average heart rate (HR: an indicator of overall autonomic nervous system (ANS) activation) and the root mean square of successive differences (RMSSD: an indicator of vagal activity) were calculated and considered as indices of the parasympathetic branch of the ANS.

Salivary samples

Salivary samples were collected during the morning of each period (i) 3-days prior the test period (during the Pre-Test period to establish baseline levels), (ii) during the days of race (during Test-Period), right after the HRV testing, (iii) and 2-days following the competitive period to assess the recovery kinetic (during Post-Test period). Also, during the simulated competition period, samples were assessed before warming up (Pre-Race) and 10 minutes after the end of the race (Post-Race). Salivary samples were collected by passive drooling into a plastic Eppendorf tube. Subjects were instructed to not eat, drink, oral rinse or brush their teeth 30 minutes before salivary collection and to stay seated comfortably during the supervised collection time. Once collected, the samples were immediately conserved at -20°C during the

testing periods then stored at -80°C until assay. The day of the measurement assay, samples were centrifuged at 14,000 x g, 2min to remove particulate matter, and obtain clear samples. The cortisol, testosterone, and IL1-β measurements were assessed by commercial kits using ELISA kit (Salimetrics LLC, State College, PA, USA) while alpha-amylase was determined by another commercial kit (IBL-Tecan, Hamburg, Germany). As precised by manufacturer, IL1-β samples were diluted at 1/15th, alpha-amylase samples were diluted at 1/301st while for cortisol and testosterone, samples were dosed pure during the measurements. Intra- and inter assay coefficients of variation (CVs) were 4.6-6.0% for cortisol, 5.22-7.5 % for testosterone, 2.4-4.5 % for IL1-β and 3.7-6.9 % for alpha-amylase respectively. The analytical range of sensitivity for cortisol, testosterone, IL1-β and alpha-amylase are 0.012-3000 µg/dL, 6.1-600 pg/mL, 3.13-200 pg/mL and 0-400 U/mL, respectively.

Qualitative and Quantitative Sleep Monitoring: Oura Ring Version 3

The Oura Ring Version 3 (Ōura Health Ltd., Finland) is a commercial device designed for tracking activity, sleep, heart rate, and heart rate variability. The Oura Ring includes an integrated photoplethysmography sensor and an inertial measurement unit (IMU). The ring is lightweight (4-6 grams), waterproof, and user-friendly, with a battery life of six days. Data is automatically transmitted to the mobile application (compatible with Android and iOS) and then transferred to the cloud server. Participants were required to wear the Oura Ring each night from the initial visit (familiarization) until the end of the test (D8). Data was automatically updated every morning and exported from the cloud, where data was collected every 5 seconds. The sleep metrics analyzed included total sleep duration, sleep latency, time spent in bed, duration of slow-wave sleep, duration of light sleep, and duration of rapid eye movement (REM) sleep.

Competitive State Anxiety Inventory-2 (CSAI-2R) questionnaire

A modified version of the Competitive State Anxiety Inventory-2 (CSAI-2R) (30) was used to measure cognitive anxiety, somatic anxiety, and self-confidence before performance. The CSAI-2 includes 27 items, with nine items in each subscale. Examples of cognitive anxiety items include "I am concerned about this competition" and "I am worried about performing poorly," while somatic anxiety items include "I feel nervous" and "My body feels tense." The response scale allowed participants to rate the intensity of each symptom on a scale from 1 (not at all) to 4 (very much), resulting in scores ranging from 9 to 36 for each subscale. Additionally, a direction scale was included for the cognitive and somatic anxiety items, where participants rated the extent to which the intensity of each symptom facilitated or debilitated subsequent performance on a scale from -3 (very debilitating) to +3 (very facilitating). Thus, the possible direction scores for each subscale ranged from -27 to +27, with a positive score indicating a facilitating state and a negative score indicating a debilitating state. Each participant completed the CSAI-2R questionnaire during the pre-test period (familiarization), establishing a baseline value. Subsequently, all 44 participants completed the questionnaire prior to each race before starting their warm-up. The athletes were isolated to avoid disturbances during the questionnaire completion, ensuring reproducible conditions.

The 400 m Races

During the testing phase (Day 3, Day 4, and Day 5), the participants competed in a daily 400 m race. These races served as simulated competitions, including a specific warm-up, a call room, and a direct confrontation race with a start from starting blocks. For performance measurements (split times on the 400 m in seconds), video recordings were made using an iPhone 11 (1080p HD at 60 frames per second, Apple, Cupertino, CA, USA) and an iPad Pro (1080p HD at 60

frames per second, Apple, Cupertino, CA, USA). A hand clap was used to start the timer. The video camera was positioned perpendicularly to the finish line, similar to official competitions, and the timer was stopped when the athlete's shoulder line crossed the finish line. The footage was analyzed using software to obtain precise measurements to the hundredth of a second. Additionally, a manual stopwatch was used as a backup measure in case of failure of the primary method. All performance tests were recorded by dual manual timing by two official athletics judges, specialists from the French national 400 m team, who took all race times simultaneously to avoid any methodological bias (14).

The 400 m races were conducted on an indoor track with a length of 340 m (Maigrot Hall of the Institute of Sport Expertise and Performance, Paris, France) to ensure highly reproducible conditions (the temperature was kept constant, and there was no wind). Before each race, the athletes prepared as if for a real competition, using techniques to stay calm and focused. The athletes were conditioned by their coaches as in a real competition context. Training loads were adjusted and reduced in the days leading up to the tests to ensure they were in optimal shape and motivated to perform. The athletes' warm-up lasted one hour, as in competition. The athletes were required to adhere to their usual competition routine, which included mobilization, jogging, stretching, technical exercises, sprints, and starts, before entering the call room. Tactically, the athletes were specifically trained to execute a quick and efficient start using their phosphocreatine reserves (31) to gain an initial advantage. As 400 m specialists, they had also learned to manage their effort with a fast start and maintain their resistance to the inevitable decline in speed that occurs in the last 100 meters (23). Furthermore, the participants engaged in direct 1-on-1 confrontations with instructions to win the race and achieve the best possible performance, as if they had to qualify for the next round, with their ranking influencing their participation the following day.

Throughout the tests, the athletes received verbal encouragement and support, like a competitive environment, to ensure they felt supported and motivated.

Lactatemia

Blood lactate concentration ([La]) was measured by fingertip puncture (20 μ L) to assess acid-base regulation. Samples were collected during the initial visit (familiarization) at rest (before starting the warm-up) and at the end of each race, 4 minutes (+3') and 8 minutes (+6') post-exercise. The samples were analyzed using a Lactate Pro 2 device (Arkray, LT-1730, Kyoto, Japan).

Statistical Analyses

All values are presented as means $\pm$ standard deviations. The Shapiro-Wilk test was used to assess the normality of the data distribution. An a priori power analysis indicated that 22 participants per condition were needed to detect significant differences, based on an estimated alpha level of 0.05 and a power of 95%, following performance improvement data from a previous study by Chiron et al., 2024 (14).

A two-way repeated measures ANOVA was used to interpret the results. Post-hoc tests were also applied to compare specific measures between the two competition days. Greenhouse-Geisser correction was applied to the two-way repeated measures ANOVA results.

The analysis covered different testing periods (baseline, heats, finals, post-competition). The alpha level was set at $p \leq 0.05$, and analyses were performed using SPSS 24 (IBM Corp.). Cohen's d effect sizes (mean residual/SD) were calculated for performance parameters to classify the magnitude of estimation error as large (≥ 0.8), moderate (0.5 - 0.8), or small (< 0.5). All statistical analyses and graphical figures were conducted using R software (version 3.6.1; The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria), GraphPad (Prism 9), and JASP (v. 0.16.3).

Results

Heart Rate Variability

All heart rate variability (HRV) results are presented in Tables 5 and 6 (Tab. 5 and Tab. 6) and illustrated in Figure 2 (Fig. 2) as means and standard deviations.

For participants in the CONT group, the RMSSD in the supine position significantly decreased between the D4 and D5 ($p < 0.01$; RMSSD D4: $90.29 \pm 21.26 \text{ ms}^{-1}$ vs RMSSD D5: $79.58 \pm 20.46 \text{ ms}^{-1}$) (Fig. 2) while no significant difference was observed in the simulated competition for the RELAX group ($p > 0.05$).

In the CONT group, resting HR measured in the morning in the supine position significantly increased between the D4 and D5 ($p < 0.05$; HR D4: $54.99 \pm 7.45 \text{ bpm}$ vs HR D5: $59.80 \pm 8.12 \text{ bpm}$). In the RELAX group, morning HR in the supine position significantly increased between the D4 and D5 400m races ($p < 0.001$; HR D4 400m: $52.71 \pm 8.60 \text{ bpm}$ vs HR D5 400m: $57.31 \pm 7.39 \text{ bpm}$), as well as between the D4 and D6 ($p < 0.05$; D4: $52.71 \pm 8.60 \text{ bpm}$ vs HR D6: $56.83 \pm 12.73 \text{ bpm}$).

Salivary samples

Salivary sampling data are reported in Tables 1 (Tab. 1A and Tab. 1B).

Alpha-Amylase

The morning salivary alpha-amylase concentration on D4 was significantly lower in the CONT group compared to the RELAX group ($p < 0.05$; CONT D4: $35.021 \pm 21.603 \text{ U/mL}$; RELAX D4: $58.588 \pm 18.010 \text{ U/mL}$).

In the CONT group, salivary alpha-amylase concentration significantly decreased between Pre-Test period and the D4 ($p < 0.05$; Pre-Test: $40.811 \pm 22.422 \text{ U/mL}$; D4: $35.021 \pm 21.603 \text{ U/mL}$). Salivary alpha-amylase concentration significantly increased between Pre-Race and Post-Race values on D5 ($p < 0.005$) and D6 ($p < 0.001$) for the CONT group participants.

No significant differences were observed in the RELAX group between Pre-Test period and the Test days during the simulated competition ($p > 0.05$). However, salivary alpha-amylase concentration significantly increased between Pre-Race and Post-Race values on D4 ($p < 0.05$) and D6 ($p < 0.05$) for the RELAX group participants (Fig. 3).

Cortisol

For both conditions (CONT and RELAX), salivary concentrations between Pre-Race and Post-Race significantly increased after each of the three 400m races during the Test-Period (Days 4, 5, and 6) ($p < 0.001$).

In the CONT group, the morning salivary cortisol concentration significantly increased between the D5 and D6 ($p < 0.05$; Day 5: $0.374 \pm 0.181 \text{ } \mu\text{g/dL}$ vs. Day 6: $0.249 \pm 0.122 \text{ } \mu\text{g/dL}$). Post-race salivary cortisol concentrations significantly decreased between the D4 and D6 for the CONT group athletes ($p < 0.01$; Day 4 Post-Race: $0.796 \pm 0.385 \text{ } \mu\text{g/dL}$ vs. Day 6 Post-Race: $0.494 \pm 0.247 \text{ } \mu\text{g/dL}$) (Fig. 4).

No significant differences were observed in the RELAX group across the Test-Period ($p > 0.05$) (Fig. 4).

Testosterone

In the CONT group, salivary testosterone concentration significantly decreased between the average Pre-Test period and Day 6 (the third competition day) ($p < 0.05$; Pre-Test: $0.018 \pm 0.007 \text{ } \mu\text{g/dL}$ vs. Day 6: $0.016 \pm 0.008 \text{ } \mu\text{g/dL}$). When comparing Pre-Race and Post-Race values during the Test-Period, salivary testosterone concentration significantly decreased ($p < 0.05$) on both the D4 and D5 for the CONT group.

In the RELAX group, salivary testosterone concentration significantly decreased between the average Pre-Test and Day 6 and Post-Test period ($p < 0.05$; baseline: $0.025 \pm 0.014 \mu\text{g/dL}$; D6: $0.021 \pm 0.013 \mu\text{g/dL}$; D7: $0.018 \pm 0.012 \mu\text{g/dL}$). When comparing Pre-Race and Post-Race values during the competition days, salivary testosterone concentration significantly decreased ($p < 0.05$) on the D4, D5 and D6 for the RELAX group.

Ratio T/C

For the T/C ratio, no significant differences were observed in the CONT group ($p > 0.05$).

In the RELAX group, the T/C ratio significantly increased between Pre-Test and Post-Test period ($p < 0.01$; baseline).

IL1- β

In the CONT group, salivary IL1- β concentrations significantly increased between Pre-Test and Post-test period ($p < 0.05$; Pre-Test: $835.547 \pm 646.202 \text{ pg/mL}$; D7: $1309.800 \pm 837.504 \text{ pg/mL}$), as well as between Day 5 and Post-Test period ($p < 0.05$; D5: $815.842 \pm 569.373 \text{ pg/mL}$; D7: $1309.800 \pm 837.504 \text{ pg/mL}$) (Fig. 4).

In the CONT group, salivary IL1- β concentrations measured between Pre-Race and Post-Race during race days significantly increased on D4 ($p = 0.014$), D5 ($p < 0.05$), and D6 ($p < 0.01$).

No significant differences in IL1- β concentration were observed in the RELAX group ($p > 0.05$) (Fig. 4).

Sleep markers

The sleep markers of the subjects recorded during the protocol are reported in Tables 1 (Tab. 1A and Tab. 1B).

Total Sleep Duration

No significant differences were reported in the CONT group between Pre-Test period, the Test-Period and Post-Test period ($p > 0.05$).

In the RELAX group, total sleep duration significantly increased between Post-Test period and Day 4 ($p < 0.05$; Post-Test: $24,555.18 \pm 4,696.96 \text{ s}$; D4: $27,960.00 \pm 3,684.09 \text{ s}$). Total sleep duration in the RELAX group decreased between the D4 and the Post-Test period ($p < 0.05$; D4: $27,960.00 \pm 3,684.09 \text{ s}$; D7: $24,174.00 \pm 5,221.18 \text{ s}$) (Fig. 5).

REM sleep duration

No significant difference was observed between the CONT and RELAX groups ($p > 0.05$).

Light Sleep Duration

No significant differences were observed for either the CONT or RELAX group ($p > 0.05$).

Deep Sleep Duration

No significant differences were observed in the CONT group ($p > 0.05$).

In the RELAX group, deep sleep duration significantly increased between Pre-Test and Day 4 ($p < 0.05$; Pre-Test: $8,772.18 \pm 2,391.34 \text{ s}$; D4: $9,820.91 \pm 2,584.85 \text{ s}$).

Sleep Latency

No significant differences were observed for any measurement between the CONT and RELAX groups ($p > 0.05$). However, when the percentage variance relative to Pre-Test period was analyzed, a significant difference was found on D5 between the CONT and RELAX groups ($p < 0.05$) (Fig. 6).

CSAI-2R

For the subjects in the CONT group, somatic anxiety significantly increased between Familiarization and the D4 ($p < 0.05$; Familiarization: 9.42 ± 11.21 a.u.; D4: 10.30 ± 11.06 a.u.). Self-confidence in the CONT group significantly decreased between Familiarization and the D4 (Familiarization: 13.45 ± 9.22 a.u.; D4: 12.24 ± 8.56 a.u.).

For the subjects in the RELAX group, somatic anxiety significantly increased between Familiarization and D4 ($p < 0.05$; Baseline: 8.78 ± 11.49 a.u.; D4: 10.58 ± 10.50 a.u.).

Performance

The performance data of the subjects recorded during the Test-Period (simulated competition) are reported in Tables 1 (Tab. 1A and Tab. 1B).

For the athletes (both male and female) in the CONT group, the average performance times for the 400m races during the D4, the D5 and the D6 were 55.71 ± 4.19 s, 55.57 ± 4.34 s, and 55.78 ± 4.09 s, respectively.

For the athletes (both male and female) in the RELAX group, the average performance times for the 400m races during the D4, the D5 and the D6 were 54.58 ± 6.85 s, 54.35 ± 6.65 s, and 54.42 ± 6.65 s, respectively.

No significant differences were reported between the two conditions or between the different races for either condition ($p > 0.05$).

Lactatemia

The blood lactate values of the subjects during the Test-Period (simulated competition) are reported in Tables 1 (Tab. 1A and Tab. 1B).

The mean maximum blood lactate concentrations for the subjects in the CONT group, following the D4 the D5 and the D6 were 20.0 ± 3.8 mmol, 19.8 ± 2.9 mmol, and 19.7 ± 1.4 mmol, respectively.

The mean maximum blood lactate concentrations for the subjects in the RELAX group, following the D4 the D5 and the D6 were 20.1 ± 2.1 mmol, 19.3 ± 1.3 mmol, and 19.3 ± 1.4 mmol, respectively.

No significant differences were observed between the different maximum blood lactate concentrations or between the two conditions during the Test-Period ($p > 0.05$).

Discussion

This study is the first to highlight the effects of a relaxation strategy using a systemic approach based on multiple biomarker analysis. The objective of this study was to evaluate the impact of coherent breathing on the regulation of psychophysiological stress in highly trained athletes during a simulated competition. The main results show that the practice of coherent breathing in the RELAX group improved parasympathetic activity, stabilized salivary biomarkers such as alpha-amylase and cortisol, and increase the total sleep duration compared to the CONT group. Furthermore, the absence of significant modulation of IL1- β in the RELAX group compared to the CONT group indicates a protective effect against inflammation responses induced by psychophysical stress.

Our observations highlight a significant regulation of parasympathetic activity, measured by the RMSSD index, in the RELAX group practicing coherent breathing (Fig. 2). In contrast to the CONT group, which showed a significant reduction in RMSSD during the simulated competition, the athletes in the RELAX group maintained stable parasympathetic activity. This difference reflects an increase in sympathetic activity at the expense of parasympathetic activity in the CONT group, thereby disrupting ANS activity (8). This phenomenon is frequently observed in stressful situations, particularly during competition or intense physical exertion (5). Our results confirm the effects of coherent breathing on heart rate variability markers, particularly parasympathetic markers, which have been previously reported in earlier studies (26,37). Additionally, salivary alpha-amylase concentrations, a direct biomarker of the neuroendocrine axis and sympathetic nervous system activation, provided further insights into the link between stress and the ANS. In the CONT group, a significant increase in alpha-amylase was observed during Test-Period, indicating an acute response to psychophysiological stress. In contrast, although the underlying mechanisms of psychophysiological stress regulation require further investigation (18), the RELAX group showed more stable modulation of this biomarker, reinforcing the hypothesis that coherent breathing reduces excessive sympathetic activation (Fig. 3). Furthermore, the significant difference observed in D4 between the two groups suggests that this technique contributed to effectively regulating ANS activity by restoring balance between the sympathetic and parasympathetic branches. In line with the scientific literature, coherent breathing appears to regulate autonomic nervous system activity, notably by restoring parasympathetic modulation based on the control of respiratory sinus arrhythmia during breathing cycles (12). Indeed, during exhalation, a decrease in heart rate is observed, associated with parasympathetic activation, while inhalation leads to an increase in heart rate, indicating sympathetic activation (36). Regulated breathing during coherent breathing stimulates baroreflex control, promoting synchronization between respiratory rate and the intrinsic frequency of the baroreflex system, thereby enhancing parasympathetic activation (29). Thus, in line with previous research and the results of this study, coherent breathing proves to be an effective strategy for regulating autonomic nervous system activity and the neuroendocrine axis in athletes undergoing repeated exercise, thereby promoting better stress modulation.

Furthermore, the results regarding salivary cortisol, a key biomarker of the stress response, appear to support the benefits of coherent breathing in regulating the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis. Two major observations were noted in the RELAX group practicing coherent breathing. First, a significant modulation of cortisol levels was observed between pre- and post-exercise periods, with clear differences throughout the study. This contrasts with the control group, which showed no marked modulation on the final day of competition. These findings suggest that coherent breathing plays a crucial role in stabilizing the HPA axis, preserving a balanced neuroendocrine response to repeated physical efforts. This phenomenon

can be explained by the concept of adrenal depletion (6), where prolonged exposure to intense stress leads to reduced adrenal gland activity, responsible for cortisol production. In the control group, the absence of a regulatory intervention like coherent breathing led to a progressive reduction in cortisol production over the course of the exercises, suggesting an inability to adequately respond to repeated efforts. In contrast, athletes in the RELAX group demonstrated better cortisol regulation, with consistent modulation throughout the competition days, indicating that coherent breathing helped prevent adrenal depletion.

However, when comparing pre-competition cortisol levels between the CONT and RELAX groups, no significant differences were observed. This result aligns with previous studies, which suggest that in highly trained athletes, pre-competitive cortisol levels have little impact, especially in contexts where stress exposure is controlled or moderate (45). Thus, it appears that coherent breathing acts as an effective modulator of the ANS and HPA axis, allowing athletes to maintain stable cortisol levels despite the repeated demands of competition. The combination of salivary alpha-amylase and cortisol could also be effective for analyzing chronic stress in subjects, as proposed in the scientific literature (1).

In line with this, and consistent with the previous study (46), CSAI-2R scores reported for both conditions showed a significant increase in somatic and cognitive anxiety during the simulated competition. Moreover, while no significant difference was observed in the RELAX group, the self-confidence of the CONT group significantly decreased between the familiarization phase and the first test day. This finding aligns with previous studies suggesting that a decline in self-confidence can negatively impact performance (15). Therefore, implementing such a breathing strategy could positively influence self-confidence and potentially enhance long-term performance (15). Based on the results presented above, our study demonstrates that coherent breathing reduces the effects of psychophysiological stress by regulating the activity of the autonomic nervous system (ANS) and the hypothalamic-pituitary-adrenal (HPA) axis. This breathing technique also appears to contribute to greater stress resilience and may serve as a valuable strategy for athletes competing in high-intensity events, promoting effective stress regulation throughout the competition period.

Moreover, our study is the first to demonstrate the regulation of inflammatory biomarkers such as IL1- β following the implementation of heart coherence in athletes during a sequence of supramaximal exercises. Variations in salivary IL1- β concentration, a biomarker of the pro-inflammatory system, appear to be influenced by coherent breathing. Two major observations emerged from this study concerning IL1- β . First, a significant difference between baseline and post-test values was observed in the CONT group, unlike in the RELAX group. Second, significant variations between pre- and post-exercise measurements were noted throughout the experiment in the CONT group, which were not seen in the RELAX group. These findings, particularly the significant increase in IL1- β in the control group, are consistent with the scientific literature, where an enhanced inflammatory response is expected in reaction to repeated stress stimuli (17). However, the fact that the RELAX group showed no significant modulation of IL1- β , even after intense exercises, is particularly noteworthy. This is the first time that such an absence of an inflammatory response has been observed in connection with a breathing strategy. It suggests that coherent breathing may play a role in regulating the immune response, particularly by reducing the activation of pro-inflammatory pathways like IL1- β . These findings highlight the potential protective effect of coherent breathing against excessive increases in inflammatory cytokines in response to physical stress. The stabilization of IL1- β levels in the RELAX group shows that coherent breathing not only improved the regulation of the autonomic and neuroendocrine systems but also modulated immune activity. Thus, this practice could provide an effective strategy for preventing inflammatory overload and associated risks, particularly in contexts of high psychophysiological stress. In summary,

coherent breathing has demonstrated positive effects on neuroendocrine, autonomic, and immune functions during a sequence of supra-maximal exercises in a simulated competition. Given the deleterious effects of psychophysiological stress on homeostasis (25) and the importance of sleep in this regulatory process, it is essential to consider the impact of such a breathing strategy on recovery.

As previously mentioned, the regulation of homeostasis is closely linked to both the quantity and quality of sleep. In response to stress, sleep plays a major role in homeostatic regulation processes, but it can also be impacted by homeostatic disturbances (42). Thus, sleep is a crucial variable in the recovery of athletes during competition.

The results of our study confirm the positive impact of coherent breathing on sleep quantity and its link to the regulation of the ANS and the HPA axis. Indeed, a significant increase in total sleep duration was observed in the RELAX group on Day 4 compared to baseline. This 15% increase indicates optimized sleep for athletes practicing coherent breathing. This phenomenon can be explained by better regulation of ANS activity, as evidenced by the evolution of RMSSD and salivary alpha-amylase concentrations in the RELAX group during the testing period. The practice of coherent breathing seems to have stabilized sympathetic nervous system activity, which likely facilitated an improvement in sleep quantity, reducing the risk of sleep deprivation. These observations are consistent with Chauvineau's (2021) (10) findings, which highlight the importance of parasympathetic reactivation after physical exercise to improve sleep latency. A significant difference in sleep latency was also observed between the CONT and RELAX groups on Day 5. The RELAX group showed reduced sleep latency, while the CONT group exhibited increased latency, supporting the hypothesis that coherent breathing practice helped maintain parasympathetic balance. This parasympathetic modulation appears to play a crucial role in improving sleep onset and sleep quantity (4,42).

Light sleep, corresponding to the first stage of non-rapid eye movement (REM) sleep, is essential for cognitive recovery and memory (19). Deep sleep, characterized by high-amplitude delta waves, is crucial for physical and neuroendocrine recovery, as well as memory processing (19). By regulating ANS activity, coherent breathing also seems to have promoted sleep quality during these essential recovery phases. In fact, the RELAX group showed an increase in light sleep on Day 4 compared to baseline, and an increase in deep sleep duration compared to the CONT group. Regarding the quality of sleep stages, significant differences were also observed in light and deep sleep duration.

It is important to note that the results of our study were obtained from a population of athletes specialized in supra-maximal efforts. Due to the unique nature of the studied population, sleep monitoring was conducted using version 3 of the Oura Ring. However, data on sleep quality should be interpreted with caution, given reported differences in measurement accuracy between this tool and polysomnography. Indeed, an approximate margin of error of 10% was observed for all data related to sleep quality (stages), with only sleep quantity (latency and total sleep duration) having been validated against the gold standard (11,44).

This protocol was conducted over one week and in the context of a simulated competition. Therefore, the timeframe for familiarization with coherent breathing may not have been optimal, considering the chronic benefits of such a strategy. Furthermore, as our protocol was conducted with athletes specialized in the 400 meters during a simulated competition, it may be valuable to replicate this protocol in an actual competitive context.

In conclusion, our results show that coherent breathing has a beneficial effect on sleep regulation, particularly in sleep latency and total sleep duration. Although performance did not improve between the two conditions, this systemic approach, combining the analysis of ANS markers and neuroendocrine biomarkers with immune or confirms that practicing coherent

breathing is an effective strategy for enhancing recovery in athletes subjected to repeated efforts and intense psychophysiological stress (43).

Practical Applications

Although research highlights the ability of elite athletes to overcome the effects of sleep deprivation during repeated supra-maximal exercises, they are still exposed to a reduction in motivation, which plays a crucial role in maintaining performance levels (33). Indeed, as mentioned throughout our study, elite athletes face significant psychological stress due to the competitive nature (9), which can ultimately impact their ability to consistently achieve high-level performance. Some athletes are more sensitive than others to the psychophysiological stress induced by competition (46) and the detrimental effects of such stress on homeostasis can significantly affect recovery and final athletic performance. In this perspective, implementing strategies to regulate the effects of stress among athletes who appear most affected emerges as a critical concern for elite athletes participating in international competitions. As described in our study, the practice of coherent breathing as a recovery strategy seems to be a promising tool for this population. Given its simplicity, low associated cost, minimal time commitment (three times five minutes per day), and significant benefits for managing psychophysiological stress, performance professionals should encourage their athletes to adopt such a practice to enhance competitive performance. Thus, the use of coherent breathing in a competitive context could improve sleep for athletes most affected by stress. This breathing strategy would optimize recovery and support the repetition of high-level performances within the tight constraints of competition schedules.

References

1. Ali N, Pruessner JC. The salivary alpha amylase over cortisol ratio as a marker to assess dysregulations of the stress systems. *Physiol Behav.* 2012;106(1):65-72.
2. Black DS, Slavich GM. Mindfulness meditation and the immune system: a systematic review of randomized controlled trials. *Ann N Y Acad Sci.* 2016;1373(1):13-24.
3. Bolger N, DeLongis A, Kessler RC, Schilling EA. Effects of daily stress on negative mood. *J Pers Soc Psychol.* 1989;57(5):808.
4. Borges U, Lobinger B, Javelle F, Watson M, Mosley E, Laborde S. Using slow-paced breathing to foster endurance, well-being, and sleep quality in athletes during the COVID-19 pandemic. *Front Psychol.* 2021;12:624655.
5. Bourdillon N, Schmitt L, Yazdani S, Vesin JM, Millet GP. Minimal window duration for accurate HRV recording in athletes. *Front Neurosci.* 2017;11:456.
6. Brooks KA, Carter J. Overtraining, exercise, and adrenal insufficiency. *J Nov Physiother.* 2013;3(125).
7. Buchheit M, Gindre C. Cardiac parasympathetic regulation: respective associations with cardiorespiratory fitness and training load. *Am J Physiol-Heart Circ Physiol.* 2006;291(1):H451-8.
8. Buchheit M, Papelier Y, Laursen PB, Ahmaidi S. Noninvasive assessment of cardiac parasympathetic function: postexercise heart rate recovery or heart rate variability? *Am J Physiol-Heart Circ Physiol.* 2007;293(1):H8-10.
9. Campbell E, Poudevigne M, Irving R, Dilworth L, Abel W, Bailey J. Psychophysiological stress and performance in Jamaican junior track and field athletes. *Perform Enhanc Health.* 2020;8(2-3):100171.
10. Chauvineau M, Pasquier F, Guyot V, Aloulou A, Nedelec M. Effect of the depth of cold water immersion on sleep architecture and recovery among well-trained male endurance runners. *Front Sports Act Living.* 2021;3:659990.
11. Chee NI, Ghorbani S, Golkashani HA, Leong RL, Ong JL, Chee MW. Multi-night validation of a sleep tracking ring in adolescents compared with a research actigraph and polysomnography. *Nat Sci Sleep.* 2021;177-90.
12. Chen L, Deng H, Cui H, Fang J, Zuo Z, Deng J, et al. Inflammatory responses and inflammation-associated diseases in organs. *Oncotarget.* 2018;9(6):7204.
13. Chennaoui M, Bougard C, Drogou C, Langrume C, Miller C, Gomez-Merino D, et al. Stress biomarkers, mood states, and sleep during a major competition: "Success" and "failure" athlete's profile of high-level swimmers. *Front Physiol.* 2016;7:94.
14. Chiron F, Erblang M, Gulören B, Bredariol F, Hamri I, Leger D, et al. Exploring the Influence of Acid-Base Status on Athletic Performance during Simulated Three-Day 400 m Race. *Nutrients.* 2024;16(13):1987.
15. Craft LL, Magyar TM, Becker BJ, Feltz DL. The relationship between the Competitive State Anxiety Inventory-2 and sport performance: A meta-analysis. *J Sport Exerc Psychol.* 2003;25(1):44-65.
16. De Pero R, Minganti C, Cibelli G, Cortis C, Piacentini MF. The Stress of Competing: Cortisol and Amylase Response to Training and Competition. *J Funct Morphol Kinesiol.* 4 janv 2021;6(1):5.
17. Docherty S, Harley R, McAuley JJ, Crowe LA, Pedret C, Kirwan PD, et al. The effect of exercise on cytokines: implications for musculoskeletal health: a narrative review. *BMC Sports Sci Med Rehabil.* 2022;14(1):5.
18. Engert V, Vogel S, Efanov SI, Duchesne A, Corbo V, Ali N, et al. Investigation into the cross-correlation of salivary cortisol and alpha-amylase responses to psychological stress. *Psychoneuroendocrinology.* 2011;36(9):1294-302.
19. Erblang M. Influence de polymorphismes génétiques sur le sommeil et l'efficacité de la

caféine. 2020;

20. Esquivel AG, Torres B, Corrales MM, Salazar MG, Orellana JN. Heart rate variability after three badminton matches. Are there gender differences? *Arch Med Deporte*. 2011;28(144):257-64.
21. Fan Y, Cui Y, Tang R, Sarkar A, Mehta P, Tang YY. Salivary testosterone and cortisol response in acute stress modulated by seven sessions of mindfulness meditation in young males. *Stress*. 2024;27(1):2316041.
22. Garza L, Ford SJ. Implementing a breathing technique to manage performance anxiety in softball. *Sport J*. 2009;12(2).
23. Hanon C, Lepretre PM, Bishop D, Thomas C. Oxygen uptake and blood metabolic responses to a 400-m run. *Eur J Appl Physiol*. 2010;109(2):233-40.
24. Kellmann M, Kallus KW. Recovery-stress questionnaire for athletes: User manual. *Human Kinetics*; 2001.
25. Krueger JM, Rector DM, Churchill L. Sleep and cytokines. *Sleep Med Clin*. 2007;2(2):161-9.
26. Laborde S, Hosang T, Mosley E, Dosseville F. Influence of a 30-day slow-paced breathing intervention compared to social media use on subjective sleep quality and cardiac vagal activity. *J Clin Med*. 2019;8(2):193.
27. Lattier G, Millet GY, Martin A, Martin V. Fatigue and recovery after high-intensity exercise Part II: recovery interventions. *Int J Sports Med*. 2004;509-15.
28. Leger D, Metlaine A, Choudat D. Insomnia and sleep disruption: relevance for athletic performance. *Clin Sports Med*. 2005;24(2):269-85.
29. Lehrer P, Kaur K, Sharma A, Shah K, Huseby R, Bhavsar J, et al. Heart rate variability biofeedback improves emotional and physical health and performance: A systematic review and meta analysis. *Appl Psychophysiol Biofeedback*. 2020;45:109-29.
30. Martens R. Competitive anxiety in sport. *Hum Kinet*. 1990;
31. Nummela A, Vuorimaa T, Rusko H. Changes in force production, blood lactate and EMG activity in the 400-m sprint. *J Sports Sci*. 1992;10(3):217-28.
32. Podstawski R, Boraczyński M, Nowosielska-Swadźba D, Zwolińska D. Heart rate variability during pre-competition and competition periods in volleyball players. *Biomed Hum Kinet*. 2014;6(1).
33. Reilly T, Piercy M. The effect of partial sleep deprivation on weight-lifting performance. *Ergonomics*. 1994;37(1):107-15.
34. Schneiderman N, Ironson G, Siegel SD. Stress and health: psychological, behavioral, and biological determinants. *Annu Rev Clin Psychol*. 2005;1(1):607-28.
35. Scott SB, Graham-Engeland JE, Engeland CG, Smyth JM, Almeida DM, Katz MJ, et al. The effects of stress on cognitive aging, physiology and emotion (ESCAPE) project. *BMC Psychiatry*. 2015;15:1-14.
36. Shaffer F, Ginsberg JP. An overview of heart rate variability metrics and norms. *Front Public Health*. 2017;5:258.
37. Shao R, Man IS, Lee TM. The Effect of Slow-Paced Breathing on Cardiovascular and Emotion Functions: A Meta-Analysis and Systematic Review. *Mindfulness*. 2024;15(1):1-18.
38. Smith SM, Vale WW. The role of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis in neuroendocrine responses to stress. *Dialogues Clin Neurosci*. 31 déc 2006;8(4):383-95.
39. Stiller JW, Postolache TT. Sleep-wake and other biological rhythms: functional neuroanatomy. *Clin Sports Med*. 2005;24(2):205-35.
40. Stults-Kolehmainen MA, Sinha R. The effects of stress on physical activity and exercise. *Sports Med*. 2014;44:81-121.
41. Svensson T, Madhawa K, Hoang N, Chung U il, Svensson AK. Validity and reliability of the Oura Ring Generation 3 (Gen3) with Oura sleep staging algorithm 2.0 (OSSA 2.0) when

- 661 compared to multi-night ambulatory polysomnography: A validation study of 96 participants
1 662 and 421,045 epochs. *Sleep Med.* 2024;115:251-63.
- 2 663 42. Walsh NP, Halson SL, Sargent C, Roach GD, Nédélec M, Gupta L, et al. Sleep and the
3 664 athlete: narrative review and 2021 expert consensus recommendations. *Br J Sports Med.*
4 665 2021;55(7):356-68.
- 5 666 43. Zaccaro A, Piarulli A, Laurino M, Garbella E, Menicucci D, Neri B, et al. How breath-
6 667 control can change your life: a systematic review on psycho-physiological correlates of slow
7 668 breathing. *Front Hum Neurosci.* 2018;12:353.
- 8 669 44. de Zambotti M, Rosas L, Colrain IM, Baker FC. The sleep of the ring: comparison of
9 670 the ŌURA sleep tracker against polysomnography. *Behav Sleep Med.* 2019;17(2):124-36.
- 10 671 45. Zilioli S, Watson NV. The hidden dimensions of the competition effect: Basal cortisol
11 672 and basal testosterone jointly predict changes in salivary testosterone after social victory in
12 673 men. *Psychoneuroendocrinology.* 2012;37(11):1855-65.
- 13 674 46. RACING UNDER PRESSURE PART I.pdf.
14 675

Tables & Figures

Table 1: Summary table of data for the CONT group (A) and the RELAX group (B).

Tab. 1A: Summary table of various heart rate variability (HRV) markers, salivary biomarkers, sleep parameters, CSAI-2R score, performance, and lactate concentration for the CONT group.

Tab. 1B: Summary table of various heart rate variability (HRV) markers, salivary biomarkers, sleep parameters, CSAI-2R score, performance, and lactate concentration for the CONT group.

A		CONTROL				
		Pre-Test (D1 to D3)	Test : Heats (D4)	Test : Semi-Final (D5)	Test : Final (D6)	Post-Test (D7 to D8)
HRV	RMSSD	84.21 ± 6.28	90.29 ± 21.26	79.58 ± 20.46	81.13 ± 52.60	89.37 ± 4.61
	HR	56.51 ± 1.24	54.99 ± 7.45	59.80 ± 8.12	59.40 ± 6.00	55.75 ± 6.11
Alpha-amylase (U/mL)	Morning	40.811 ± 22.422	35.021 ± 21.603	45.335 ± 18.481	51.825 ± 22.745	49.283 ± 37.473
	Pre	-	146.799 ± 90.595	127.229 ± 74.406	118.515 ± 55.759	-
	Post	-	217.937 ± 85.594	219.567 ± 122.401	240.265 ± 120.107	-
Cortisol (µg/d)	Morning	0.366 ± 0.155	0.310 ± 0.123	0.374 ± 0.181	0.249 ± 0.122	0.393 ± 0.253
	Pre	-	0.308 ± 0.244	0.183 ± 0.151	0.290 ± 0.258	-
	Post	-	0.796 ± 0.385	0.601 ± 0.277	0.494 ± 0.247	-
Testosterone (µg/dL)	Morning	0.018 ± 0.007	0.017 ± 0.007	0.017 ± 0.006	0.016 ± 0.008	0.017 ± 0.007
	Pre	-	0.013 ± 0.004	0.012 ± 0.004	0.013 ± 0.007	-
	Post	-	0.022 ± 0.010	0.018 ± 0.008	0.019 ± 0.008	-
Ratio T/C	Morning	0.065 ± 0.028	0.069 ± 0.044	0.068 ± 0.050	0.096 ± 0.141	0.064 ± 0.037
	Pre	-	0.068 ± 0.063	0.096 ± 0.065	0.104 ± 0.085	-
	Post	-	0.063 ± 0.066	0.043 ± 0.035	0.059 ± 0.058	-
IL1-Beta (pg/mL)	Morning	835.547 ± 646.202	928.133 ± 760.721	815.842 ± 569.373	796.131 ± 641.798	1309.800 ± 837.504
	Pre	-	174.848 ± 136.783	248.275 ± 222.740	209.961 ± 225.692	-
	Post	-	430.706 ± 398.889	493.564 ± 455.784	615.314 ± 474.296	-
Sleep (seconds)	Total Sleep Duration	24890.91 ± 4095.49	25156.36 ± 4227.13	26746.36 ± 2884.91	25344.55 ± 5543.77	24021.82 ± 3258.84
	REM Sleep Duration	3643.64 ± 2133.71	3561.82 ± 1409.75	3957.27 ± 812.60	3820.91 ± 2090.22	3084.55 ± 1769.84
	Light Sleep Duration	11938.18 ± 3794.75	12990.00 ± 4482.83	13415.45 ± 3527.41	12676.36 ± 4994.57	12283.64 ± 4146.50
	Deep Sleep Duration	9309.09 ± 2315.14	8604.55 ± 1295.49	9373.64 ± 2200.10	8847.27 ± 1821.10	8653.64 ± 2342.09
	Sleep Latency	473.64 ± 289.52	526.36 ± 303.69	790.91 ± 636.15	668.18 ± 693.52	837.27 ± 794.23
CSAI-2R (a.u)	Somatic anxiety	9.42 ± 11.21	10.30 ± 11.06	10.30 ± 10.48	9.97 ± 11.20	-
	Cognitive anxiety	8.79 ± 13.54	10.09 ± 11.74	9.58 ± 12.58	8.30 ± 11.88	-
	Self-confidence	13.45 ± 9.22	12.24 ± 8.56	12.39 ± 9.60	12.15 ± 8.86	-
Performance (seconds)	Time	-	55.71 ± 4.19	55.78 ± 4.09	55.57 ± 4.34	-
Lactatemia	Pre	1.4 ± 0.6	1.7 ± 0.5	1.7 ± 0.5	1.7 ± 0.4	-
	Post 3min	-	20.0 ± 3.8	19.8 ± 2.9	19.7 ± 1.4	-
	Post 6min	-	19.1 ± 2.7	19.0 ± 0.8	18.8 ± 2.2	-

B		RELAX				
		Pre-Test (D1 to D3)	Test : Heats (D4)	Test : Semi-Final (D5)	Test : Final (D6)	Post-Test (D7 to D8)
HRV	RMSSD	88.77 ± 37.29	97.61 ± 24.14	75.08 ± 35.50	79.33 ± 37.72	72.95 ± 35.22
	HR	55.17 ± 9.66	52.71 ± 8.60	57.31 ± 7.39	56.83 ± 12.73	55.97 ± 8.32
Alpha-amylase (U/mL)	Morning	47.759 ± 18.393	58.588 ± 18.010	46.523 ± 22.520	55.822 ± 29.517	51.317 ± 26.598
	Pre	-	181.271 ± 97.518	212.089 ± 106.479	164.025 ± 90.457	-
	Post	-	264.100 ± 87.989	280.336 ± 82.045	236.564 ± 61.877	-
Cortisol (µg/d)	Morning	0.364 ± 0.147	0.375 ± 0.202	0.315 ± 0.140	0.332 ± 0.135	0.332 ± 0.137
	Pre	-	0.249 ± 0.239	0.199 ± 0.096	0.235 ± 0.078	-
	Post	-	0.641 ± 0.377	0.587 ± 0.371	0.502 ± 0.248	-
Testosterone (µg/dL)	Morning	0.025 ± 0.014	0.025 ± 0.014	0.021 ± 0.012	0.021 ± 0.013	0.018 ± 0.012
	Pre	-	0.017 ± 0.008	0.017 ± 0.008	0.018 ± 0.009	-
	Post	-	0.024 ± 0.014	0.023 ± 0.011	0.026 ± 0.013	-
Ratio T/C	Morning	0.084 ± 0.054	0.079 ± 0.044	0.074 ± 0.055	0.081 ± 0.057	0.052 ± 0.035
	Pre	-	0.121 ± 0.109	0.134 ± 0.121	0.126 ± 0.132	-
	Post	-	0.041 ± 0.040	0.045 ± 0.028	0.076 ± 0.085	-
IL1-Beta (pg/mL)	Morning	949.190 ± 597.011	1315.445 ± 848.265	1239.753 ± 901.914	785.930 ± 409.890	1116.250 ± 837.102
	Pre	-	321.798 ± 333.492	335.218 ± 207.184	293.569 ± 191.630	-
	Post	-	506.478 ± 442.382	506.827 ± 525.667	507.536 ± 458.236	-
Sleep (seconds)	Total Sleep Duration	24555.18 ± 4696.96	27960.00 ± 3684.09	25533.00 ± 3426.79	25830.00 ± 3050.72	24174.00 ± 5221.18
	REM Sleep Duration	4102.73 ± 2051.49	4742.73 ± 2286.32	4176.00 ± 1861.76	3965.45 ± 1962.60	4134.00 ± 2351.97
	Light Sleep Duration	11680.27 ± 2601.05	13396.36 ± 3144.09	11841.00 ± 2924.01	12755.45 ± 1692.69	12084.87 ± 3616.90
	Deep Sleep Duration	8772.18 ± 2391.34	9820.91 ± 2584.85	9516.94 ± 2325.89	9109.10 ± 2148.48	7956.28 ± 2462.92
	Sleep Latency	650.82 ± 503.65	695.45 ± 05.97	402.43 ± 222.80	545.45 ± 441.28	741.53 ± 706.41
CSAI-2R (a.u)	Somatic anxiety	8.78 ± 11.49	10.58 ± 10.50	9.76 ± 11.32	9.55 ± 10.68	-
	Cognitive anxiety	8.39 ± 12.69	9.52 ± 11.96	9.33 ± 11.88	8.97 ± 11.77	-
	Self-confidence	14.15 ± 8.41	13.79 ± 8.45	13.18 ± 8.85	14.00 ± 8.61	-
Performance (seconds)	Time	-	54.58 ± 6.85	54.35 ± 6.65	54.42 ± 6.65	-
Lactatemia (mmol/L-1)	Pre	1.5 ± 0.3	1.6 ± 0.4	1.6 ± 0.4	1.7 ± 0.5	-
	Post 3min	-	20.1 ± 2.1	19.3 ± 1.3	19.3 ± 1.4	-
	Post 6min	-	18.4 ± 2.1	17.9 ± 3.0	17.6 ± 2.3	-

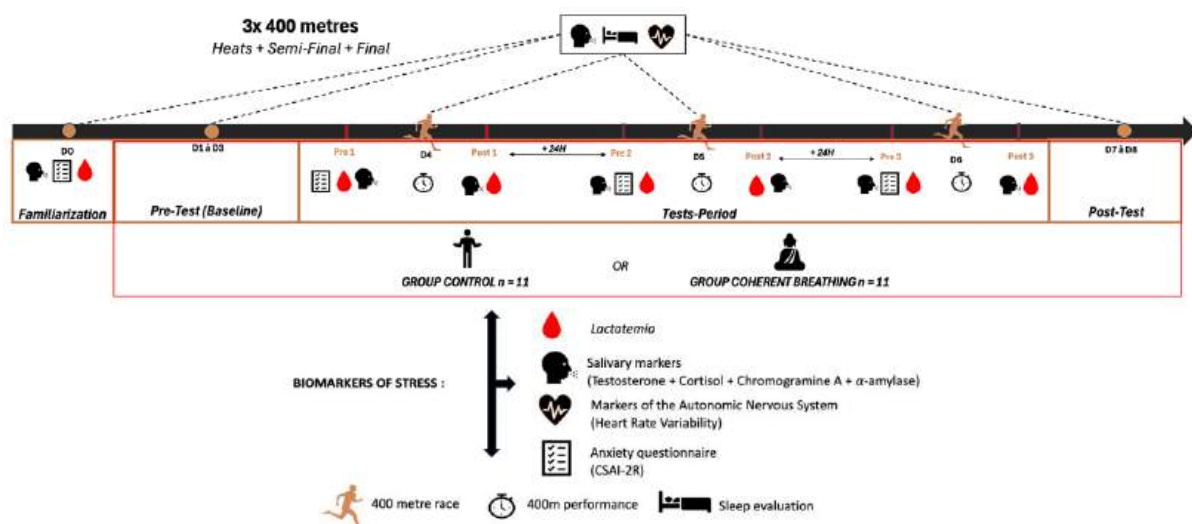


Figure 1: Experimental design of the protocol during the simulated competition. ANS markers, salivary biomarkers, and sleep data were collected throughout the protocol. Blood lactate levels and salivary biomarkers were measured before and after each 400m race during the testing period. The CSAI-2R was realized during the familiarization day as well as before each 400m race during the testing period.

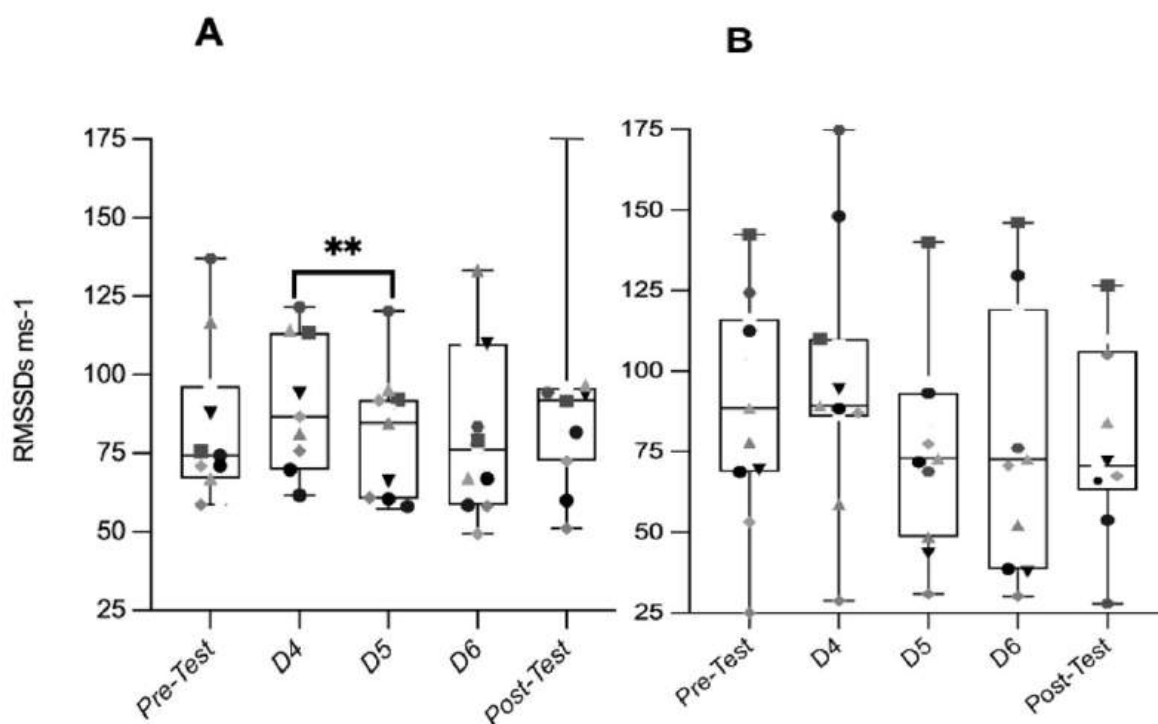


Figure 2: Evolution of the root mean square of successive differences (RMSSD) in the supine position obtained following an orthostatic test each morning of the protocol, with individual data for the CONT group (A) and the RELAX group (B). ** indicates a significant difference at $P < 0.01$.

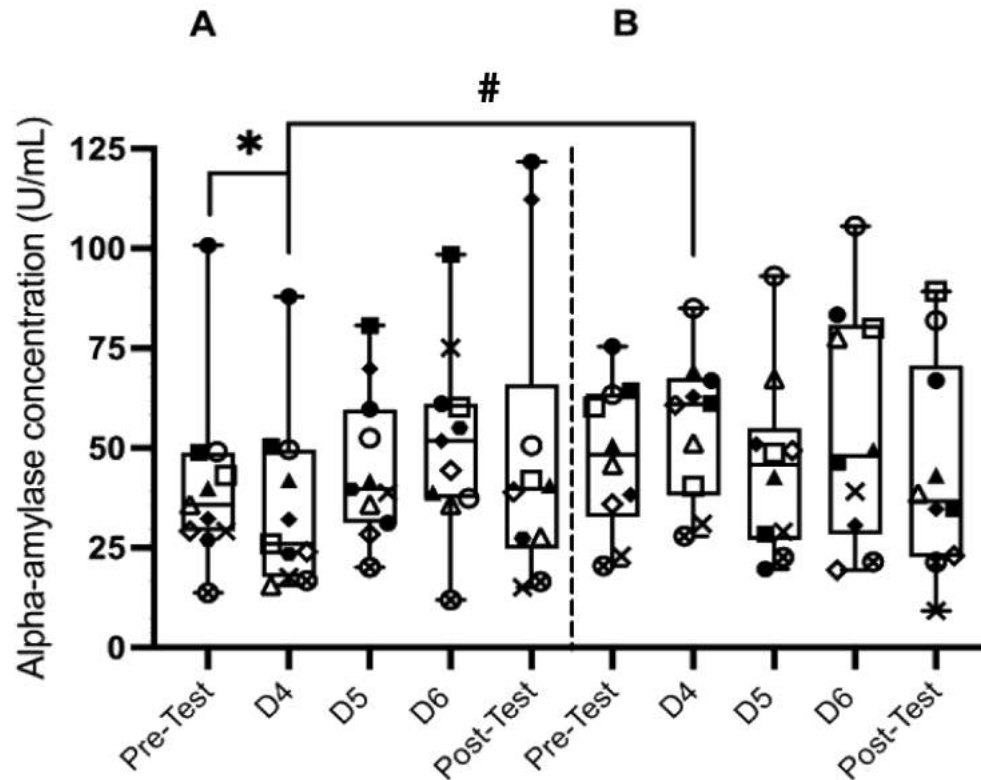


Figure 3: Evolution of salivary alpha-amylase each morning of the protocol, with individual data for the CONT group (A) and the RELAX group (B).
 * indicates a significant difference at $P < 0.05$
 # indicates a significant difference between the two conditions at $P < 0.05$

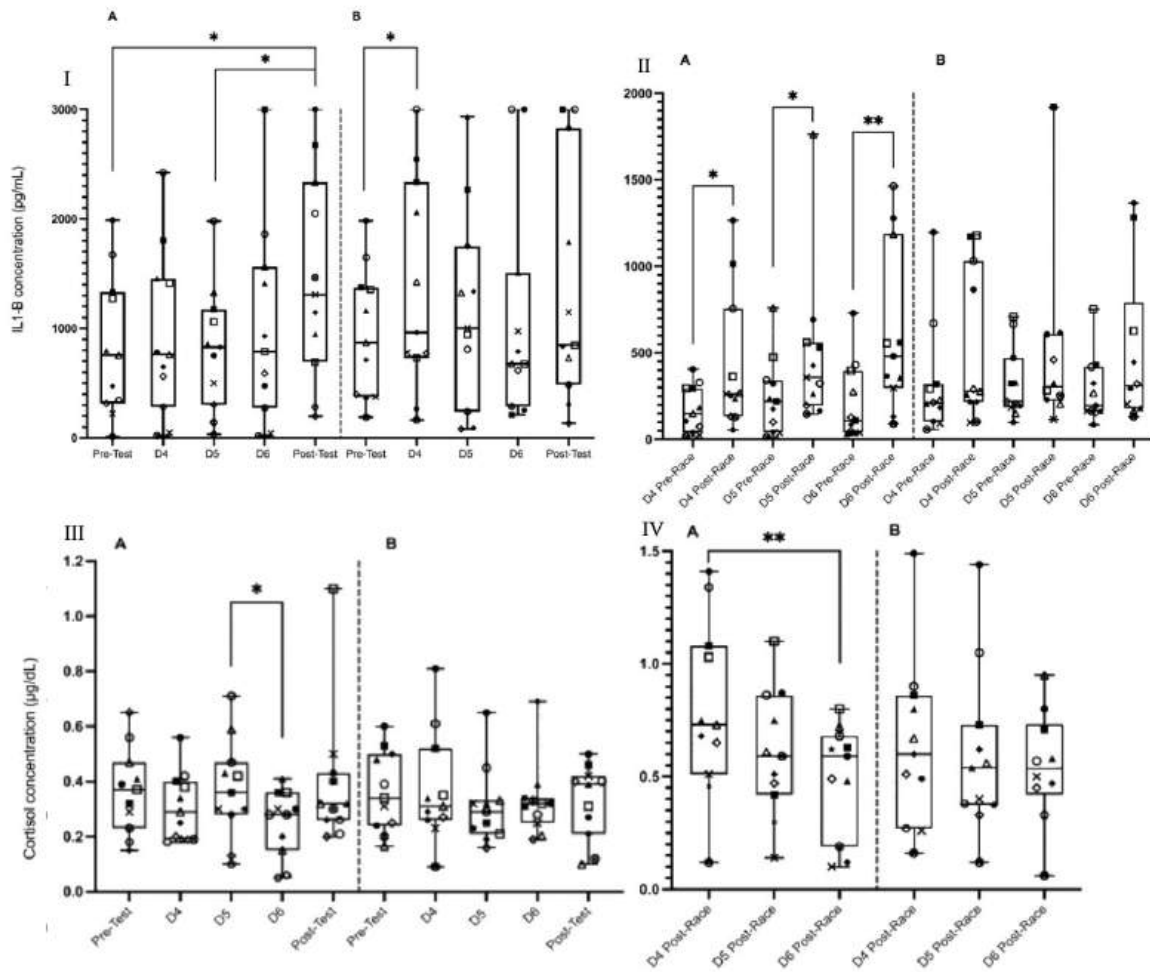


Figure 4: Measurements of IL1- β and salivary cortisol with individual data for the CONT group (A) and the RELAX group (B).

Fig. 4I and Fig. 4III: Evolution of IL1- β and salivary cortisol each morning of the protocol.
Fig. 4II and Fig. 4IV: Evolution of IL1- β and salivary cortisol Pre-Race and Post-Race each day of the testing period.

* indicates a significant difference at $P < 0.05$

** indicates a significant difference at $P < 0.01$.

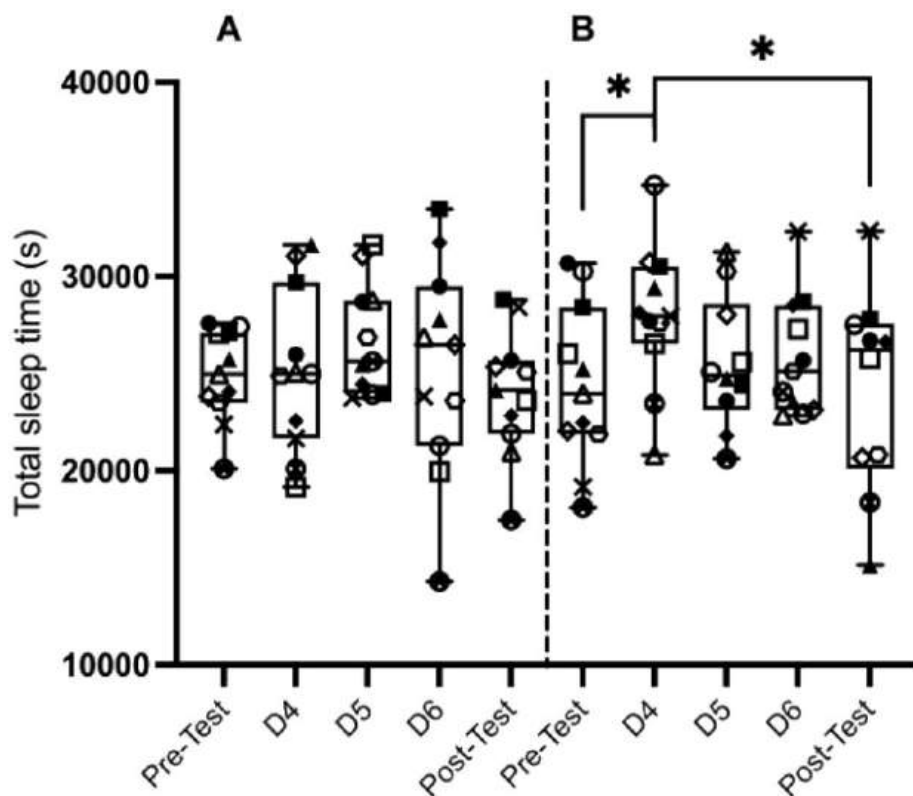


Figure 5: Evolution of Total Sleep Time each night of the protocol, with individual data for the CONT group (A) and the RELAX group (B).

* indicates a significant difference at $P < 0.05$

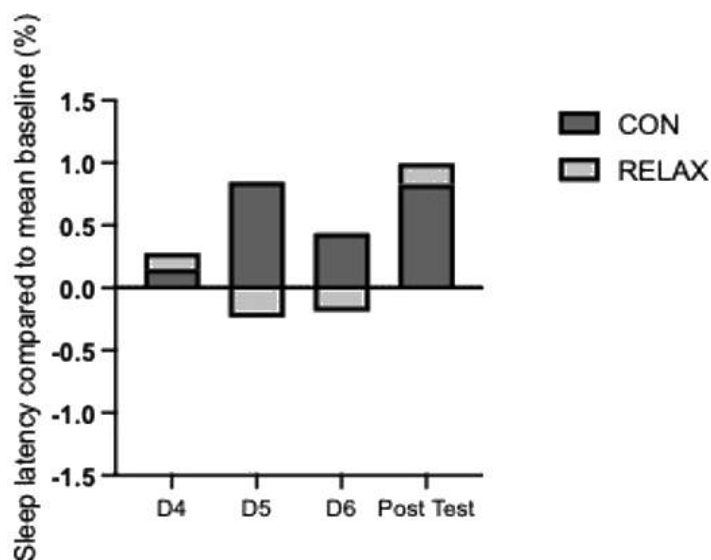


Figure 6: Evolution of sleep latency as a percentage (%) relative to baseline and each night of the protocol for the CONT group and the RELAX group.

ÉTUDE 4 - INFLUENCE DE LA CONSOMMATION D'EAU RICHE EN BICARBONATE COMBINÉE À UN RÉGIME ALIMENTAIRE ALCALINISANT OU ACIDIFIANT SUR L'ÉQUILIBRE ACIDO-BASIQUE ET LA PERFORMANCE ANAÉROBIE

Publication associée : **Chiron, F.**, Thomas, C., Bardin, J., Mullie, F., Bennett, S., Chéradame, J., Caliz, L., Hanon, C., & Tiollier, E. (2024). Influence of Ingestion of Bicarbonate-Rich Water Combined with an Alkalizing or Acidizing Diet on Acid-Base Balance and Anaerobic Performance. *Journal of Human Kinetics*, 93.

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE 4

Cette étude s'est intéressée aux effets d'une stratégie nutritionnelle combinant un régime alimentaire alcalinisant et la consommation d'eau riche en bicarbonate sur l'équilibre acido-basique et la performance anaérobie lors d'exercices à haute-intensité. Cette stratégie visait à optimiser la capacité tampon des athlètes pour mieux résister aux effets de l'acidose métabolique, fréquente lors d'efforts intenses et prolongés.

24 athlètes récréatifs, ont suivi pendant quatre semaines un régime soit alcalinisant, soit acidifiant. Le régime alcalinisant était riche en fruits et légumes, réputés pour leur faible charge acide potentielle rénale (PRAL), un indicateur des effets acidifiants ou alcalinisants des aliments (Remer et Manz, 1995). Parallèlement, les athlètes ont consommé quotidiennement 1,5 à 2 litres d'eau bicarbonatée (contenant 4368 mg/L de HCO_3^-) ou de l'eau placebo dans un protocole en double aveugle. Cette consommation visait à fournir un apport quotidien stable de bicarbonate, connu pour augmenter le pH sanguin et améliorer l'équilibre acido-basique.

Les résultats de cette étude ont mis en évidence, indépendamment du type d'alimentation, une augmentation significative du pH urinaire après la consommation d'une eau riche en bicarbonate (STY) en comparaison à l'eau placebo (PLA) (J3 : $7,06 \pm 0,50$ (STY) vs. $6,14 \pm 0,46$ (PLA), $p < 0,01$; J6 : $7,02 \pm 0,51$ (STY) vs. $6,28 \pm 0,49$ (PLA), $p < 0,01$). Le pic de lactate sanguin était significativement plus élevé pour les sujets ayant consommés l'eau STY en comparaison de l'eau PLA ([La]_{max} : $13,4 \pm 2,44$ mmol/L (STY) vs. $12,45 \pm 2,65$ mmol/L (PLA), $p < 0,05$). Par ailleurs, la concentration de bicarbonate sanguin [HCO_3^-] du groupe STY^{ALK} par rapport à PLA^{ALK} a significativement augmenté après l'échauffement ($p < 0,05$) et directement en post-exercice (+0') ($p < 0,01$). Cependant, ces stratégies nutritionnelles n'ont eu aucun effet significatif sur la performance ($p > 0,05$).

Cette approche nutritionnelle pourrait donc offrir un soutien important aux athlètes soumis à une alimentation acidifiante riche en protéines animales, souvent adoptée pour ses effets bénéfiques sur la masse musculaire mais qui peut augmenter le risque d'acidose chronique. Les résultats de cette étude indiquent donc que la consommation régulière d'eau bicarbonatée pourrait atténuer les effets négatifs d'un tel régime acidifiant, en maintenant un équilibre acido-basique plus favorable et en réduisant le risque de fatigue prématurée ou de baisse de performance.

Ainsi, cette étude met en évidence l'intérêt d'une stratégie combinant alimentation alcalinisante et eau riche en bicarbonate pour améliorer la capacité tampon et réduire les effets délétères de l'acidose. Bien que l'impact direct sur la performance anaérobie ne soit pas significatif, cette stratégie pourrait offrir un avantage en termes de récupération et de régulation acido-basique, particulièrement pour les athlètes exposés à des régimes acidifiants. Ces résultats encouragent de futures recherches sur l'optimisation de l'apport en bicarbonate dans des contextes d'exercices répétés et prolongés, où l'effet tampon pourrait être crucial pour le maintien de la performance.

Influence of Ingestion of Bicarbonate-Rich Water Combined with an Alkalizing or Acidizing Diet on Acid-Base Balance and Anaerobic Performance

by

François Chiron ^{1,2,*}, Claire Thomas ^{1,3}, Joffrey Bardin ³, Florence Mullie ⁴,
Samuel Bennett ⁵, Jérémy Chéradame ⁴, Laurine Caliz ³, Christine Hanon ^{2,3},
Eve Tiollier ³

During high-intensity (HI) exercise, metabolic acidosis significantly impairs exercise performance. Increasing the body's buffering capacity through training and exogenous intake of alkalizing supplements may improve high-intensity performance. Manipulating water and diet intake may influence the acid-base balance. The aim of this study was to determine the effects of mineral water rich in bicarbonate ions (STY) or placebo water (PLA) on circulating biomarkers and anaerobic performance and to verify whether alkalizing (ALK) or acidizing (ACI) diet would modulate these effects. Twenty-four athletes, assigned either to ALK (n = 12) or ACI (n = 12) diet for four weeks, completed a 1-min rowing Wingate Test in a double-blind and randomized trial after one week of daily hydration (1.5 to 2L/d) with either STY or PLA. Blood samples were taken before and after each test, and urine samples were collected each week. Chronic consumption of bicarbonate-rich water significantly impacted resting urinary pH irrespective of alkalizing or acidizing dietary intake. STY induced a significant increase in blood pH, lactate, and HCO₃⁻ ion concentration post-exercise compared to PLA. Similar changes were observed when STY was associated with the ALK diet. In contrast, STY combined with the ACI diet only significantly affected urine pH and peak blood lactate compared to PLA (p < 0.05). No effect of bicarbonate-rich water was reported on anaerobic performance (p > 0.05). Our results suggest that consumption of bicarbonate-rich water alters acid-base balance during a warm-up and after HI exercise, could potentiate beneficial effects of an alkalizing diet on the acid-base balance after HI exercise, and reduces the acid load induced by an acidifying diet.

Keywords: high intensity exercise; anaerobic capacity; metabolic acidosis; HCO₃⁻ supplementation

Introduction

During explosive, high-intensity exercise, performance success is determined by an athlete's ability to maintain a maximal effort ranging from few seconds to a few minutes in duration (Hanon et al., 2019). During high-intensity (HI) exercise, glycolysis contributes significantly to energy production, inducing disturbances in acid-base balance, particularly a decrease in muscle and blood pH and hyperlactatemia. Since metabolic

acidosis limits the maintenance of physical activity and performance (Millet et al., 2004), increasing the buffer capacity could enhance HI anaerobic performance and reduce blood metabolic disturbances. This can be achieved either through training (Edge et al., 2006) or by the exogenous supply of buffering agents both acutely (Lancha Junior et al., 2015) and chronically (Chycki et al., 2018). One of the most popular buffering agents is sodium bicarbonate, which has been investigated

¹ LBEPS, Univ Evry, IRBA, Université de Paris-Saclay, Evry, France.

² French Federation of Athletics (FFA), Paris, France.

³ Laboratory of Sport, Expertise and Performance (SEP), French National Institute of Sport (INSEP), Paris, France.

⁴ French Federation of Rugby (FFR), Marcoussis, France.

⁵ Research Institute for Sport and Exercise Science (RISES), Liverpool John Moores University, Liverpool, United Kingdom.

* Correspondence: francois.chiron49@gmail.com

in numerous studies (Grgic et al., 2021). The bicarbonate is typically provided via supplement with potential side effects, especially gastrointestinal distress. Nonetheless, it is important to note that some athletes may be unable to tolerate direct bicarbonate supplementation, as it can lead to gastrointestinal issues (McNaughton et al., 2016; Ragone et al., 2020). Certain coaches and athletes may not be inclined to embrace the concept of enhancing their buffering capacity through methods like bicarbonate supplementation. The enhancement of buffering capacity through a strategy perceived as more natural might receive approval within the sporting community. There is limited research examining supplementation through the regular consumption of naturally occurring water rich in bicarbonate ions (HCO_3^-). Chronic intake (1 week) of mineral water with a pH of around 6 and a concentration of HCO_3^- ions around 1000 mg/L has been shown to have either no effect (Chycki et al., 2017) or increase urinary pH (Brancaccio et al., 2012; Halz et al., 2022), after HI exercise. The lowest intake (1.5 L/day of water containing 981 mg/L of HCO_3^-) resulted in increased urine pH (Brancaccio et al., 2012), whereas the highest intake (4–4.5 L/day of water containing 1300 mg/L of HCO_3^-) did not (Chycki et al., 2017). An explanation could be the timing between the water ingestion and the urine collection. The urine pH was elevated when the water was ingested during the hours before urine collection (Brancaccio et al., 2012), suggesting that the observed effect might be due to acute administration rather than a chronic adaptation. Although those studies include exercise, performance was not measured, and blood markers of acid-base balance were poorly reported.

Consumption of water containing a high bicarbonate content (4368 mg/L) has favored a rapid restoration of acid-base balance after aerobic exercise and permitted greater residual strength following an isokinetic test (Rieux and Duvallet, 2000). In this study, bicarbonate-rich water was not ingested chronically as previously reported (Brancaccio et al., 2012; Chycki et al., 2017), but only on the day of testing (2 h before exercise until immediately before the last test). Altogether, the few data available highlighted the need for further studies regarding the effect of chronic bicarbonate-rich water intake on acid-base balance and anaerobic performance. It has been suggested that

the ingestion of bicarbonate-rich water alongside an alkalizing diet may provide a novel nutritional strategy to influence acid-base balance (Limmer et al., 2018; Remer and Manz, 1995) and improve anaerobic performance (Limmer et al., 2018; Steffl et al., 2021). Combining bicarbonate-rich water with an alkalizing diet could enhance the benefits of increasing buffering capacity and potentially lead to improved performance. In contrast, when combined with an acidifying diet, bicarbonate-rich water may mitigate the negative effects of such a dietary pattern. This approach may offer a solution for athletes who prefer acid-forming foods like meat while minimizing the potential drawbacks of such a diet. As such, evaluating how the diet may modulate the effect of bicarbonate-rich water chronic ingestion on exercise performance warrants investigation.

The present study, therefore, aimed to investigate whether the consumption of bicarbonate-rich water combined with an alkalizing diet could provide an additional buffering effect, potentially delaying the effects of metabolic acidosis and improving performance. We also hypothesized that the consumption of bicarbonate-rich water could mitigate the acid load induced by the acidifying diet, particularly in terms of urinary and blood pH.

Methods

Participants

Twenty-four recreationally active men (29 ± 8.8 years, 1.79 ± 0.50 m, 81.8 ± 11.6 kg, $\text{VO}_{2\text{max}}$ 55.6 ± 9.0 ml/min/kg) volunteered to participate in this study. All participants were informed of the study protocol, their rights, and the associated risks of the intervention before providing written informed consent. All procedures were approved by the committee CERSTAPS (approval No. 2022-A00644-39; approval date: 01 January 2020) and conducted in line with the Declaration of Helsinki (1964, revised 2001). Participants were excluded from the study if they could not follow dietary and hydration recommendations or upon the occurrence of any injury or unusual fatigue during the 4-week protocol that could cause a decrease in performance during the supramaximal test.

Experimental Design

Participants performed two pre-visits (pre-visit 1: consent signature, nutritional interview,

urine samples; pre-visit 2: urine and blood samples, rowing maximal test familiarization) (Figure 1). Afterward, participants were assigned to a dietary group at random sampling, either an alkalizing (ALK, $n = 12$) or an acidizing (ACI, $n = 12$) diet. A daily check was conducted between our nutritionist and participants to ensure that they were adhering to the nutritional guidelines required by their respective groups. During weeks 2 and 4, participants were instructed to drink 1.5 L to 2 L of either bicarbonate-rich water (STY) or placebo water (PLA) in a cross-over, double-blind, and randomized design as part of their daily hydration. At the end of weeks 2 and 4, a supra-maximal test consisting of a 1 min rowing Wingate Test (1-AO) was completed, with blood biomarkers measured under each condition (STY or PLA).

Experimental Water

In both weeks 2 and 4, in a double-blind and randomized fashion, participants were instructed to drink 1.5 to 2 L per day of either bicarbonate-rich or placebo water (Table 1) during the first six days of the week. Four bottles of 500 mL were provided daily to each participant. St Yorre water (STY) (Vichy St Yorre, Sources Alma, La Ferrière Bochart, France) is a naturally carbonated water rich in minerals (4774 mg/L containing 4368 mg of HCO_3^- ions). The low-bicarbonate water, as placebo (PLA), was provided to participants in identical bottles to STY, but contained regular carbonated water with considerably lower mineral content (Table 1). Habitual hydration was resumed during weeks 1 and 3.

Dietary Group

Next to a nutritional interview, participants were assigned at random sampling alkalizing or acidizing diet. To maintain single-blind dietary strategies during the protocol, the diet was presented as a vegetarian- or meat-prone diet. Each participant was given detailed written nutritional guidelines and meal plans for the duration of the study. The ALK diet was based on a vegetarian-prone diet (Caciano et al., 2015; Limmer et al., 2018). Participants were required to consume a minimum of three portions of vegetables and four portions of fruit daily. Dairy products (including yogurt, fresh cheese, curd, and milk) and potatoes were permitted.

Conversely, participants were prohibited from consuming meat, fish, and cheese besides fresh cheese and non-whole meal starchy foods. In contrast, the ACI diet was based on a meat-prone diet (Caciano et al., 2015; Limmer et al., 2018). Participants consumed three portions of animal protein (meat, fish, or eggs), three portions of starch, and three portions of dairy including at least one portion of cheese and were required to avoid consuming any bean, vegetable or fruit.

During the entire protocol, a trained dietician monitored dietary intake via a written food diary and accompanying photographs of meals to ensure that participants followed the recommendations. Moreover, the Potential Renal Acid Load (PRAL) (Remer and Manz, 1995) was calculated to verify the characteristic of either the alkalizing or the acidizing diet. The goal for the alkaline-trending diet group (ALK) was to achieve a dietary $\text{PRAL} \leq -1 \text{ mEq/d}$, and for the acid-trending group (ACI), a $\text{PRAL} \geq 15 \text{ mEq/d}$ (Peter et al., 2010).

Data Collection

Urine Analysis

During the 6th day of weeks 2 and 4, participants completed a 24-h urine collection. Urinary pH was assessed using a pH probe (914, Metrohm, Switzerland).

On day 7 of each week, participants reported to the laboratory having consumed the same dietary intake for the 24 h before each visit.

1-AO Test

In the week before the commencement of the study, participants completed a 1-AO which served as a familiarization for the upcoming trials. Participants performed a 10-min, self-paced warm-up (replicated between trials) followed by a maximal 1-AO on a rowing machine (PM5, Concept2, USA) with instructions to complete an “all-out” effort and not to be concerned about pacing strategies. Performance was assessed as maximum (P_{max}) and average (P_{mean}) power output in absolute (W) or relative to body weight (W/kg) values. Perception of effort (RPE) and the fatigue index in the last 10 s of the test ($\text{IDF } 50-60 = [P_{\text{mean}} 50-60 - P_{\text{max}}] / P_{\text{max}}$) were also determined.

Blood Acid-Base Status

Blood biomarkers, including blood lactate

concentration ($[La]$), blood HCO_3^- concentration ($[HCO_3^-]$), and blood pH, were measured to determine acid-base regulation weekly (day 7) via earlobe-prick samples (20 μ L) after the warm-up, immediately after exercise (+0'), then 3 (+3'), 5 (+5'), and 8 (+8') minutes (passive recovery) following the 1-AO. Samples were analyzed via blood gas and electrolyte analyzer (i-STAT, Abbott, USA).

Statistical Analyses

Statistical analyses were performed with RStudio software (version 3.5.0, Inc. Boston, MA, USA). To assess the effect of water (STY vs. PLA) on acid-base balance and performance, we applied a linear mixed model on the whole population with water as a fixed effect. The model was adjusted for the dietary group as the dietary group was also included as a fixed effect.

After that, two mixed models were created, one for each dietary group, to evaluate to what extent diet modulated the effect of water intake. Within each model, water intake was maintained as the fixed effect, and the random effect was the subject (STY^{ALK} vs. PLA^{ALK} and STY^{ACI} vs. PLA^{ACI}). The variables studied were biomarkers of acid-base balance and performance. The characterization of the diet as either acidizing or alkalizing was assessed against the PRAL of the diet. Comparison of PRAL was assessed with Student's *t* tests either for paired data (STY^{ACI} vs. PLA^{ACI} and STY^{ALK} vs. PLA^{ALK}) or independent groups (ACI vs. ALK). The normality of data was checked via the Shapiro-Wilk test before using this parametric test.

The results are presented as means $\pm$ standard deviations. The coefficient of the model represents the mean difference when placed in a condition relative to the reference condition in the unit of measurement of the variable studied. A difference was considered significant at $p < 0.05$. Cohen's *d* was calculated, enabling us to categorize the magnitude of the error of estimation as large (0.8), moderate (0.5–0.8), or small (0.5) and to facilitate a more in-depth discussion of our results (Rosenthal and al., 1994).

Results

Water Consumption and Bicarbonate Intake

The mean daily volume of water ingestion was 1919 ± 65 mL and 1842 ± 34 mL, with a corresponding bicarbonate ion content of $8381 \pm$

539 mg and 564 ± 39 mg for STY and PLA, respectively. The resultant relative sodium bicarbonate intake (given that 1 g of sodium bicarbonate contains 726 mg of bicarbonate) was calculated to be 146 ± 22 mg/kg/day and 10 ± 2 mg/kg/day for STY and PLA, respectively.

PRAL of Dietary Groups

The mean PRAL of ACI and ALK groups was significantly different (ACI: 49 ± 13 mEq/d vs. ALK: -13 ± 14 mEq/d, $p < 0.001$). The mean PRAL of the ALK group was within the fixed range for alkalizing diet (PRAL < 1 mEq/d) and was not different between STY^{ALK} and PLA^{ALK} conditions (STY^{ALK}: -12 ± 9 mEq/d PLA^{ALK}: -14 ± 18 mEq/d, $p = 0.81$).

The mean PRAL of the ACI group was within the fixed range for acidizing diet (PRAL > 15 mEq/d) and was not different between STY^{ACI} and PLA^{ACI} conditions (STY^{ACI}: 51 ± 9 mEq/d vs. PLA^{ACI}: 47 ± 15 mEq/d, $p = 0.29$).

Performance

There was no statistical difference in performance variables during the 1-minute supra-maximal test between STY and PLA water groups.

Absolute P_{max} , absolute P_{mean} , relative P_{mean} (w/kg), P_{max} , the fatigue index, and the RPE were not significantly different between the alkaline diet combined with placebo water and the alkaline diet combined with bicarbonate-rich water ($d = -0.14, -0.09, -0.15, -0.05, -0.07, -0.27$, respectively); and between the acidic diet associated with placebo water and the acidic diet associated with bicarbonate-rich water ($d = -0.33, 0.14, -0.36, 0.18, -0.28, 0.14, -0.31$, respectively).

Biomarkers of Acid-Base Balance

Urinary markers

Urinary pH was significantly higher following the consumption of bicarbonate-rich water (STY) compared to placebo water (PLA) after 3 (STY: 7.06 ± 0.50 vs. PLA: 6.14 ± 0.46 ; $p = 0.01$; $d = 1.92$) and 6 (STY: 7.397 ± 0.3 vs. PLA: 7.387 ± 0.02 , $p = 0.01$; $d = 1.51$) days of consumption.

Urinary pH measured following 24-hour urine collection on the 6th day of water consumption was significantly higher in STY^{ALK} than in PLA^{ALK} (STY^{ALK}: 7.20 ± 0.34 vs. PLA^{ALK}: 6.36 ± 0.54 , $p = 0.01$; $d = 1.93$). It was also significantly higher in STY^{ACI} compared to PLA^{ACI} (STY^{ACI}: 6.86

± 0.60 vs. PLA^{ACI} : 6.19 ± 0.45 , $p = 0.01$; $d = 1.28$) (Figure 2).

Effects of Combined Bicarbonate-Rich Water and Diet

Blood lactate Concentration

Blood lactate concentrations ($[\text{La}]$) were significantly higher in the STY compared to the PLA group during the warm-up and 3, 5, and 8 min after the supramaximal test. Peak blood lactate ($[\text{La}]_{\text{max}}$) was significantly higher in the STY (13.4 ± 2.44 mmol/L) compared to the PLA group (12.45 ± 2.65 mmol/L; $p = 0.035$; $d = 0.37$) (Figure 3).

Blood Lactate

Peak Blood lactate $[\text{La}]$ was significantly higher in the STY^{ALK} compared to the PLA^{ALK} group ($p < 0.01$; $d = 0.51$), as well as after the warm-up and 5 min after the 1-AO during passive recovery ($p = 0.02$; $d = 0.88$ and $p = 0.04$; $d = 0.65$). Regarding ACI, only the peak of $[\text{La}]$ was significantly higher in the STY^{ACI} compared to the PLA^{ACI} group ($p < 0.01$).

Blood pH

Blood pH was significantly higher in the STY than the PLA group immediately following, 3,

and 5 minutes after the supramaximal test (Figure 4).

Blood pH was significantly different for the STY^{ALK} compared to the PLA^{ALK} group directly after 1-AO (+0') ($p < 0.01$, $d = 0.79$) and 5 min post-exercise (+5') ($p = 0.02$, $d = 0.22$). No significant difference was observed in blood pH in the STY^{ACI} compared to the PLA^{ACI} group.

Blood HCO_3^- Concentration

Blood bicarbonate (HCO_3^-) concentrations were not significantly different between STY and PLA groups at any timepoint before or after the 1-min supra-maximal test. Peak blood $[\text{HCO}_3^-]$ was significantly different for the STY^{ALK} compared to the PLA^{ALK} group as well as after the warm-up ($p = 0.02$, $d = 1.01$) and directly after the 1-AO (+0') ($p < 0.01$, $d = 0.58$) (Figure 5). No significant difference was observed for blood $[\text{HCO}_3^-]$ in the STY^{ACI} compared to the PLA^{ACI} group.

Peak blood $[\text{HCO}_3^-]$ was significantly different for the STY^{ALK} group compared to the PLA^{ALK} group, as well as after the warm-up ($p = 0.02$, $d = 1.08$) and directly after the 1-AO (+0') ($p < 0.01$, $d = 0.58$) (Figure 5). No significant difference was observed for blood HCO_3^- concentration in the STY^{ACI} compared to the PLA^{ACI} group.

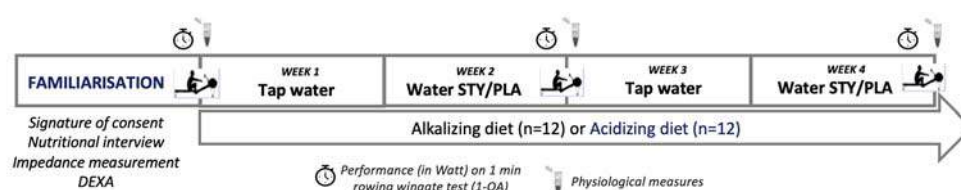


Figure 1. Schematic overview of the study design. During weeks 2 and 4, participants consumed bicarbonate-rich water (STY) or placebo water (PLA) in a cross-over design at a rate of 1.5 to 2 L per day, with habitual hydration resumed during weeks 1 and 3. At the end of each week, a supra-maximal test consisting of a 1-min rowing Wingate test (1-AO) was completed with physiological biomarkers being measured meanwhile. Participants followed also an acidizing ($n = 12$) or an alkalizing ($n = 12$) diet for four weeks.

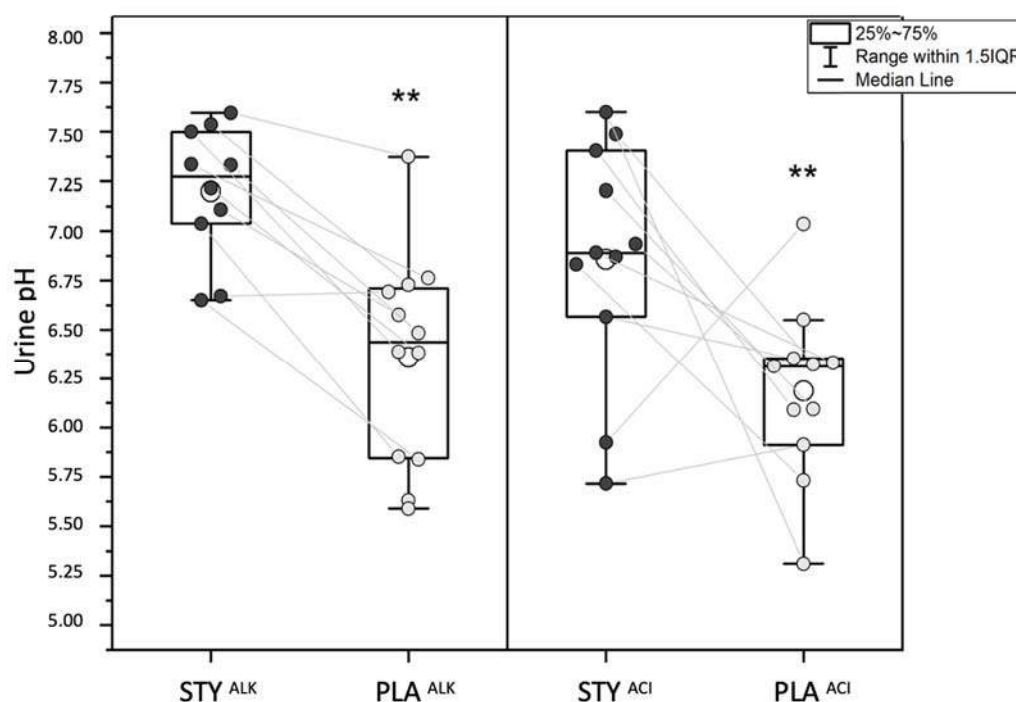


Figure 2. Urinary pH (24-h urine collection on day 6 of the week) after consumption of bicarbonate-rich water (STY) or placebo water (PLA) for 6 days and with an acidizing (ACI) or an alkalizing (ALK) diet. ** Indicates a significant difference with STY ($p < 0.01$).

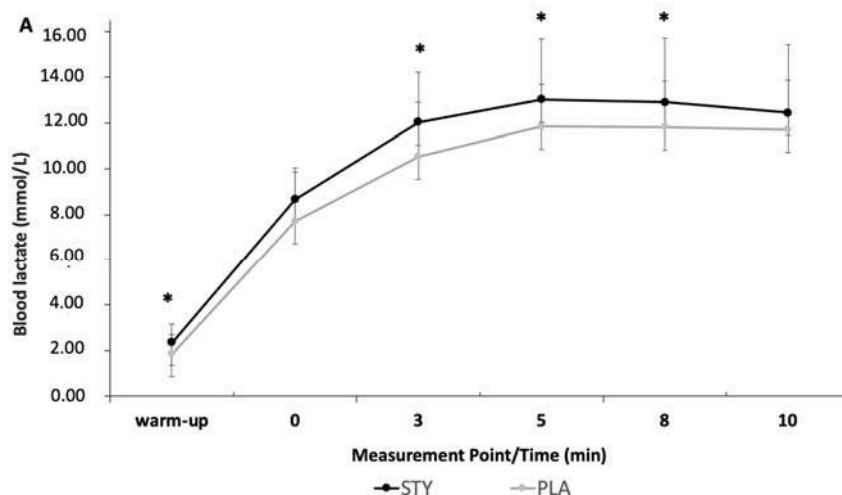


Figure 3. Blood lactate at the end of the 1-min supra-maximal test during passive recovery after consumption of bicarbonate-rich water (STY) or placebo water (PLA) for 1 week. * Indicates a value significantly different from the PLA condition ($p < 0.05$). Warm-up = measurement taken after the 10-min rowing warm-up and before the supra-maximal test; +0 = immediately after the supra-maximal test; +3, +5, +8 and +10: 3, 5, 8 and 10 minutes after the supra-maximal test. The data are presented as means $\pm$ standard deviations.

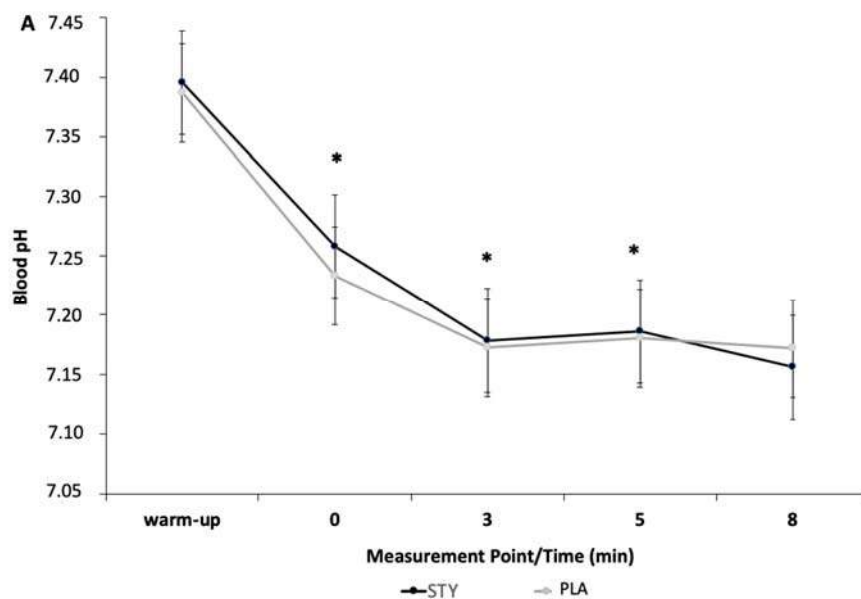


Figure 4. Blood pH after the 1-min supra-maximal test during passive recovery from consumption of bicarbonate-rich water (STY) or placebo water (PLA) for 1. * indicates a significantly different value ($p < 0.05$) of PLA. Warm-up = measurement taken after the 10-min rowing warm-up and before the supra-maximal test; +0' = immediately after the supra-maximal test; +3, +5 and +8: 3, 5 and 8 min after the supra-maximal test. The data are presented as means $\pm$ standard deviations.

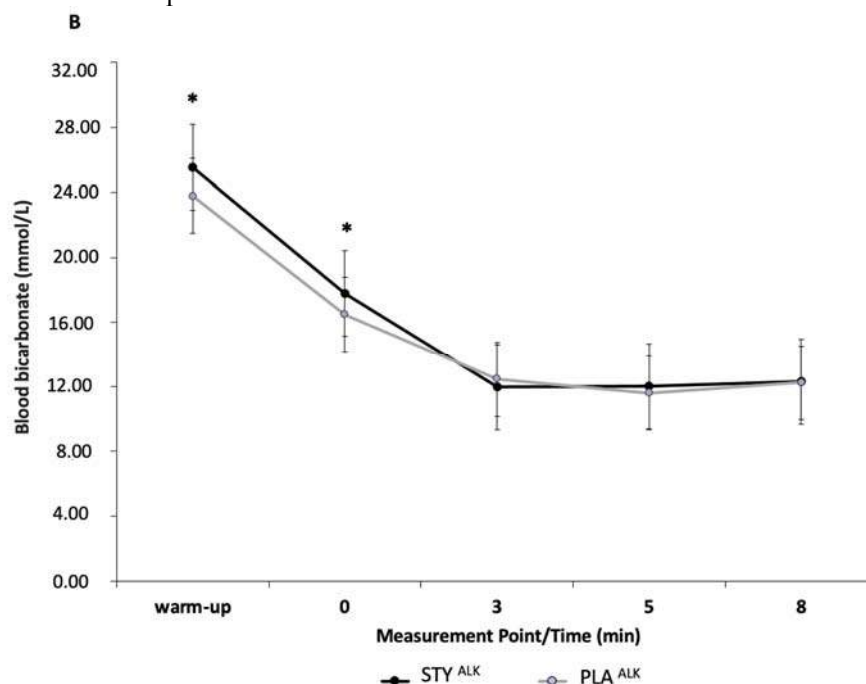


Figure 5. Blood bicarbonate concentration ($[\text{HCO}_3^-]$) at the end of the 1-min supra-maximal test during passive recovery from consumption of bicarbonate ion-rich water (STY^{ALK}) or placebo water (PLA^{ALK}) for 1 week in combination with an alkalizing diet. * Indicates a significantly different value ($p < 0.05$) of PLA. Warm-up = measurement taken after the 10-minute rowing warm-up and before the supra-maximal test; +0' = measurement taken immediately after the supra-maximal test; +3, +5 and +8: measurements taken 3, 5 and 8 min after the supra-maximal test. The data are presented as means $\pm$ standard deviations.

Table 1. Composition of St Yorre water and Placebo water.

	St Yorre (STY)	Placebo (PLA)
Calcium (mg·L ⁻¹)	90	93
Magnesium (mg·L ⁻¹)	11	8.1
Sodium (mg·L ⁻¹)	1708	8.8
Potassium (mg·L ⁻¹)	110	2.6
Silica (mg·L ⁻¹)	16	19
Bicarbonate (mg·L ⁻¹)	4368	306
Chloride (mg·L ⁻¹)	322	18
Sulphate (mg·L ⁻¹)	174	7.5
Nitrates (mg·L ⁻¹)	2.5	2
Fluorine (mg·L ⁻¹)	1	0.35
pH	6.6	5.4
Sodium Bicarbonate Equivalent (mg·L ⁻¹)	6015	-
Sodium Chloride Equivalent (mg·L ⁻¹)	528	-

Discussion

This study was the first to investigate the influence of chronic bicarbonate supplementation via the consumption of water naturally rich in bicarbonate ions on the regulation of acid-base balance and anaerobic performance. Furthermore, to determine whether alkalizing or acidizing diets could modulate the effect of bicarbonate-rich water, we subdivided our population into two groups. We reported that the consumption of naturally carbonated bicarbonate ion-rich water induced a significant increase in urine pH compared to regular carbonated water ($p < 0.05$), irrespective of the diet. Furthermore, despite no water or the diet type effect on anaerobic performance, peak blood lactate concentration during recovery was elevated following bicarbonate-rich water consumption compared to regular carbonated water. Additionally, blood lactate concentration increased comparably in both dietary groups ($p < 0.05$) following bicarbonate-rich water consumption. Post-exercise blood pH was significantly increased with the consumption of bicarbonate-rich water. This effect was maintained following the consumption of an alkalizing diet,

whereas it was not with the acidizing diet. Lastly, consuming bicarbonate-rich water alongside an alkalizing diet conferred an additional buffering effect on blood bicarbonate concentration after exercise ($p < 0.05$).

Consistent with the work of Heil et al. (2010), we observed a significant increase in 24-h urine pH after 3 (STY: 7.06 ± 0.50 ; PLA: 6.14 ± 0.46 ; $p = 0.01$) and 6 days (STY: 7.02 ± 0.51 ; PLA: 6.28 ± 0.49 ; $p = 0.01$) of consumption of mineral water rich in bicarbonate ions in comparison to PLA ($p < 0.01$). Heil et al. (2010) similarly evaluated the impact of alkaline water consumption on acid-base balance and hydration status. However, we reported a faster and more marked effect of bicarbonate ion-rich water consumption on urinary pH, which modified the circulating acid-base balance. Moreover, the alkalinizing effect of bicarbonate-rich water on the urine pH was further altered when combined with alkalizing and acidizing diets. The consumption of bicarbonate-rich water compensated for the acidizing diet-induced acid load on the acid-base balance.

Although no effect of water and the diet type was reported on anaerobic performance, we

observed in STY, STY^{ALK}, and STY^{ACI} significantly higher values of peak blood lactate concentration after 1-AO compared to PLA, PLA^{ALK}, and PLA^{ACI}. We also observed in STY, and STY^{ALK} significantly higher values of blood lactate, and pH, after 1-AO compared to PLA and PLA^{ALK}. Furthermore, HCO₃⁻ concentration was augmented when bicarbonate-rich water consumption was combined with an alkalizing diet, characteristic of bicarbonate supplementation (Carr et al., 2011). Indeed, changes in these blood biomarkers, indicative of acid-base balance, have previously been reported following three weeks of alkaline water intake (Chycki et al., 2018), following the consumption of bicarbonate-rich water during aerobic exercise (Rieux and Duvallet, 2000), and following four days of an alkaline diet (Limmer et al., 2018). Increased peak blood lactate may be explained by higher glycolytic rates, permitted by reduced inhibition of phosphofructokinase activity, an essential enzyme in the control of glycolysis (Robergs et al., 2004). Secondly, blood lactate concentration may be increased due to improved lactate transportation. Specifically, increased activity of transport proteins (membrane co-transporters MCT1 and MCT4) may facilitate the release of muscle lactate into the extracellular environment. The presence of bicarbonate ions, therefore, allows for the removal of extracellular H⁺, creating the necessary concentration gradient between the intra- and extracellular media, leading to the efflux of H⁺ and lactate from muscle during exercise (Robergs et al., 2004). An increase in muscle-released lactate concentrations has been previously observed, suggesting that elevated alkalosis accelerates lactate transport (Maughan et al., 2018). The variations in post-exercise blood pH, lactatemia, and HCO₃⁻ concentration in STY^{ALK} support the hypothesis of an additive buffering effect of the dietary (ALK) and water (STY) strategies, but not sufficient to cause ergogenic effects during the present exercise modality.

One of our initial hypotheses was that the consumption of bicarbonate-rich water could compensate for the effects of an increased acid load induced by the consumption of an acidizing diet on the acid-base balance. Urinary pH in STY^{ACI} was significantly higher than PLA^{ACI} (STY^{ACI}: 6.86 ± 0.60 vs. PLA^{ACI}: 6.19 ± 0.45 ; $p = 0.01$), underlining the significative effect of drinking bicarbonate-rich water on urine alkalization. Although we did not

find significant effects on blood biomarkers, the consumption of mineral water rich in HCO₃⁻ ions appears to reduce the acid load induced by the acidizing diet by regulating the acid-base balance.

In contrast to previously reported literature, the strategies implemented here did not influence performance with an alkalizing diet (Limmer et al., 2018), chronic sodium bicarbonate intake (McNaughton and Thompson, 2001) or acute intake of bicarbonate-rich water (Rieux and Duvallet, 2000). In the study by McNaughton and Thompson (2001), which used a similar experimental design to ours, albeit with reduced ecological validity, bicarbonate supplementation in a capsule form resulted in improved anaerobic performance. Most notably, the quantity of bicarbonate administered was 3 to 4 times higher than in our study. Practically, achieving comparable levels of bicarbonate intake via bicarbonate-rich water ingestion would not be possible as participants would be required to drink 6 to 7 L of water daily. Additionally, using the same experimental water as STY in our study, Rieux and Duvallet (2000) reported reduced muscle fatigability at the end of the endurance test. Two major points differentiate this study from ours, the timing of intake and the nature of the test (single vs. repeated). Indeed, in the study by Rieux and Duvallet (2000) water was not ingested chronically but only on the day of testing, starting 2 h before the first exercise and lasting until the last test. The second difference lies in the test, either single exercise as in our study or repeated exercise. Data from the Rieux and Duvallet's (2000) study suggest that drinking bicarbonate-rich water throughout the duration of repeated exercise might be of interest. Recent findings confirm that repeatedly ingesting a small amount of sodium bicarbonate improves repeated all-out performance when ingestion is spread throughout exercise (Dalle et al., 2019).

More recently, Hadzic et al. (2019) reported large inconsistencies in the sodium bicarbonate supplementation literature with artificial dietary supplements with a higher dose of bicarbonate compared to this study, showing that effects on performance could differ even when the same exercise and supplementation protocols were applied (Saunders et al., 2014). Saunders et al. (2014) did not show any relationship between the magnitude of change in circulating biomarkers

related to acid-base balance, such as bicarbonate and pH, and subsequent enhancement in performance of HI exercise of similar duration as in the present study. Also, as stated in the study of Thomas et al. (2021), there is considerable inter-individual variability in humans in the assimilation of an exogenous alkalinizing intake and its buffering effect. This might have contributed to the fact that we did not find any effect on performance despite the change in acid-base balance biomarkers.

Water naturally rich in bicarbonate ions can be utilized to supply the necessary bicarbonate ions for optimizing buffering capacity. Our study indicates that the consumption of bicarbonate-rich water over several days positively modifies acid-base balance. In practical terms, a daily intake of 1.5 to 2 l of bicarbonate-rich water as part of a hydration plan could gradually enhance buffering capacity in the days leading up to competition. It is recommended to initiate this strategy at least three days before the competition and distribute water intake throughout the day, such as 0.5 l in the morning, 0.5 l around noon (between meals), in the afternoon, and possibly in the evening. This approach could be particularly beneficial for athletes aiming to avoid excessive supplement consumption or who experience gastrointestinal issues (McNaughton et al., 2016). As highlighted in our study, an alkaline diet enhances the beneficial effect of bicarbonate-rich water on acid-base balance. Just like with hydration, athletes can optimize their diet by predominantly including fruits and vegetables in an alkaline-based diet. However, it is strongly recommended to test these nutritional strategies for each athlete during a training period or a non-competitive phase to prevent discomfort associated with dietary modifications. While this mode of consumption did not improve anaerobic performance, future research can explore whether the combination of chronic and acute intake of bicarbonate-rich water could enhance performance. Further studies could investigate the effects of these nutritional strategies, particularly in non-weight-bearing sports, among non-recreational athletes (Froio de Araujo Dias et al., 2015), and in the context of repeated exercise, especially when bicarbonate-rich water is consumed throughout the exercise duration. Future studies should take into account sodium supplementation, which could also have

an impact on anaerobic performance (Durkalec-Michalski et al., 2023). Finally, one potential limitation of this study was the use of a basic randomization method, based on random division without taking into account the pre-visit outcomes. Indeed, participants were not matched based upon the primary outcomes of the previsit, for instance, the familiarization performance test, before being randomly assigned to one of the two dietary groups. Finally, considering that participants were recreationally trained men, we may hypothesize that the nutritional strategy implemented in our study could have enhanced effects on athletes with a higher level of performance. Indeed, following a high-intensity exercise, metabolic acidosis is more pronounced in elite athletes compared to athletes at the regional level (Hanon et al., 2011). Consequently, supplementing with bicarbonate-rich water along with an alkalizing diet could optimize the buffering capacity of more trained athletes.

Conclusions

In conclusion, this study was the first to investigate the influence of chronic consumption of bicarbonate-rich water on the regulation of acid-base balance and anaerobic performance and its combined effects with an alkalizing or an acidizing diet. Despite the implementation of these nutritional strategies, bicarbonate-rich water intake did not affect anaerobic performance, regardless of dietary intake. While we did not measure blood HCO_3^- concentration and pH before the warm-up, we showed that the chronic consumption of bicarbonate-rich water significantly impacted resting urinary pH irrespective of alkalizing or acidizing dietary intake. Furthermore, we observed significantly greater post-exercise peak blood lactate in response to bicarbonate-rich water consumption compared to the placebo condition. In addition, blood pH and bicarbonate concentration were affected by both bicarbonate-rich water and alkalinizing diet during the recovery period compared to the placebo condition. Our results suggest that consuming mineral water rich in HCO_3^- ions potentiates an alkalizing diet's beneficial effects on the biomarkers reflecting acid-base balance during a 1-AO. Finally, consuming bicarbonate-rich water reduces the acid load induced by an acidizing diet.

Author Contributions: Conceptualization: F.C., C.T., J.B., F.M., L.C. and E.T.; methodology: F.C., C.T., J.B. and E.T.; software: F.C., J.B. and E.T.; validation: F.C., J.B. and E.T.; formal analysis: F.C., J.B. and E.T.; investigation: F.C. and E.T.; resources: F.C. and E.T.; data curation: F.C., J.C. and E.T.; writing—original draft preparation: F.C., C.T., S.B., C.H. and E.T.; writing—review & editing: F.C., C.T., S.B., C.H. and E.T.; visualization: F.C. and E.T.; supervision: C.T., C.H. and E.T.; project administration: C.T. and E.T.; funding acquisition: C.T. and E.T. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding Information: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: This study was conducted following the principles of the Declaration of Helsinki and approved by the Ethics Committee CERSTAPS (approval No. 2022-A00644-39; approval date: 01 January 2020).

Informed Consent: Informed consent was obtained from all participants included in the study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest, financial or otherwise. The results are presented honestly without fabrications, falsifications, or inappropriate data manipulation.

Acknowledgements: The authors would like to thank the subjects for their time and effort, as well as all those who helped set up this study.

Received: 09 June 2023

Accepted: 23 January 2024

References

- Brancaccio, P., Limongelli, F., Paolillo, I., D'Aponte, A., Donnarumma, V., & Rastrelli, L. (2012). Supplementation of Acqua Lete® (Bicarbonate Calcic Mineral Water) improves hydration status in athletes after short term anaerobic exercise. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 9(1), 35. <https://doi.org/10.1186/1550-2783-9-35>
- Caciano, S., Inman, C., Gockel-Blessing, E., & Weiss, E. (2015). Effects of dietary acid load on exercise metabolism and anaerobic exercise performance. *Journal of Sports Science & Medicine*, 14(2), 364–371.
- Carr, A., Hopkins, W., & Gore, C. (2011). Effects of acute alkalosis and acidosis on performance: A meta-analysis. *Sports Medicine*, 41(10), 801–814. <https://doi.org/10.2165/11591440-000000000-00000>
- Chycki, J., Golas, A., Halz, M., Maszczyk, A., Toborek, M., & Zajac, A. (2018). Chronic ingestion of sodium and potassium bicarbonate, with potassium, magnesium and calcium citrate improves anaerobic performance in elite soccer players. *Nutrients*, 10(11), 1610. <https://doi.org/10.3390/nu10111610>
- Chycki, J., Kurylas, A., Maszczyk, A., Golas, A., & Zajac, A. (2018). Alkaline water improves exercise-induced metabolic acidosis and enhances anaerobic exercise performance in combat sport athletes. *Plos One*, 13(11), e0205708. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205708>
- Chycki, J., Zajac, T., Maszczyk, A., & Kurylas, A. (2017). The effect of mineral-based alkaline water on hydration status and the metabolic response to short-term anaerobic exercise. *Biology of Sport*, 34(3), 255–261. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2017.66003>
- Deriemaeker, P., Aerenhouts, D., Hebbelinck, M., & Clarys, P. (2010). Nutrient based estimation of acid-base balance in vegetarians and non-vegetarians. *Plant Foods for Human Nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 65(1), 77–82. <https://doi.org/10.1007/s11130-009-0149-5>
- Durkalec-Michalski, K., Kamińska, J., Saunders, B., Pokrywka, A., Łoniewski, I., Steffl, M., & Podgórski, T. (2024). Does sodium bicarbonate based extra-cellular buffering support reduce high intensity exercise-induced fatigue and enhance short-term recovery assessed by selected blood biochemical indices?. *Biology of Sport*, 41(1), 17–27. <https://doi.org/10.5114/biolSport.2024.125591>
- Edge, J., Bishop, D., & Goodman, C. (2006). The effects of training intensity on muscle buffer capacity in females. *European Journal of Applied Physiology*, 96(1), 97–105. <https://doi.org/10.1007/s00421-005-0068-6>

- Froio de Araujo Dias, G., da Eira Silva, V., de Salles Painelli, V., Sale, C., Giannini Artioli, G., Gualano, B., & Saunders, B. (2015). Consistencies in responses to sodium bicarbonate supplementation: A randomised, repeated measures, counterbalanced and double-blind study. *Plos One*, 10(11), e0143086. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143086>
- Grgic, J., Grgic, I., Del Coso, J., Schoenfeld, B., & Pedisic, Z. (2021). Effects of sodium bicarbonate supplementation on exercise performance: an umbrella review. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 18(1), 71. <https://doi.org/10.1186/s12970-021-00469-7>
- Hadzic, M., Eckstein, M., & Schugardt, M. (2019). The Impact of Sodium Bicarbonate on Performance in Response to Exercise Duration in Athletes: A Systematic Review. *Journal of Sports Science & Medicine*, 18(2), 271–281.
- Halz, M., Kaszuba, M., Helbin, J., Krzysztofik, S., Suchanecka, A., & Zajac, A. (2022). Beta-alanine supplementation and anaerobic performance in highly trained judo athletes. *Balt J Health Phys Act*, 14(2): Article1. doi: 10.29359/BJHPA.14.2.01. <https://doi.org/10.29359/BJHPA.14.2.01>
- Hanon, C., Rabate, M., & Thomas, C. (2011). Effect of expertise on postmaximal long sprint blood metabolite responses. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(9), 2503–2509.
- Hanon, C., Thomas-Junius, C., & Giroux, C. (2019). *Sports à haute intensité: mieux comprendre la performance pour mieux l'entraîner*. Institut national du sport, de l'expertise et de la performance.
- Heil, D. P. (2010). Acid-base balance and hydration status following consumption of mineral-based alkaline bottled water. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 7, 29. <https://doi.org/10.1186/1550-2783-7-29>
- Lancha Junior, A. H., Painelli, V. de S., Saunders, B., & Artioli, G. G. (2015). Nutritional strategies to modulate intracellular and extracellular buffering capacity during high-intensity exercise. *Sports Medicine*, 45 Suppl 1, S71–S81. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0397-5>
- Lattier, G., Millet, G. Y., Martin, A., & Martin, V. (2004). Fatigue and recovery after high-intensity exercise. Part II: Recovery interventions. *International Journal of Sports Medicine*, 25(7), 509–515. <https://doi.org/10.1055/s-2004-820946>
- Limmer, M., Eibl, A. D., & Platen, P. (2018). Enhanced 400-m sprint performance in moderately trained participants by a 4-day alkalizing diet: A counterbalanced, randomized controlled trial. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 15(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s12970-018-0231-1>
- Maughan, R., Burke, L., Dvorak, J., Larson-Meyer, D., Peeling, P., Phillips, S., Rawson, E., Walsh, N., Garthe, I., Geyer, H., Meeusen, R., van Loon, L., Shirreffs, S., Spriet, L., Stuart, M., Vernec, A., Currell, K., Ali, V., Budgett, R., Ljungqvist, A., ... & Engebretsen, L. (2018). IOC consensus statement: dietary supplements and the high-performance athlete. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 28(2), 104–125. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0020>
- McNaughton, L., Gough, L., Deb, S., Bentley, D., & Sparks, S. (2016). Recent developments in the use of sodium bicarbonate as an ergogenic aid. *Current Sports Medicine Reports*, 15(4), 233–244. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000283>
- Mc Naughton, L., & Thompson, D. (2001). Acute versus chronic sodium bicarbonate ingestion and anaerobic work and power output. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 41(4), 456–462.
- Ragone, L., Guilherme Vieira, J., Camaroti Laterza, M., Leitão, L., da Silva Novaes, J., Macedo Vianna, J., & Ricardo Dias, M. (2020). Acute Effect of Sodium Bicarbonate Supplementation on Symptoms of Gastrointestinal Discomfort, Acid-Base Balance, and Performance of Jiu-Jitsu Athletes. *Journal of Human Kinetics*, 75, 85–93. <https://doi.org/10.2478/hukin-2020-0039>
- Remer, T., & Manz, F. (1995). Potential renal acid load of foods and its influence on urine pH. *Journal of the American Dietetic Association*, 95(7), 791–797. [https://doi.org/10.1016/S0002-8223\(95\)00219-7](https://doi.org/10.1016/S0002-8223(95)00219-7)
- Richard, R., Jimenez, L., Duvallet, A., & Rieu, M. (2000). Effect of bicarbonated salt water in physiological exercise adaptations. *Science & Sports*, 15(1), 18–25.
- Roberts, R., Ghiasvand, F., & Parker, D. (2004). Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 287(3), R502–R516. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00114.2004>

- Rosenthal, R. (1994). Parametric measures of effect size. In H. Cooper & L. V. Hedges (Eds.), *The handbook of research synthesis* (pp. 231–244). Russell Sage Foundation.
- Saunders, B., Sale, C., Harris, R. C., & Sunderland, C. (2014). Sodium bicarbonate and high-intensity-cycling capacity: variability in responses. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(4), 627–632. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0295>
- Steffl, M., Kinkorova, I., Talar, K., Jandova, T., Moulisova, K., Omcirk, D., & Petr, M. (2021). The Effects of High Mineral Alkaline Water Consumed over Three Consecutive Days on Reaction Time Following Anaerobic Exercise – A Randomized Placebo-Controlled Crossover Pilot Study. *Journal of Human Kinetics*, 78, 111-119. <https://doi.org/10.2478/hukin-2021-0046>
- Thomas, C., Delfour-Peyrethon, R., Dorel, S., & Hanon, C. (2022). Positive Effects of Pre-exercise Metabolic Alkalosis on Perceived Exertion and Post-exercise Squat Jump Performance in World-Class Cyclists. *Journal of Strength and Conditioning research*, 36(9), 2602–2609. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003855>

ÉTUDE 5 - ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE L'ÉTAT ACIDO-BASIQUE SUR LA PERFORMANCE ATHLÉTIQUE LORS D'UNE COURSE DE 400 M SIMULÉE SUR TROIS JOURS

Publication associée : **Chiron, F.**, Erblang, M., Gulören, B., Bredariol, F., Hamri, I., Leger, D., Hanon, C., Tiollier, E., & Thomas, C. (2024). Exploring the Influence of Acid-Base Status on Athletic Performance during Simulated Three-Day 400 m Race. *Nutrients*, 16(13), 1987.

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE 5

À la lumière des résultats de la précédente étude réalisée en aigu et en laboratoire, cette étude s'est intéressée aux effets de la régulation de l'équilibre acido-basique par un régime alcalinisant et la consommation d'eau riche en bicarbonate, sur la performance lors de trois courses simulées de 400 m en championnats, sur trois jours consécutifs. L'objectif principal était de déterminer si les athlètes pouvaient maintenir une performance élevée et d'évaluer si la stratégie nutritionnelle alcalinisante pouvait moduler les réponses métaboliques pour favoriser une meilleure récupération et performance.

Les participants, au nombre de vingt-deux athlètes spécialistes des exercices à haute-intensité, ont été divisés en deux groupes : un groupe recevant un régime alcalinisant associé à de l'eau riche en bicarbonate (BIC) et un groupe placebo (PLA) avec le même régime alcalinisant mais de l'eau placebo. Le régime alcalinisant, basé sur une alimentation riche en fruits et légumes et pauvre en protéines animales, visait à réduire la charge acide potentielle rénale (PRAL), un indicateur du potentiel acide généré par les aliments consommés. En parallèle, l'eau bicarbonatée utilisée dans l'étude contenait 4368 mg/L de bicarbonate, connue pour agir favorablement sur le pH sanguin en augmentant la capacité tampon.

Les mesures de performance et des marqueurs métaboliques (comme le lactate sanguin et les concentrations de bicarbonate) ont été effectuées avant et après chaque course pour évaluer l'évolution des réponses physiologiques.

Les résultats de cette étude ont mis en évidence une augmentation significative du pH urinaire à l'issue de la consommation d'un régime alcalinisant associée à une eau riche en bicarbonate (BIC) en comparaison à une eau placebo (PLA) ($p < 0,05$). Les concentrations de bicarbonate sanguin [HCO_3^-] et le pH sanguin étaient significativement plus élevés chez le groupe BIC comparé au groupe PLA ($p < 0,01$) en amont du premier 400 mètres. La performance sur 400 mètres du groupe BIC a significativement été améliorée de 1,5% lors de la troisième course en comparaison de la première alors qu'aucune différence n'a été observée pour le groupe PLA (BIC : $54,23 \pm 4,83$ s (1er 400 m) vs. $53,66 \pm 4,74$ s (3ème 400 m) $p < 0,01$). Par ailleurs, les concentrations en lactate sanguin des deux conditions étaient significativement moins élevées lors du prélèvement réalisé à post 20min lors de la troisième course en comparaison à la première ($p < 0,05$).

Ainsi, cette étude a mis en évidence l'intérêt d'une stratégie nutritionnelle alcalinisante combinée à une hydratation en eau bicarbonatée pour soutenir la performance en cas

d'exercices répétitifs et intenses. Ces résultats apportaient un éclairage sur l'importance de l'équilibre acido-basique dans la gestion de la fatigue métabolique et de la capacité à répéter des performances maximales, un défi fréquent pour les athlètes de haut niveau en compétitions nationales et internationales.

Article

Exploring the Influence of Acid-Base Status on Athletic Performance during Simulated Three-Day 400 m Race

François Chiron ^{1,2,*} , Mégane Erblang ¹, Bora Gulören ¹, Federica Bredariol ¹, Imad Hamri ³, Damien Leger ⁴ , Christine Hanon ^{2,5}, Eve Tiollier ⁵ and Claire Thomas ¹

¹ Exercise Biology for Performance and Health Laboratory (LBEPS), Univ Evry, IRBA, University Paris Saclay, 91025 Evry, France; megane.erblang@univ-evry.fr (M.E.); gulorenbor@hotmail.fr (B.G.); federica.bredariol@studenti.unimi.it (F.B.); claire.thomas@univ-evry.fr (C.T.)

² French Athletics Federation (FFA), 33 Avenue Pierre de Coubertin, 75640 Paris CEDEX, France; christinehanon@gmail.com

³ Institute of Biomedical Research and Epidemiology of Sport (IRMES), Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance (INSEP), 11, Avenue du Tremblay, 75012 Paris, France; imadhamri75@gmail.com

⁴ Université Paris Cité, VIFASOM (Vigilance, Fatigue, Sleep and Public Health), ERC 7330, APHP, Hôtel-Dieu, Centre du Sommeil et de la Vigilance, 1 Place Parvis Notre Dame, 75004 Paris, France; damien.leger@aphp.fr

⁵ French National Institute for Sport, Expertise and Performance (INSEP), Research Department, Laboratory Sport, Expertise and Performance, 75012 Paris, France; eve.tiollier@insep.fr

* Correspondence: francois.chiron49@gmail.com

Abstract: This study aimed to investigate the ability of highly trained athletes to consistently perform at their highest level during a simulated three-day 400 m race and to examine the impact of an alkaline diet associated with chronic consumption of bicarbonate-rich water or placebo on their blood metabolic responses before and after the three races. Twenty-two highly trained athletes, divided into two groups—one with an alkalizing diet and placebo water (PLA) and the other with an alkalizing diet and bicarbonate-rich water (BIC)—performed a 400 m race for three consecutive days. Performance metrics, urine and blood samples assessing acid-base balance, and indirect markers of neuro-muscular fatigue were measured before and after each 400 m race. The evolution of the Potential Renal Acid Load (PRAL) index and urinary pH highlights the combination of an alkalizing diet and bicarbonate-rich hydration, modifying the acid-base state ($p < 0.05$). Athletes in the PLA group replicated the same level of performance during three consecutive daily races without an increase in fatigue-associated markers. Athletes experienced similar levels of metabolic perturbations during the three 400 m races, with improved lactate clearance 20 min after the third race compared to the first two ($p < 0.05$). This optimization of the buffering capacity through ecological alkaline nutrition and hydration allowed athletes in the BIC group to improve their performance during the third 400 m race ($p < 0.01$). This study highlights athletes' ability to replicate high-level performances over three consecutive days with the same extreme level of metabolic disturbances, and an alkaline diet combined with bicarbonate-rich water consumption appears to enhance performance in a 400 m race.

Keywords: high-intensity exercise; sodium bicarbonate supplementation; nutritional strategy; anaerobic performance



Citation: Chiron, F.; Erblang, M.; Gulören, B.; Bredariol, F.; Hamri, I.; Leger, D.; Hanon, C.; Tiollier, E.; Thomas, C. Exploring the Influence of Acid-Base Status on Athletic Performance during Simulated Three-Day 400 m Race. *Nutrients* **2024**, *16*, 1987. <https://doi.org/10.3390/nu16131987>

Academic Editors:
Spyridon Methenitis and
George Panayiotou

Received: 1 May 2024
Revised: 14 June 2024
Accepted: 14 June 2024
Published: 21 June 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

During international competitions such as the Olympics or World Championships, world-class athletes could compete multiple times in a single day and perform up to seven high-intensity 400 m races in a single competition. As a 400 m race requires maximal engagement, the significant solicitation in the energy demand by contracting skeletal muscles is marked by a pronounced decrease in phosphocreatine concentration [1] and an elevated rate of oxygen consumption, reaching up to 94% of the maximal value [2] associated with significant muscle and blood metabolic perturbations [2]. Athletes' performance is then

positively correlated with tolerance for homeostatic perturbations [3], with success linked to the ability to produce high levels of lactate and withstand significant decreases in muscle and blood pH bicarbonate concentration [2,4,5].

However, blood acid-base balance biomarkers, reflecting the homeostatic perturbations induced by high-intensity (H-I) exercise, return to their baseline levels in less than ninety minutes after exercise cessation [6]. We, therefore, question the ability of highly trained athletes to mobilize once again a high level of energy and performance to complete three consecutive 400 m races during a competition, and consequently, to induce a high level of metabolic perturbations, even with an organism already heavily solicited by a first 400 m race. Indeed, impairments in muscle buffering capacity [7], in lactate transporters contents [8,9] and transport activity [10,11], as well as in muscle oxidative capacity [12–14] after H-I exercise performed until exhaustion have been reported and could affect muscle function, which contributes to significant skeletal muscle fatigue accumulation [5]. Thus, athletes' ability to efficiently stimulate anaerobic glycolysis and aerobic metabolism, as well as to regulate muscle and blood metabolic perturbations, could be compromised during the subsequent races.

In this context, accumulation of hydrogen ions (H^+) with H-I exercise has been reported to particularly affect ion regulation [5], enzyme activity [14], muscle protein expression involved in lactate/pH regulation [15], and oxidative phosphorylation [16], and it could contribute to limiting performance during a 400 m race [2,3]. Then, counteracting metabolic acidosis through the enhancement of buffering capacity either by training [7] or by chronic exogenous buffering agent supplementation [17] can be a way to modulate acid balance and limit muscle fatigue during H-I exercise [18] and promote the repetition of the highest performance during consecutive 400 m races in competition.

Additionally, an alkaline diet could also present another natural approach to influence acid-base balance [19,20] and improve 400 m race performance [20]. Without taking artificial dietary supplements, which are typically administered in capsule form and may induce gastrointestinal disorders [21], a single instance of acute consumption of natural water rich in HCO_3^- ions with a high bicarbonate content (4368 mg/L) could be an easy and natural way to restore acid-base balance after aerobic exercise and enhance residual strength following an isokinetic test [22]. Recently, our team has reported that chronic consumption of bicarbonate-rich water combined with an alkaline diet has a significant impact on acid-base balance regulation after acute H-I exercise compared to the placebo condition, without significant effects on performance [23].

Considering that an acute 400 m race performed until exhaustion induces significant metabolic perturbations in both muscle and blood, affecting the regulation of acid-base balance and leading to pronounced muscle fatigue, we therefore, investigated the ability of highly trained athletes to consistently perform at their highest level during a simulated three-day 400 m race. We also evaluated the impact of repeated 400 m races on blood metabolic responses. Additionally, we proposed that changes in alkaline status resulting from chronic consumption of bicarbonate-rich water and an alkaline diet could have beneficial effects on metabolic responses, better regulating acid-base balance and facilitating the repetition of H-I exercises.

2. Methods and Materials

2.1. Experimental Approach to the Problem

Participants conducted their first visit (Day 0) during which urine and blood samples were collected. Pre-measurements included a familiarization session involving Handgrip (HG) and squat jumps (SJ), and written consent was obtained. Subsequently, participants were randomly assigned to one of two groups, either an alkalizing diet associated with placebo water (PLA, $n = 11$) or an alkalizing diet associated with bicarbonate-rich water (BIC, $n = 11$). Participants were also instructed to modify their habitual diet to adhere to an alkalizing diet (low Potential Renal Acid Load (PRAL) index diet [19]) for the entire 6 days of the experimental period, along with receiving specific dietary recommendations

(Figure 1) to achieve this. Throughout the experimental protocol (day 1–day 6), participants were instructed to consume 2 L of either bicarbonate ion-rich water (BIC) or placebo water (PLA) daily, following a double-blind and randomized manner, as part of their daily hydration. In the pre-test period (day 1–day 3), participants were only required to adhere to the dietary and hydration recommendations and maintain a nutritional diary while collecting daily urine samples in a designated container; no other samples were taken. During the final 3 days of the protocol (day 4–day 6), timed tests were conducted for the 400 m race, including pre- and post-race SJ and HG performance assessments, as well as the collection of biomarkers.

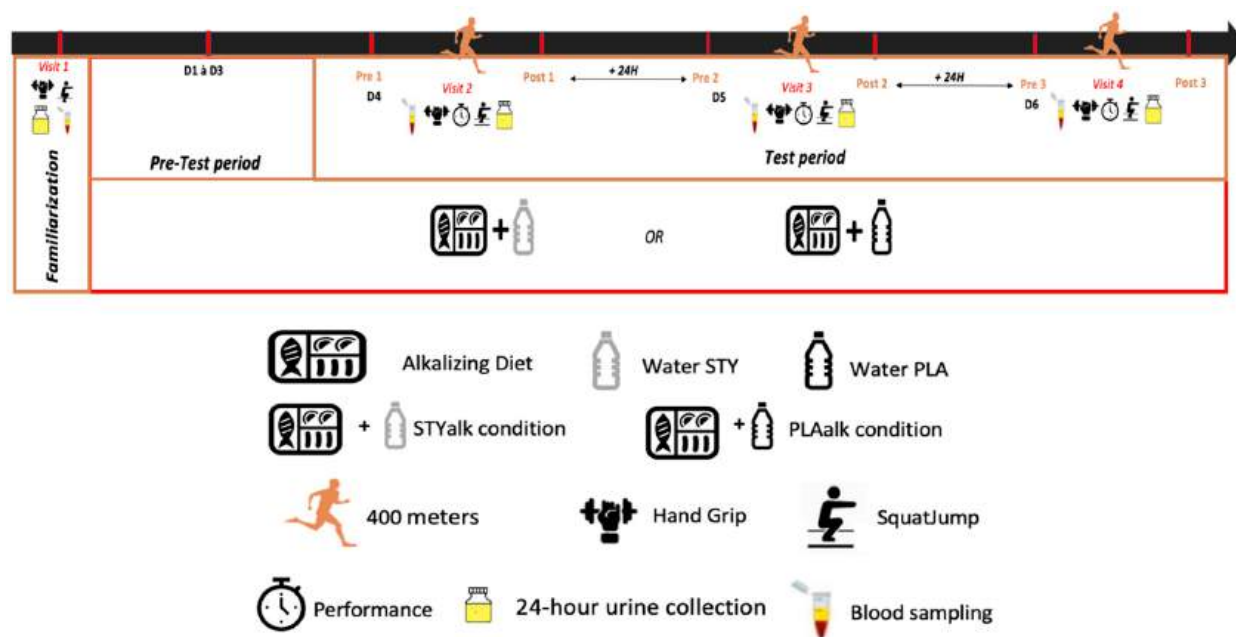


Figure 1. Schematic overview of study design. During the three days leading up to the first 400 m race and throughout the entire protocol, participants followed an alkalizing diet combined with the daily consumption of 2 L of bicarbonate ion-rich water (BIC; $n = 11$) or placebo water (PLA; $n = 11$). After Day 4, 5, and 6, the participants engaged in a direct head-to-head simulated competition of 400 m. Various markers and biomarkers were measured before and immediately after each race (post 4', post 8', post 20', and post 1 h).

2.2. Subjects

In accordance with previous studies [20,22], in order to achieve 95% power with a 5% statistical risk, twenty-two ($n = 22$) highly trained athletes (National Level) from the Athletic French Federation were included in this study (15 males: 22.8 ± 3.3 years, 67.2 ± 7.5 kg, 178 ± 6.9 cm, 400 m race best performance: 51.16 ± 3.54 s and 7 females: 21.3 ± 2.4 years, 58.2 ± 4.4 kg, 170 ± 5.6 cm, 400 m race performance: 59.69 ± 3.56 s). According to the classification by McKay et al., 2022 [24], these highly trained athletes had achieved personal best (PB) performances that met the criteria for Performance level 4 (National 4) as outlined in the Hungarian table of World Athletics Quotation Table (W) for the 400 m race or 800 m race. The Hungarian table is an internationally recognized reference, certified by World Athletics, for classifying athletes based on their performance levels.

All participants were informed of the study protocol, their rights, and the associated risks before providing written informed consent. All procedures were approved by the ethical committee CERSTAPS (CERSTAPS N° 2022-A00644-39/date of approval 15 March 2022) and conducted in accordance with the Declaration of Helsinki (1964, revised 2001).

2.3. Procedures

Experimental water. During the 6-day protocol, in a double-blind and randomized fashion, participants were instructed to drink 2 L per day of either bicarbonate-rich or

placebo water (Table 1). Four bottles of 500 mL each were provided daily to participants (minimum 0.5 L in the morning, 0.5 L in the afternoon, 0.5 L in the hour preceding the 400 m race, and 0.5 L before sleep). St Yorre water (BIC) (Vichy St Yorre, Sources Alma, La Ferrière Bochard, France) is a naturally carbonated water rich in minerals (4774 mg/L containing 4368 mg of HCO_3^- ions). The low-bicarbonate water, or placebo (PLA), was provided to participants in identical bottles to BIC but contained regular carbonated water with considerably lower mineral content (Table 1). Habitual hydration was resumed during the 6 days.

Table 1. Composition of St Yorre water and placebo water.

Composition of Water	St Yorre (BIC)	Placebo (PLA)
Calcium (mg.L^{-1})	90	93
Magnesium (mg.L^{-1})	11	8.1
Sodium (mg.L^{-1})	1708	8.8
Potassium (mg.L^{-1})	110	2.6
Silica (mg.L^{-1})	16	19
Bicarbonate (mg.L^{-1})	4368	306
Chloride (mg.L^{-1})	322	18
Sulphate (mg.L^{-1})	174	7.5
Nitrates (mg.L^{-1})	2.5	2
Fluorine (mg.L^{-1})	1	0.35
pH	6.6	5.4
Sodium Bicarbonate Equivalent (mg.L^{-1})	6015	-
Sodium Chloride Equivalent (mg.L^{-1})	528	-

2.4. Dietary Intervention

Nutritional suggestions were given to participants during their initial visit. Each participant was given detailed written nutritional guidelines and meal suggestions based on a vegetarian-prone diet [19,25] to follow for the duration of the study. Participants were required to prefer the consumption of vegetables and fruit. Dairy products, including yogurt, fresh cheese, curd, milk, and potatoes were permitted. Participants were asked to avoid consuming meat, fish, and cheese as well as fresh cheese and non-whole wheat starchy foods. The dietary intake was monitored via a written food diary and photographic records of every meal (Guide des portions alimentaires n.d.). The Potential Renal Acid Load (PRAL) was calculated using the equation of Remer and Manz (1995) [19], to characterize their diet.

2.5. Urine Analysis

During the familiarization day (Day 0), the three pre-test days (Day 1, Day 2, and Day 3), and each test day (Day 4, Day 5, and Day 6), subjects completed a 24 h urine collection. Urinary pH and urine specific gravity (USG) were assessed using an AL-pH pH meter (Atago Co., Ltd., Saitama, Japan) and a digital pocket refractometer (PAL-1, Atago, Japan).

2.6. The 400 m Race Test

During the testing phase (Day 3, Day 4, and Day 5), participants engaged in a daily 400 m race. These races served as simulated competitions, with a specific warm-up, a call room, and a direct confrontation race with a start from starting blocks. For the performance measurements (400 m and 200 m split times (in seconds)), we used video recordings made with an iPhone 11 (1080p HD at 60 frames per second, Apple, Cupertino, CA, USA) and an iPad Pro (1080p HD at 60 frames per second, Apple, Cupertino, CA, USA). A two-handed “clap” was used to start the stopwatch. The video camera was positioned perpendicular to the finish line, similar to official competitions, and the stopwatch was stopped when the athlete’s chest crossed the line. The footage was analyzed using software to obtain measurements accurate to the

hundredth of a second. Furthermore, a manual stopwatch was employed to provide a backup measurement in the event of any failure in the primary method. All performance tests were recorded by manual double timing by two athletics coaches, specialists of the French National 400 m team, who took all race times simultaneously to avoid methodological bias.

The 400 m races were conducted on an indoor track with a length of 340 m (Maigrot Hall at the Institute of Sport Expertise and Performance, Paris, France) to ensure highly reproducible conditions (the temperature was maintained at a constant level and there was no wind).

Before each competition, the athletes were encouraged to visualize their perfect race, imagining themselves successfully completing each stage and achieving their goals. They prepared as if for a real competition, using techniques to stay calm and focused. The athletes were conditioned by their coaches similarly to a real competition setting. The training load was adjusted and reduced in the days preceding the tests to ensure they were in optimal shape and motivated to perform. Warming up the athletes lasted one hour as in competition. Athletes were obliged to adhere to their customary competition routine, which included mobilization, jogging, stretching, technical exercises, sprints, and starts, prior to entering the call room. Tactically, the athletes were specifically trained to make a fast and effective start by utilizing their phosphocreatine stores [26] to gain an early advantage. As 400 m specialists, they have also learned to manage their effort with a quick start and to maintain resistance to the inevitable decline in speed that occurs in the final 100 m [2]. Additionally, participants engaged in direct 1 vs. 1 competition with instructions to win the race and achieve the best possible performance, as if they were qualifying for the next round, with their ranking influencing their participation the following day.

Throughout all the tests, the athletes received verbal encouragement and support, similar to a competitive environment, to ensure they felt supported and motivated. Combining these strategies has helped the athletes stay motivated for the three tests and perform at their best in the three 400 m races as they can.

2.7. Evaluation of Motivation and Perceived Effort

Immediately after and at 4, 8, 20 min, and 1 h into the recovery phase after the 400 m race, participants were instructed to assess their level of motivation and their perception of effort using the Borg scales [27]. The first scale uses a 7-point scale (1–7) to estimate motivation, where 1 corresponds to “very, very high” motivation and 7 corresponds to “very, very low motivation”. The second scale uses a 10-point scale (0–10) to estimate the effort and the perceived exertion of the exercise performed, where a score of 0 corresponds to an exercise that is “very, very easy”, and a score of 10 corresponds to maximal effort.

2.8. Handgrip (HG)

During the familiarization session, participants underwent an HG test both before warming up and at four time points: 4 min, 8 min, 20 min, and 1 h after the 400 m race. This test was employed to assess the explosive strength of their forearm muscles, serving as an indirect indicator of central fatigue. Participants were instructed to perform three tests (using the Jamar dynamometer) with a one-minute rest interval between each test. The test was conducted with the dominant arm extended and away from the body. The best performance in kilograms was recorded both before and after each sprint.

2.9. Squat Jump (SJ)

During the familiarization session, participants underwent an SJ test both before warming up and at four time points: 4 min, 8 min, 20 min, and 1 h after completing the 400 m race. This test was employed to indirectly assess neuromuscular fatigue relative to the explosive strength of their lower limbs, serving as an indirect indicator of peripheral fatigue. Participants were instructed to perform three squat jumps (using Optojump; Microgate) with a one-minute rest interval between each jump. The test was conducted with hands on their hips, and the knee angle was consistently set at 90 degrees. After

stabilizing their position without any backward movement, the experimenter instructed them to jump as high as possible, the best jump performance in centimeters was recorded both before and after each sprint.

2.10. Blood Acid-Base Status

Blood biomarkers, including blood bicarbonate concentration ($[\text{HCO}_3^-]$), blood pH, blood lactate concentration ($[\text{La}]$), and base excess ($[\text{BCef}]$) were measured via finger-tip prick (20 μL) to assess acid-base regulation. Samples were collected during the initial visit (familiarization: Day 0) at rest and on each testing day (Day 4, Day 5, and Day 6) before warm-up (Pre) and after 4 min of exercise (+4'), 8 min (+8'), 20 min (+20'), and 1 h (+1 h) during passive recovery following the 400 m race. The samples were analyzed using a blood gas and electrolyte analyzer (i-STAT, Abbott, Chicago, IL, USA) and a Lactate Pro 2 device (Arkray, LT-1730, Kyoto, Japan).

2.11. Statistical Analyses

All values are reported as means $\pm$ standard deviations. The Shapiro–Wilk test was used to identify departures from the normal distribution. Performance times, blood gases, lactate values, grip strength (HG), and jump height (SJ) between the first and third 400 m race, as well as between pre-exercise and post-exercise values, were analyzed with a two-way analysis of variance (effects: BIC and PLA). Tukey's post hoc analysis was undertaken to localize the difference. A priori power analysis indicated that 11 participants per condition were needed to detect significant differences based on an estimated alpha level of 0.05 and a power of 95% based on the exercise performance improvement results from a previous study by Limmer et al., (2018) [20]. The alpha level was set at $p \leq 0.05$ and was conducted using SPSS 24 (IBM Corp, Endicott, NY, USA). Finally, Cohen's d scores (average residual/SD) were calculated for performance parameters to categorize the magnitude of the error of estimation as large (0.8), moderate (0.5–0.8), or small (0.5). The Shapiro–Wilk test and Tukey's post hoc analysis were performed using R (version 3.6.1; The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria). All figures were realized with GraphPad Prism software (version 9.1.1 223; extract from <https://www.graphpad.com>).

3. Results

3.1. Food Consumption

The participants consumed an average daily calorie intake of $2457 \pm 580 \text{ kcal} \cdot \text{day}^{-1}$, consisting of 66% carbohydrates, 18% proteins, and 16% fat. The mean PRAL values for BIC and PLA were $-5.56 \pm 23.22 \text{ mEq}$ and $-3.09 \pm 19.55 \text{ mEq}$, respectively. There was no significant difference in PRAL between the PLA and BIC groups ($p > 0.05$).

3.2. Performance

During the experimental phase, the athletes achieved an average of 98% of their personal season's best performance (PB) in the 400 m race, with a mere difference of a few tenths of a second between their best and their performance in the 400 m race. The performance levels of athletes in the 400 m race between the PLA and BIC groups were not significantly different ($p > 0.05$).

The PLA group's average performance after the first 400 m race was $53.70 \pm 2.68 \text{ s}$ for male athletes and $61.10 \pm 1.68 \text{ s}$ for female athletes. The average performance after the third 400 m race was $53.47 \pm 2.69 \text{ s}$ for male athletes and $61.17 \pm 1.99 \text{ s}$ for female athletes. There was no significant difference between three consecutive 400 m races ($p > 0.05$). The split time at the 200 m race mark for the PLA group between three consecutive daily 400 m races was not significantly different ($p > 0.05$). The time for the last 200 m for the PLA group between the first, the second, and the third consecutive daily 400 m race were not significantly different ($p > 0.05$). (Figure 2A).

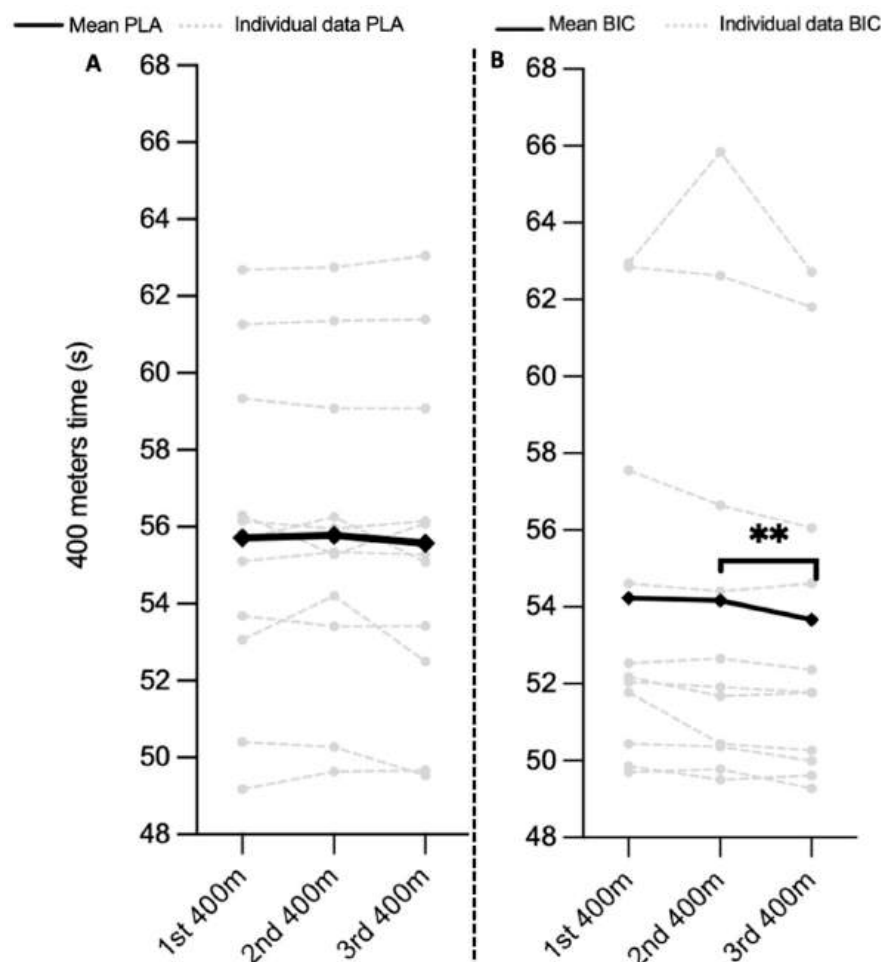


Figure 2. Performance (in seconds). The PLA and BIC group completed a 400 m race on Day 4 (D4), Day 5 (D5), and Day 6 (D6). Significant differences represented by ** $p < 0.01$. (A) Tendances de la performance sur 400 m pour le groupe PLA. (B) Tendances de la performance sur 400 m pour le groupe BIC.

The BIC group's average performance after the first 400 m race was 52.30 ± 2.49 s for male athletes and 62.90 ± 0.70 s for female athletes. The average performance after the third 400 m race was 51.74 ± 1.99 s for male athletes and 62.26 ± 0.65 s for female athletes. The times between the first and second with the third 400 m were significantly different ($p = 0.01$). The intermediate time at 200 m for the BIC group between three consecutive daily 400 m races was not significantly different ($p > 0.05$). The times for the last 200 m for the BIC group between the first and the second with the third 400 m races were significantly different ($p = 0.01$) (Figure 2B). BIC group athletes slowed down less during the second 200 m of the third 400 m race compared to the first (second 200 m of the third 400 m: 28.40 ± 2.75 s vs. second 200 m of the first 400 m: 28.96 ± 2.80 s; $p = 0.01$).

3.3. Perception of Effort and Motivation

The motivation and perceived effort between the PLA and BIC groups were not significantly different ($p < 0.05$) during the first and third 400 m races (Table 2).

Table 2. Measurement performance, squat jump, and Handgrip before and motivation and Borg (pre) after (post 4', post 8', post 20', and post 1 h) the 1st and 3rd 400 m for the PLA and BIC groups (N = 11). A difference was considered significant for $p < 0.05$. All data reported as mean $\pm$ SD. Significant differences represented by ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ between pre and post.

2A		PLA		
Variables	1st 400 m Mean $\pm$ sd	2nd 400 m Mean $\pm$ sd	3rd 400 m Mean $\pm$ sd	1st vs. 3rd 400 m p Value
Performance (s)	55.71 $\pm$ 4.19	55.55 $\pm$ 4.17	55.57 $\pm$ 4.34	0.28
1st 200 m (s)	26.13 $\pm$ 1.86	26.22 $\pm$ 1.87	26.13 $\pm$ 1.86	0.97
2nd 200 m (s)	29.58 $\pm$ 2.49 ***	29.33 $\pm$ 2.64 ***	29.44 $\pm$ 2.57 ***	0.28
Motivation Pre	1.82 $\pm$ 0.75	2.27 $\pm$ 1.06	2.64 $\pm$ 1.12	0.01
Motivation Post	3.00 $\pm$ 1.41 **	3.09 $\pm$ 1.23 **	3.00 $\pm$ 1.10	1
Borg Pre	1.21 $\pm$ 1.45	1.18 $\pm$ 1.01	1.64 $\pm$ 1.16	0.46
Borg Post	4.54 $\pm$ 2.73 ***	4.14 $\pm$ 2.19 ***	5.00 $\pm$ 2.41 ***	0.58
2B		BIC		
Variables	1st 400 m Mean $\pm$ sd	2nd 400 m Mean $\pm$ sd	3rd 400 m Mean $\pm$ sd	1st vs. 3rd 400 m p Value
Performance (s)	54.23 $\pm$ 4.83	54.16 $\pm$ 5.45	53.66 $\pm$ 4.74	0.01
1st 200 m (s)	25.27 $\pm$ 2.09	25.61 $\pm$ 2.29	25.40 $\pm$ 2.10	0.93
2nd 200 m (s)	28.96 $\pm$ 2.80 ***	28.55 $\pm$ 3.24 ***	28.40 $\pm$ 2.75 ***	0.01
Motivation Pre	1.91 $\pm$ 0.83	2.82 $\pm$ 1.89	2.64 $\pm$ 1.12	0.04
Motivation Post	2.64 $\pm$ 1.04	2.82 $\pm$ 1.08	2.36 $\pm$ 1.03	0.54
Borg Pre	2.59 $\pm$ 2.02	2.09 $\pm$ 2.22	2.00 $\pm$ 1.69	0.13
Borg Post	5.32 $\pm$ 1.98 ***	4.77 ** $\pm$ 1.79	4.5 ** $\pm$ 2.38	0.19

In the PLA and BIC groups, motivation before the race between the first and third 400 m race was significantly higher ($p < 0.05$). The motivation after the race for the PLA and BIC groups between the first and third 400 m races was not significantly different ($p > 0.05$) (Table 2A,B).

For both the PLA and BIC groups, the perceived effort between the first and third 400 m race was not significantly different ($p > 0.05$) (Table 2A,B).

3.4. Indirect Fatigue Markers

For the PLA group, the SJ height was not significantly different between pre-race, which was 35.79 ± 5.79 cm, and post-race, which was 33.53 ± 5.38 cm ($p = 0.09$; ES = 0.1), during the first 400 m race. The SJ was significantly different between pre-race, which was 36.26 ± 5.37 cm, and post-race, which was 33.51 ± 6.12 cm ($p = 0.05$; ES = 0.3), during the third 400 m race. SJ measurements before and after were not significantly different between the first and third 400 m races (Table 2A).

For the BIC group, the SJ height was not significantly different between pre-race, which was 38.22 ± 6.52 cm, and post-race, which was 36.53 ± 5.14 cm ($p = 0.12$; ES = 0.2), during the first 400 m race. However, SJ was significantly different between the pre-race measurement, which was 39.30 ± 6.07 cm, and the post-race measurement, which was 35.79 ± 4.95 cm ($p < 0.001$; ES = 0.4), during the third 400 m race. The SJ measurements before and after the race were not significantly different between the first and third 400 m races (Table 2B). The SJ between the PLA and BIC groups was not significantly different ($p < 0.05$) (Figure 3).

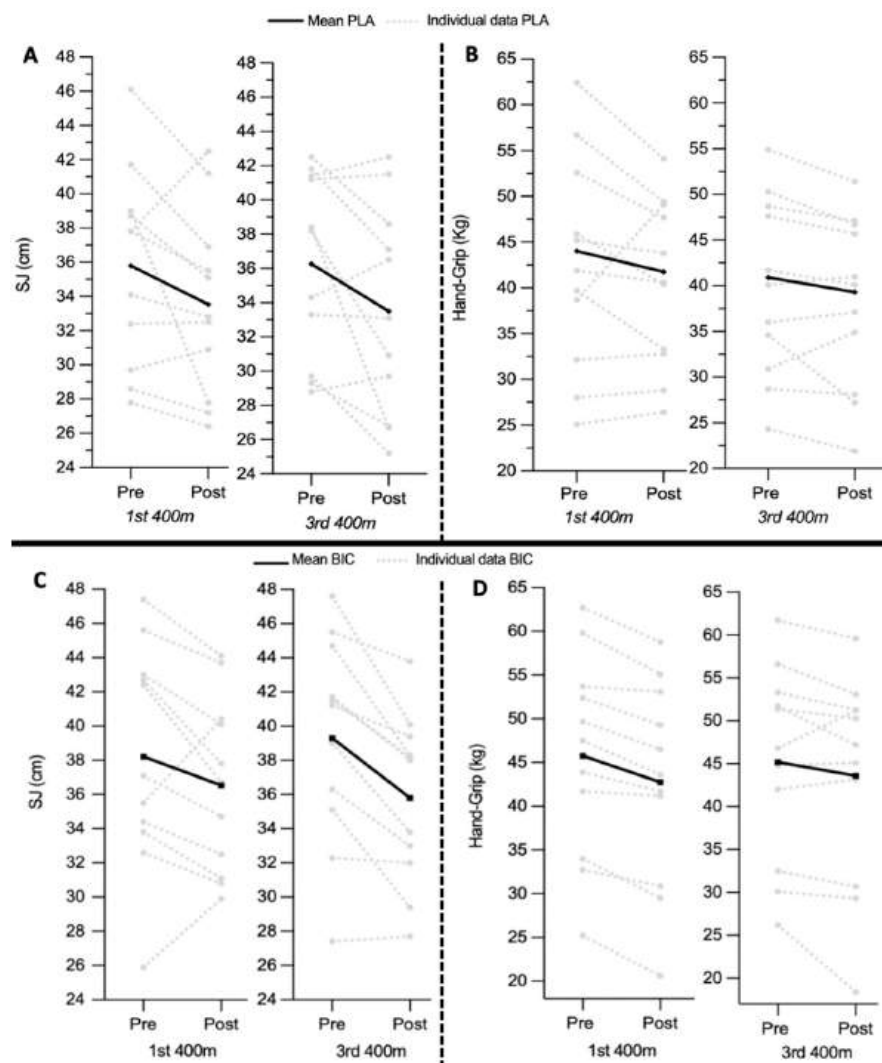


Figure 3. Jump height (SJ in cm) and Handgrip strength (Handgrip in Kg) before and after each 400 m race with passive recovery. Pre = measurement taken before the warm-up; Post 4' = measurement taken immediately after the 400 m; +8', +20', and +1 h = measurements taken 8, 20 min, and 1 h after the 400 m. (A,B) Jump height (SJ in cm) and Handgrip strength (Handgrip in Kg) before and after each 400 m run with passive recovery for the PLA group. (C,D) Jump height (SJ in cm) and Handgrip strength (Handgrip in Kg) before and after each 400 m run with passive recovery for the BIC group.

For the PLA group, HG measurements pre-race and post-race were not significantly different during the first and third 400 m races ($p > 0.05$; $ES = 0.15$). HG measurements pre-race were not significantly different between the first and third 400 m races (Table 2A). In the BIC group, HG measurements between pre-race (before: 45.57 ± 11.67 kg) and post-race (after: 42.75 ± 11.7 kg) during the first 400 m race were significantly different ($p < 0.001$; $ES = 0.18$). HG measurements between pre-race and post-race during the third 400 m race were not significantly different ($p = 0.12$; $ES = 0.13$). HG measurements pre-race and post-race were not significantly different between the first and third 400 m races (Table 2B). The HG strength between PLA and BIC groups did not show a significant difference ($p < 0.05$) (Figure 3).

3.5. Blood Metabolic Biomarkers

For the PLA group, the minimal average concentrations for the PLA group of bicarbonate [HCO_3^-], blood base excess [BCEf], and blood pH following the three 400 m race in the PLA group were, respectively, pH: 6.95 ± 0.03 ; [HCO_3^-]: 6.50 ± 1.51 mmol/L; [BCEf]:

-24.58 ± 2.13 mmol/L. For the PLA group, the concentrations of bicarbonate [HCO_3^-], blood base excess [BCef], and blood pH were not significantly different between the first and third 400 m race ($p > 0.05$; as reported in Table 3A).

Table 3. Measurements of blood bicarbonate concentration, blood pH, blood lactate concentration, and base excess concentration, before (pre) and after (post 4', post 8', post 20', and post 1 h) the 1st, 2nd, and 3rd 400 m for the PLA and BIC groups (N = 11). A difference was considered significant for $p < 0.05$. All data reported as mean $\pm$ SD. Significant differences represented by * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$; # Significant differences represented between PLA and BIC group.

3A		PLA		
Variables	1st 400 m Mean $\pm$ sd	2nd 400 m Mean $\pm$ sd	3rd 400 m Mean $\pm$ sd	1st vs. 3rd 400 m <i>p</i> Value
Pre HCO_3^-	24.41 $\pm$ 1.55	23.79 $\pm$ 2.11	23.75 $\pm$ 1.69	0.31
Post 4' HCO_3^-	6.70 $\pm$ 1.44 ***	7.25 $\pm$ 1.36 ***	7.25 $\pm$ 1.62 ***	0.27
Post 8' HCO_3^-	6.42 $\pm$ 1.63 ***	6.01 $\pm$ 1.41 ***	6.58 $\pm$ 1.39 ***	0.73
Post 1 h HCO_3^-	20.67 $\pm$ 2.20 ***	21.72 $\pm$ 2.32 *	21.05 $\pm$ 2.50 ***	0.48 #
HCO_3^- max	24.41 $\pm$ 1.55	23.79 $\pm$ 2.11	23.75 $\pm$ 1.69	0.31
HCO_3^- min	6.42 $\pm$ 1.63 ***	6.01 $\pm$ 1.41 ***	6.58 $\pm$ 1.39 ***	0.73
pH Pre	7.32 $\pm$ 0.05	7.33 $\pm$ 0.04	7.30 $\pm$ 0.02	0.31
pH Post 4'	6.97 $\pm$ 0.05 ***	6.97 $\pm$ 0.04 ***	6.97 $\pm$ 0.06 ***	0.72
Post 8' pH	6.95 $\pm$ 0.06 ***	6.93 $\pm$ 0.05 ***	6.95 $\pm$ 0.04 ***	0.33
pH Post 1 h	7.28 $\pm$ 0.03	7.31 $\pm$ 0.06	7.29 $\pm$ 0.04	0.56
pH min	6.42 $\pm$ 1.63 ***	6.01 $\pm$ 1.41 ***	6.58 $\pm$ 1.39 ***	0.73
pH max	6.95 $\pm$ 0.06 ***	6.93 $\pm$ 0.05 ***	6.95 $\pm$ 0.04 ***	0.33
Pre BCef	-1.20 $\pm$ 2.25	-2.18 $\pm$ 2.33	-2.64 $\pm$ 1.86	0.15
Post 4' BCef	-24.70 $\pm$ 2.06 ***	-24.82 $\pm$ 1.94 ***	-24.46 $\pm$ 2.21 ***	0.74
Post 8' BCef	-25.40 $\pm$ 2.55 ***	-26.5 $\pm$ 2.14 ***	-25.40 $\pm$ 1.78 ***	0.85
Post 1 h BCef	-5.65 $\pm$ 3.17 ***	-4.45 $\pm$ 2.92 *	-5.64 $\pm$ 2.80 ***	0.80
BCef min	-25.40 $\pm$ 2.55 ***	-26.5 $\pm$ 2.14 ***	-25.40 $\pm$ 1.78 ***	0.85
BCef max	-1.20 $\pm$ 2.25	-2.18 $\pm$ 2.33	-2.64 $\pm$ 1.86	0.15
Lactate Pre	1.65 $\pm$ 0.47	1.74 $\pm$ 0.56	1.66 $\pm$ 0.36	0.93
Lactate Post 4'	20.49 $\pm$ 3.92 ***	19.81 $\pm$ 2.40 ***	19.71 $\pm$ 1.43 ***	0.46
Lactate Post 8'	19.09 $\pm$ 2.68 ***	19.04 $\pm$ 0.70 ***	18.75 $\pm$ 2.23 ***	0.73
Lactate Post 20'	15.99 $\pm$ 3.54 ***	13.93 $\pm$ 3.09 ***	12.92 $\pm$ 2.34 ***	0.03
Lactate Post 1 h	4.91 $\pm$ 1.72 ***	3.77 $\pm$ 1.31 ***	4.56 $\pm$ 1.35 ***	0.5
Lactate max	20.49 $\pm$ 3.92 ***	19.81 $\pm$ 2.40 ***	19.71 $\pm$ 1.43 ***	0.46
Lactate min	1.65 $\pm$ 0.47	1.74 $\pm$ 0.56	1.66 $\pm$ 0.36	0.93
3B		BIC		
Variables	1st 400 m Mean $\pm$ sd	2nd 400 m Mean $\pm$ sd	3rd 400 m Mean $\pm$ sd	1st vs. 3rd 400 m <i>p</i> Value
Pre HCO_3^-	27.47 $\pm$ 1.94 #	24.79 $\pm$ 4.75	24.95 $\pm$ 2.15	0.001
Post 4' HCO_3^-	7.61 $\pm$ 0.71 ***	7.79 $\pm$ 1.50 ***	7.67 $\pm$ 1.56 ***	0.73
Post 8' HCO_3^-	6.83 $\pm$ 0.87 ***	7.05 $\pm$ 1.10 ***#	6.51 $\pm$ 1.11 ***	0.12
Post 1 h HCO_3^-	24.01 $\pm$ 2.45 ***#	23.77 $\pm$ 2.82	23.26 $\pm$ 2.94	0.48
HCO_3^- max	27.47 $\pm$ 1.94 #	24.79 $\pm$ 4.75	24.95 $\pm$ 2.15 #	0.001
HCO_3^- min	6.83 $\pm$ 0.87 ***	7.05 $\pm$ 1.10 ***	6.51 $\pm$ 1.11 ***	0.12
pH Pre	7.37 $\pm$ 0.05 #	7.34 $\pm$ 0.05	7.33 $\pm$ 0.04 #	0.03
pH Post 4'	6.96 $\pm$ 0.04 ***	6.98 $\pm$ 0.07 ***	6.94 $\pm$ 0.04 ***	0.16
Post 8' pH	6.97 $\pm$ 0.06 ***	6.97 $\pm$ 0.05 ***#	6.94 $\pm$ 0.02 ***	0.18
pH Post 1 h	7.32 $\pm$ 0.05 *#	7.31 $\pm$ 0.04 *	7.31 $\pm$ 0.03	0.56
pH min	6.96 $\pm$ 0.04 ***	6.97 $\pm$ 0.05 ***	6.94 $\pm$ 0.04 ***	0.16
pH max	7.37 $\pm$ 0.05 #	7.34 $\pm$ 0.05	7.33 $\pm$ 0.04	0.03
Pre BCef	2.33 $\pm$ 2.74 #	-0.09 $\pm$ 3.24	-1 $\pm$ 2.41	0.03
Post 4' BCef	-24.67 $\pm$ 0.50 ***	-23.8 $\pm$ 2.44 ***	-24.64 $\pm$ 2.01 ***	0.63
Post 8' BCef	-25.13 $\pm$ 1.81 ***	-24.8 $\pm$ 1.87 ***	-25.89 $\pm$ 1.36 ***	0.85
Post 1 h BCef	-2.3 $\pm$ 3.09 ***#	-2.45 $\pm$ 3.17 ***	-2.91 $\pm$ 3.45 #	0.94
BCef min	-25.13 $\pm$ 1.81 ***	-24.8 $\pm$ 1.87 ***	-25.89 $\pm$ 1.36 ***	0.85

Table 3. Cont.

Variables	3B	BIC		
	1st 400 m Mean $\pm$ sd	2nd 400 m Mean $\pm$ sd	3rd 400 m Mean $\pm$ sd	1st vs. 3rd 400 m <i>p</i> Value
BCef max	2.33 $\pm$ 2.74	−0.09 $\pm$ 3.24	−1 $\pm$ 2.41	0.03
Lactate Pre	1.5 $\pm$ 0.32	1.75 $\pm$ 0.46	1.42 $\pm$ 0.36	0.44
Lactate Post 4'	21.69 $\pm$ 1.45 ***	21.27 $\pm$ 2.17 ***	21.45 $\pm$ 2.98 ***#	0.78
Lactate Post 8'	20.31 $\pm$ 2.28 ***	20.37 $\pm$ 2.38 ***	20.63 $\pm$ 2.94 ***	0.75
Lactate Post 20'	16.48 $\pm$ 1.92 ***	15.51 $\pm$ 2.46 ***	14.26 $\pm$ 2.71 ***	0.05
Lactate Post 1 h	3.62 $\pm$ 1.14 ***#	3.18 $\pm$ 0.80 ***	3.39 $\pm$ 1.32 ***#	0.64
Lactate max	21.69 $\pm$ 1.45 ***	21.27 $\pm$ 2.17 ***	21.45 $\pm$ 2.98 ***	0.78
Lactate min	1.5 $\pm$ 0.32 #	1.75 $\pm$ 0.46	1.42 $\pm$ 0.36 #	0.44

For the BIC group, the minimal average concentrations of bicarbonate [HCO_3^-], blood base excess [BCef], and blood pH following the three 400 m race group were, respectively, pH: 6.95 ± 0.02 ; [HCO_3^-]: 6.67 ± 0.99 mmol/L; [BCef]: -24.65 ± 1.26 mmol/L. For the BIC group, only the pre-concentrations and maximum concentrations of [HCO_3^-], blood [BCef], and blood pH were significantly different ($p < 0.05$; as reported in Table 3B).

During the first and third 400 m races for the PLA and BIC groups, the minimum blood [HCO_3^-] and pH values occurred at post 8', while the maximum blood [La] was at post 4' (Table 3B). The concentrations of bicarbonate [HCO_3^-], blood base excess [BCef], and maximum blood pH before and after 1 h for the first and third 400 m were significantly higher for the BIC group compared to the PLA group ($p < 0.01$) (Figure 4C,D). Only the blood [La] at post 1 h during the first and third 400 m race, as well as at post 4' during the third 400 m race, were significantly higher for the BIC group compared to the PLA group ($p < 0.03$).

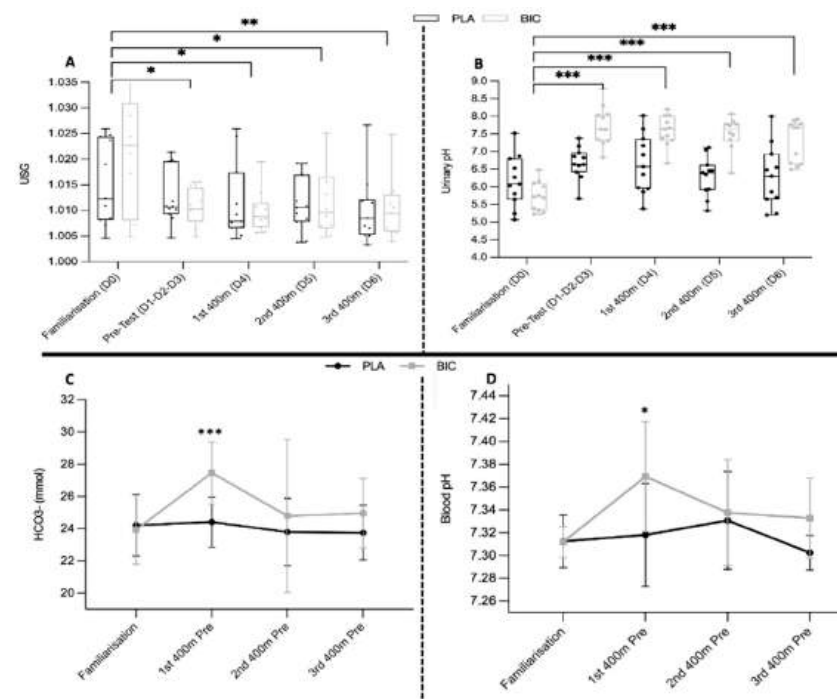


Figure 4. Evolution of biomarkers in urine and blood (A,B), including urinary pH (pH urinary) and urinary specific gravity (USG). Urine was collected throughout Day 0 (familiarization), D1, D2, and D3 (pre-test) and during the days of simulated competition (D4, D5, and D6). * Indicates a significantly different value ($p < 0.05$) (C,D). Blood pH and blood bicarbonate concentration ([HCO_3^-]) collected on the 1st day (D0 = familiarization) and before warming up during the days of simulated competition (Pre: D4, D5, and D6). Significant differences represented by * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

The lactate values were significantly higher for the BIC group compared to the PLA group post 1 h with the first 400 m, post 4 min, and post 1 h after the 400 m.

For the PLA group, the maximum blood lactate concentration was 21.33 ± 2.93 mmol/L after the first 400 m and 20.16 ± 1.52 mmol/L after the third 400 m. Only the blood lactate concentration after 20 min was significantly higher between the third and the first 400 m race ([La] first 400 m: 15.99 ± 3.54 mmol/L; [La] third 400 m: 12.92 ± 2.34 mmol/L; $p < 0.03$).

For the BIC group, the maximum blood lactate concentration was 20.46 ± 2.16 mmol/L after the first 400 m and 21.99 ± 2.97 mmol/L after the third 400 m. Only the blood lactate concentration after 20 min was significantly higher between the third and the first 400 m race ([La] first 400 m: 16.48 ± 1.92 mmol/L; [La] third 400 m: 14.26 ± 2.71 mmol/L; $p < 0.05$).

3.6. Urinary Markers

Urinary pH measured after a 24 h urine collection was significantly higher ($p < 0.001$) between the first visit (familiarization: D0) and the third, fourth, fifth, and sixth days of BIC water consumption (D3: 7.74 ± 0.55 ; D4: 7.58 ± 0.44 ; D5: 7.51 ± 0.48 ; D6: 7.27 ± 0.60 ; $p < 0.001$) (Figure 4B). Urinary pH was significantly higher in the BIC group compared to the PLA group after consuming bicarbonate-rich water (BIC) compared to placebo water (PLA) ($p < 0.001$).

Urine specific gravity (USG) measured after a 24 h urine collection was significantly lower ($p < 0.05$) between the first visit (familiarization: D0) and the third, fourth, fifth, and sixth days of BIC water consumption (D0: 1.031 ± 0.003 ; D3: 1.01 ± 0.001 ; D4: 1.01 ± 0.001 ; D5: 1.012 ± 0.001 ; D6: 1.01 ± 0.001) (Figure 4A). Urine specific gravity did not differ significantly between the BIC and PLA groups after drinking bicarbonate-rich water (BIC) compared to placebo water (PLA) ($p < 0.001$).

4. Discussion

Our results suggest that athletes demonstrated the ability to precisely replicate the same level of performance during a simulated three-day 400 m race with no increase in markers associated with fatigue. Athletes were also capable of achieving similarly high levels of metabolic during a competition simulation, involving a sequence of three 400 m races, with an improvement in lactate clearance after a 20 min recovery following the third race compared to the first two. Finally, the positive effects of alkaline nutrition and hydration on the nutritional aspect were also noteworthy, influencing the body's acid-base status and overall performance.

This study was the first to examine the consequences of a daily sequence of three 400 m races on the physiological determinants of performance. To address this issue, we deliberately recruited highly trained athletes specialized in the 400 m race, training 5 to 6 times per week. During the test period designed to replicate the characteristics of a real competition, this simulated event included a specific warm-up, a call room, a direct confrontation race with a start from starting blocks, and three consecutive races within 72 h, mirroring the format of heats, semi-finals, and finals. Additionally, athletes were required to follow their optimal pacing strategy specifically developed to achieve the best performance in competition [28], which included a fast start and maintaining speed, followed by an inevitable decline. All athletes adhered well to the instructions, achieving 98% of their best season performance, and consistently recorded a second 200 m slower than the first in each 400 m race.

The 400 m race demands a high level of commitment and motivation to achieve optimal performance. The commitment and motivation required for this type of effort are challenging to replicate in laboratory tests, not to mention the specificity of the 400 m race, which involves pace variations, particularly during the final 100 m [2]. Kindermann and Keul (1977) [29] and Schanebel and Kindermann (1983) [30] showed that blood lactate concentrations were significantly higher in high-level athletes during international competitions than after laboratory tests. This is why we chose to conduct these 400 m races in ecological conditions (on the track) rather than in more standardized laboratory

conditions. Given the indispensability of this subjective parameter in performance, we assessed the level of motivation and perceived effort difficulty (Borg CR-10) after each 400 m race. These two parameters did not show significant differences between the three races and between conditions of supplementation, indicating a consistent level of athlete engagement throughout the entire protocol ($p > 0.05$; Table 2A,B). Furthermore, a higher level of motivation was observed in both groups prior to the third race in comparison to the first race ($p < 0.05$), as would be expected in a competition with a final.

Continuing the work of Chiron et al., 2024 [23], participants were instructed to follow an alkaline diet, emphasizing the consumption of fruits and vegetables over animal-derived foods combined with the intake of two liters of bicarbonate-rich water or placebo, to influence the body's acid-base balance. Consistent with Remer and Manz's (1995) [19] research, the negative PRAL value for the BIC group (-5.56 ± 23.22 mEq) indicated strong adherence to nutritional guidelines. The urinary density in the BIC group was significantly lower than the PLA group from the initial visit until the days following BIC water supplementation, indicating a notable effect. The combination of an alkalizing diet and chronic consumption of bicarbonate-rich water influenced the resting acid-base balance, leading to a significant increase in urinary pH throughout the protocol. This nutritional strategy also impacted blood biomarkers, resulting in elevated blood bicarbonate concentration and blood pH at rest on the third day of the protocol. These changes indicate an enhanced buffering capacity facilitated by both the alkalizing diet and bicarbonate water supplementation.

Furthermore, it should be noted that bicarbonate-rich water contains more sodium and potassium than the placebo, which may improve hydration and potentially anaerobic performance [31]. However, in our study, hydration was not a limiting factor due to the short duration of the event (less than 1 min), similar to findings in endurance performance studies [32]. Additionally, subjects began the exercise well hydrated (USG < 1.02), which did not significantly affect final body temperature or perceived exertion [33]. The additional 220 mg of potassium provided by bicarbonate-rich water was also below the threshold expected to have a significant physiological effect [34,35]. Therefore, the differences in sodium and potassium composition between bicarbonate-rich water and the placebo likely had minimal impact on our results.

The participants in the PLA group were able to achieve three performances at their record level equivalent to 98% of their best season performances in the 400 m race (Table 2). In contrast to the participant levels included in the literature studies, our participants were specialized athletes in the 400 m race, considered expert subjects according to McKay et al. (2022) [24]. The expertise of our participants allowed them to manage their races effectively, thereby avoiding the consequences of pacing strategies on the evolution of blood biomarkers [23]. Furthermore, the large standard deviation (SD) among the subjects could be explained by the fact that the average performances reported after the 400 m races include both male and female athletes. If we consider only the performances of male athletes, the intra-group standard deviation would be, on average, 2.66 s for the PLA group and 1.64 s for the BIC group. This is comparable to the performance variability reported in previous studies [2,3], and it could be assumed that this will have no impact on blood metabolic responses [5,16], which do not differ between sexes from the age of 14 onwards [36].

While the performance of athletes in the PLA group did not show a significant difference, all athletes in the BIC group ran their third 400 m race an average of 0.57 s faster than the first, representing a performance improvement of 1.05% (third 400 m: 53.66 ± 4.74 s compared to first 400 m: 54.23 ± 4.83 s; $p = 0.01$), with no significant changes in blood acid-base balance biomarkers. Specifically, the third 400 m was significantly faster on average for the athletes in the BIC group. It was observed that the BIC group athletes slowed down less during the second 200 m of the third 400 m race compared to the first (second 200 m of the third 400 m: 28.40 ± 2.75 s vs. second 200 m of the first 400 m: 28.96 ± 2.80 s; $p = 0.01$). Therefore, the BIC group exhibited a faster completion time in the second half of the race,

corresponding to the final 200 m, during the third 400 m race. Additionally, it is important to note that the subjects served as their own controls, and the study was conducted in a double-blind manner. It could, therefore, be postulated that the observed improvement in performance exhibited by the BIC group between the second and third 400 m races may be attributed to the alkalizing diet in conjunction with bicarbonate-rich water, which may delay the negative effects of metabolic acidosis on muscle performance [23].

In accordance with these results, Chycki et al. (2018) [37] also demonstrated in a double Wingate test involving the lower and upper limbs in trained athletes from combat sports, an increase in power after the consumption of alkaline water versus placebo water. Simultaneously, Limmer et al. (2018) [20] reported also a 2.3% improvement in performance in 400 m races in non-specialized male athletes after implementing an alkalizing diet for 4 days, whereas in our study we found an increase of 1.05% but in high-level athletes who were experts in 400 m race.

Conversely, no performance improvement was demonstrated after an alkalizing diet combined with the consumption of bicarbonate-rich water in a single one-minute Wingate test on a rowing ergocycle [23], which could be explained by the participants' effort management, leading to various pacing strategies. Furthermore, our present study emphasizes the relevance of implementing nutritional strategies for optimizing performance in the context of H-I exercise sequences. These strategies modify the body's acid-base balance by optimizing the buffering capacity to improve performance in anaerobic-dominant exercises. Other strategies, such as sodium bicarbonate supplementation through capsules, may optimize the body's buffering capacity and improve performance [5,33,38]. However, in addition to the fact that some coaches and/or athletes do not wish to systematize this type of supplementation, the implementation of these strategies can also lead to gastrointestinal issues [39]. Thus, the implementation of natural nutritional strategies aimed at modifying the body's acid-base balance to optimize buffering capacity seems to be effective for improving performance in anaerobic-dominant exercises.

Aiming to anticipate the potential influence of different pacing strategies, we also collected indirect markers of fatigue after each 400 m race using an HG test and an SJ test. In the current study, athletes in the PLA group were able to repeat three consecutive daily 400 m races at 98% of their best season performance without an increase in fatigue, also measured from the grip HG and SJ height. We did not find a significant difference between the pre- and post-levels of central fatigue, evaluated indirectly using an HG [40] after a 400 m race. This result supports those of previous literature, indicating that a 400 m race does not necessarily induce central fatigue [26,41].

Additionally, as SJ performance has often been used as an independent muscular indicator to assess knee extensor fatigue separately from high-intensity sprint exercise [42] and as sprinters exhibited a greater jump difference between performances in the SJ compared to the CMJ [43], we have chosen to use the SJ to indirectly assess neuromuscular fatigue following a 400 m race. The performance in SJ showed an average decrease of 7.5% between the pre-test and post-test, with no significant difference observed during the initial 400 m race ($p = 0.09$; $ES = 0.3$) and a significant difference noted during the third race ($p < 0.05$). Nummela and colleagues (1992) demonstrated a 39% reduction in jump height between before and after the 400 m race [26]. However, it is worth noting that the exercise employed in this study was a drop jump, which could be considered much more demanding due to the eccentric phase and elastic qualities involved, in comparison to an SJ, which may justify differences with the results obtained in our study [44]. Considering the evolution of these indirect markers of fatigue, we can conclude that in highly trained athletes, three consecutive daily 400 m races do not induce cumulative and delayed fatigue and that pre-exercise metabolic alkalosis has no beneficial effect.

Minimum $[HCO_3^-]$ and blood pH values and maximum lactate concentrations during the three consecutive daily 400 m races showed that highly trained athletes were consistently able to activate the glycogenolytic and glycolytic pathways in both PLA and BIC conditions, leading to the exact same level of extreme metabolic disturbances. In

PLA and BIC conditions, similar values were observed in the highest blood lactate concentrations after each 400 m race, comparable to those reported in elite and well-trained athletes [2,3]. Furthermore, the lowest blood pH values (first 400 m 6.96 ± 0.04 ; second 400 m post 4': 6.98 ± 0.07 mmol; third 400 m post 4': 6.94 ± 0.04 mmol) and bicarbonate concentrations (first 400 m post 4': 7.61 ± 0.71 ; second 400 m, 7.79 ± 1.50 mmol; third 400 m 7.67 ± 1.56 mmol) observed in our study revealed a state of extreme metabolic acidosis, similar to previous results obtained only after an acute simulated 400 m race [2]. This indicates that athletes can produce and sustain extreme blood metabolic perturbations in three days. Subsequently, these metabolic perturbations can be rapidly regulated by athletes due to the development of their physical capacity through training, compared to less-trained or sedentary athletes [45–48].

Furthermore, the muscular perturbations reported in previous studies on H-I exercise-induced alterations in blood lactate removal [49], lactate transport capacity [11], MCT content [8,9], buffer capacity [7], and oxidative capacity [13,14,16] during and after acute high-intensity exertion performed until exhaustion seem to be transient after each race of recovery. Indeed, contrary to our hypotheses, athletes in this study were able to replicate precisely the same degree of metabolic perturbations every 24 h over three days. This aligns with the notion that training does not protect against the deleterious effects induced by exercise performed until exhaustion on skeletal muscle [7,11]. However, it enables the highest production, transport, and removal of a large quantity of lactate/ H^+ , indicating a high energetic demand for glycogenolysis and glycolysis and, therefore, a high ATP production. It also allows for the tolerance of extreme levels of blood metabolic acidosis [4], coupled with a significant depletion of bicarbonate, observed exclusively in elite or world-class athletes [5], and therefore, an improvement in performance.

In addition, a significant decrease in blood lactate concentration was observed in all athletes after a 20 min recovery in PLA and BIC conditions following the third 400 m race (12.92 ± 2.34 mmol.L⁻¹ versus 15.99 ± 3.54 mmol.L⁻¹ and 16.48 ± 1.92 versus 14.26 ± 2.71 mmol.L⁻¹) after the first and third 400 m race. This could be explained by an improvement in blood lactate removal estimated from the mathematical model of Brun et al., 2002 [50], from blood lactate value at 8 and 20 min of recovery, which is in line with previous data in well-trained athletes [47,51,52]. This may indicate an enhancement in lactate transport capacity with or without altering the MCT content [53] and maximal oxidative capacity [54] in these highly trained athletes.

Although we attempted to simulate a competitive context, a championship race represents a considerable psychological stress that can impact athletes' ability to sustain their performances throughout the competition. Indeed, we observed that the performance level remained consistent for the PLA group, representing an average of 98% of the participants' performance level. This 2% difference, though not statistically significant, could be crucial at the elite level during a competition, potentially influencing the attainment of an international medal or a place in the final. Therefore, investigating athletes' capacity in a more ecological context would allow for the assessment of the effects of additional psycho-physiological variables on the ability to replicate a high-level performance.

5. Practical Application

Many athletes use sodium bicarbonate supplements to enhance their body's buffering capacity in sports where the anaerobic lactic energy system plays a significant role. However, taking sodium bicarbonate in capsule form could cause gastrointestinal disturbances [17,21], particularly under the stress of an upcoming international competition, which can impair performance. Additionally, some coaches and athletes may be hesitant to use bicarbonate supplementation in capsule form. As an alternative reported in this study, athletes seeking a more natural and ecological approach can be advised to follow an alkalizing diet (with a negative PRAL value) focused on vegetables and legumes, while limiting animal products, and ensuring a balanced intake of carbohydrates. This should be combined with consuming 1.5 to 2 L of bicarbonate-rich water daily for 3 to 5 days before

the event. Based on our previous work [23], we can assert that the nutritional strategy chosen for this study does not cause digestive issues. Nevertheless, to prevent any adverse effects during competition, this should first be tested during training before being applied in a competitive setting.

6. Conclusions

In conclusion, athletes specializing in 400 m race events demonstrate the ability to replicate their performance at peak levels for three consecutive days with the same extreme level of metabolic disturbance. The incorporation of an alkaline diet, combined with the consumption of bicarbonate-rich water, appears to enhance the repetition of high-intensity interval exercises during a simulated competition.

Author Contributions: Conceptualization, F.C., C.H., E.T. and C.T.; methodology, F.C., M.E., B.G., D.L., C.H., E.T. and C.T.; software, F.C., I.H. and C.T.; validation, F.C., M.E., C.H., E.T. and C.T. formal analysis, F.C., B.G., C.H. and C.T.; investigation, F.C., M.E., B.G., F.B., D.L. and C.T.; resources, F.C. and C.T.; F.C. and C.T.; writing—original draft preparation, F.C., C.H., E.T. and C.T.; writing—review and editing, M.E., D.L., C.H., E.T. and C.T.; visualization, F.C. and C.T.; supervision, C.H., E.T. and C.T.; project administration, C.H., E.T. and C.T. funding acquisition, C.H., E.T. and C.T. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was supported by the ALMA Source group.

Institutional Review Board Statement: All procedures were approved by the ethical committee CERSTAPS (CERSTAPS N° 2022-A00644-39/date of approval 15 March 2022) and conducted in accordance with the Declaration of Helsinki (1964, revised 2001).

Informed Consent Statement: Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

Data Availability Statement: The authors confirm that the data supporting the findings of this study are available within the article.

Acknowledgments: The results of the study are presented clearly, honestly and without fabrication, falsification, or inappropriate manipulation of data. The results of this study are not endorsed by the American College of Sports Medicine. No conflicts of interest, financial or otherwise, have been declared by the authors. The authors would also like to thank the athletes, coaches and Keyne Charlot for their significant contribution, without whom this study would not have been possible.

Conflicts of Interest: The authors declare that this study received funding from ALMA Source groupe. The funder was not involved in the study design, collection, analysis, interpretation of data, the writing of this article or the decision to submit it for publication.

References

1. Hirvonen, J.; Rehnun, S.; Rusko, H.; Harkonen, M. Breakdown of high-energy phosphate compounds and lactate accumulation during short supramaximal exercise. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* **1987**, *56*, 253–259. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
2. Hanon, C.; Lepretre, P.-M.; Bishop, D.; Thomas, C. Oxygen uptake and blood metabolic responses to a 400-m run. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2010**, *109*, 233–240. [\[CrossRef\]](#)
3. Lacour, J.R.; Bouvat, E.; Barthélémy, J.C. Post-competition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expenditure during 400 m and 800-m races. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* **1990**, *61*, 172–176. [\[CrossRef\]](#)
4. Nielsen, H.B. pH after competitive rowing: The lower physiological range? *Acta Physiol. Scand.* **1999**, *165*, 113–114. [\[CrossRef\]](#)
5. Thomas, C.; Delfour-Peyrethon, R.; Dorel, S.; Hanon, C. Positive Effects of Pre-exercise Metabolic Alkalosis on Perceived Exertion and Post-exercise Squat Jump Performance in World-Class Cyclists. *J. Strength. Cond. Res.* **2022**, *36*, 2602–2609. [\[CrossRef\]](#)
6. Robergs, R.; Hutchinson, K.; Hendee, S.; Madden, S.; Siegler, J. Influence of pre-exercise acidosis and alkalosis on the kinetics of acid-base recovery following intense exercise. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2005**, *15*, 59–74. [\[CrossRef\]](#)
7. Bishop, D.; Edge, J.; Mendez-Villanueva, A.; Thomas, C.; Schneiker, K. High-intensity exercise decreases muscle buffer capacity via a decrease in protein buffering in human skeletal muscle. *Pflügers Arch. Eur. J. Physiol.* **2009**, *458*, 929–936. [\[CrossRef\]](#)
8. Bishop, D.; Edge, J.; Thomas, C.; Mercier, J. High-intensity exercise acutely decreases the membrane content of MCT1 and MCT4 and buffer capacity in human skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.* **2007**, *102*, 616–621. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
9. Tonouchi, M.; Hatta, H.; Bonen, A. Muscle contraction increases lactate transport while reducing sarcolemmal MCT4, but not MCT1. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* **2002**, *282*, E1062–E1069. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

10. Dubouchaud, H.; Butterfield, G.E.; Wolfel, E.E.; Bergman, B.C.; Brooks, G.A.; Horii, N.; Hasegawa, N.; Fujie, S.; Uchida, M.; Miyamoto-Mikami, E.; et al. Endurance training, expression, and physiology of LDH, MCT1, and MCT4 in human skeletal muscle. *Am. J. Physiol. Metab.* **2000**, *278*, E571–E579. [\[CrossRef\]](#)
11. Eydoux, N.; Py, G.; Lambert, K.; Dubouchaud, H.; Préfaut, C.; Mercier, J.; Thomas, C.; Bishop, D.J.; Brooks, G.A.; Edge, J.; et al. Training does not protect against exhaustive exercise-induced lactate transport capacity alterations. *Am. J. Physiol. Metab.* **2000**, *278*, E1045–E1052. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
12. Fernström, M.; Bakkman, L.; Tonkonogi, M.; Shabalina, I.G.; Rozhdestvenskaya, Z.; Mattsson, C.M.; Enqvist, J.K.; Ekblom, B.; Sahlin, K. Reduced efficiency, but increased fat oxidation, in mitochondria from human skeletal muscle after 24-h ultraendurance exercise. *J. Appl. Physiol.* **2007**, *102*, 1844–1849. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
13. Layec, G.; Blain, G.M.; Rossman, M.J.; Park, S.Y.; Hart, C.R.; Trinity, J.D.; Gifford, J.R.; Sidhu, S.K.; Weavil, J.C.; Hureau, T.J.; et al. Acute high-intensity exercise impairs skeletal muscle respiratory capacity. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2018**, *50*, 2409–2417. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
14. Hollidge-Horvat, M.G.; Parolin, M.L.; Wong, D.; Jones, N.L.; Heigenhauser, G.J.F. Effect of induced metabolic alkalosis on human skeletal muscle metabolism during exercise. *Am. J. Physiol. Metab.* **2000**, *278*, E316–E329. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Thomas, C.; Delfour-Peyrethon, R.; Lambert, K.; Granata, C.; Hobbs, T.; Hanon, C.; Bishop, D.J. The effect of pre-exercise alkalosis on lactate/pH regulation and mitochondrial respiration following sprint-interval exercise in humans. *Front. Physiol.* **2023**, *14*, 1073407. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
16. Jubrias, S.A.; Crowther, G.J.; Shankland, E.G.; Gronka, R.K.; Conley, K.E. Acidosis inhibits oxidative phosphorylation in contracting human skeletal muscle in vivo. *J. Physiol.* **2003**, *553*, 589–599. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
17. McNaughton, L.; Thompson, D. Acute versus chronic sodium bicarbonate ingestion and anaerobic work and power output. *J. Sports Med. Phys. Fitness* **2001**, *41*, 456–462.
18. Junior, A.H.L.; Painelli, V.d.S.; Saunders, B.; Artioli, G.G. Nutritional Strategies to Modulate Intracellular and Extracellular Buffering Capacity During High-Intensity Exercise. *Sports Med.* **2015**, *45*, 71–81. [\[CrossRef\]](#)
19. Remer, T.; Manz, F. Potential Renal Acid Load of Foods and its Influence on Urine pH. *J. Am. Diet. Assoc.* **1995**, *95*, 791–797. [\[CrossRef\]](#)
20. Limmer, M.; Eibl, A.D.; Platen, P. Enhanced 400 m sprint performance in moderately trained participants by a 4-day alkalizing diet: A counterbalanced, randomized controlled trial. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2018**, *15*, 1–9. [\[CrossRef\]](#)
21. Ragone, L.; Vieira, J.G.; Laterza, M.C.; Leitão, L.; Novaes, J.d.S.; Vianna, J.M.; Dias, M.R. Acute Effect of Sodium Bicarbonate Supplementation on Symptoms of Gastrointestinal Discomfort, Acid-Base Balance, and Performance of Jiu-Jitsu Athletes. *J. Hum. Kinet.* **2020**, *75*, 85–93. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
22. Richard, R.; Jimenez, L.; Duvallet, A.; Rieu, M. Effet d’une boisson bicarbonatée sodée sur les adaptations physiologiques à l’effort. *Sci. Sports* **2000**, *15*, 18–25. [\[CrossRef\]](#)
23. Chiron, F.; Thomas, C.; Bardin, J.; Mullie, F.; Bennett, S.; Chéradame, J.; Caliz, L.; Hanon, C.; Tiollier, E. Influence of consumption of bicarbonate-rich water combined with an alkalizing or acidizing diet on acid-base balance and anaerobic performance. *Human Kinetics* **2024**, *93*, 105–117. [\[CrossRef\]](#)
24. McKay, A.K.; Stellingwerff, T.; Smith, E.S.; Martin, D.T.; Mujika, I.; Goosey-Tolfrey, V.L.; Sheppard, J.; Burke, L.M. Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2022**, *17*, 317–331. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
25. Cacianno, S.L.; Inman, C.L.; E Gockel-Blessing, E.; Weiss, E.P. Effects of dietary Acid load on exercise metabolism and anaerobic exercise performance. *J. Sports Sci. Med.* **2015**, *14*, 364–371. [\[PubMed\]](#)
26. Nummela, A.; Vuorimaa, T.; Rusko, H. Changes in force production, blood lactate and EMG activity in the 400-m sprint. *J. Sports Sci.* **1995**, *10*, 217–228. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
27. Borg, E.; Kaijser, L. A comparison between three rating scales for perceived exertion and two different work tests. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2006**, *16*, 57–69. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Gajer, B. Analyse Descriptive du 400 Meters. Dep DES Sci DU Sport Lab Biomécanique Physiol du Sport. 2002. Available online: <https://insep.hal.science/hal-01924586> (accessed on 30 April 2024).
29. Kindermann, W.; Keul, J. Lactate acidosis with different forms of sport activities. *Can. J. Appl. Sport. Sci.* **1977**, *2*, 177–182.
30. Schnabel, A.; Kindermann, W. Assessment of anaerobic capacity in runners. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* **1983**, *52*, 42–46. [\[CrossRef\]](#)
31. Grgic, J.; Grgic, I.; Del Coso, J.; Schoenfeld, B.J.; Pedisic, Z. Effects of sodium bicarbonate supplementation on exercise performance: An umbrella review. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2021**, *18*, 1–13. [\[CrossRef\]](#)
32. McCubbin, A.J.; Costa, R.J.S. Impact of Sodium Ingestion During Exercise On Endurance Performance: A Systematic Review. *Int. J. Sports Sci.* **2018**, *8*, 97–107.
33. McCubbin, A.J.; Irwin, C. The effect of pre-exercise oral hyperhydration on endurance exercise performance, heart rate, and thermoregulation: A meta-analytical review. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2024**, *49*, 569–583. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
34. Filippini, T.; Naska, A.; Kasdagli, M.; Torres, D.; Lopes, C.; Carvalho, C.; Moreira, P.; Malavolti, M.; Orsini, N.; Whelton, P.K.; et al. Potassium Intake and Blood Pressure: A Dose-Response Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *J. Am. Hear. Assoc.* **2020**, *9*, e015719. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

35. Gonzalez, J.T. Are all sugars equal? Role of the food source in physiological responses to sugars with an emphasis on fruit and fruit juice. *Eur. J. Nutr.* **2024**, 1–17. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
36. Bardin, J.; Maciejewski, H.; Diry, A.; Droit-Volet, S.; Thomas, C.; Ratel, S. Sex- and age-related differences in the rating of perceived exertion after high-intensity rowing exercise during childhood and adolescence. *Psychophysiology* **2023**, *60*, e14296. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
37. Chycki, J.; Kurylas, A.; Maszczyk, A.; Golas, A.; Zajac, A. Alkaline water improves exercise-induced metabolic acidosis and enhances anaerobic exercise performance in combat sport athletes. *PLoS ONE* **2018**, *13*, e0205708. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
38. Grgic, J.; Pedisic, Z.; Saunders, B.; Artioli, G.G.; Schoenfeld, B.J.; McKenna, M.J.; Bishop, D.J.; Kreider, R.B.; Stout, J.R.; Kalman, D.S.; et al. International Society of Sports Nutrition position stand: Sodium bicarbonate and exercise performance. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2021**, *18*, 61. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
39. McNaughton, L.R.; Gough, L.; Deb, S.; Bentley, D.; Sparks, S.A. Recent developments in the use of sodium bicarbonate as an ergogenic aid. *Curr. Sports Med. Rep.* **2016**, *15*, 233–244. [\[CrossRef\]](#)
40. Nybo, L.; Nielsen, B.; Rabelo, P.C.R.; Cordeiro, L.M.S.; Aquino, N.S.S.; Fonseca, B.B.B.; Coimbra, C.C.; Wanner, S.P.; Szawka, R.E.; Soares, D.D.; et al. Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J. Appl. Physiol.* **2001**, *91*, 1055–1060. [\[CrossRef\]](#)
41. Nian, W.; Yufang, D.; Liu, L.; Jiamei, Z.; Dawu, H. Research on the characteristics of lower limb electromyography and fatigue of 400m Sprinters. *Acad. J. Humanit. Soc. Sci.* **2021**, *4*, 13–18. [\[CrossRef\]](#)
42. White, G.E.; Rhind, S.G.; Wells, G.D. The effect of various cold-water immersion protocols on exercise-induced inflammatory response and functional recovery from high-intensity sprint exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2014**, *114*, 2353–2367. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
43. Skurvydas, A.; Dudoniene, V.; Kalvėnas, A.; Zuoza, A. Skeletal muscle fatigue in long-distance runners, sprinters and untrained men after repeated drop jumps performed at maximal intensity. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2002**, *12*, 34–39. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
44. Flanagan, E.P.; Ebben, W.P.; Jensen, R.L. Reliability of the reactive strength index and time to stabilization during depth jumps. *J. Strength Cond. Res.* **2008**, *22*, 1677–1682. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
45. Juel, C. Training-induced changes in membrane transport proteins of human skeletal muscle. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2006**, *96*, 627–635. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
46. Juel, C.; Klarskov, C.; Nielsen, J.J.; Krustrup, P.; Mohr, M.; Bangsbo, J. Effect of high-intensity intermittent training on lactate and H⁺ release from human skeletal muscle. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* **2004**, *286*, E245–E251. [\[CrossRef\]](#)
47. Pilegaard, H.; Bangsbo, J.; Richter, E.A.; Lundby, C.; Robach, P.; Messonnier, L.A.; Emhoff, C.-A.W.; Fattor, J.A.; Horning, M.A.; Carlson, T.J.; et al. Lactate transport studied in sarcolemmal giant vesicles from human muscle biopsies: Relation to training status. *J. Appl. Physiol.* **1994**, *77*, 1858–1862. [\[CrossRef\]](#)
48. Pilegaard, H.; Domino, K.; Noland, T.; Juel, C.; Hellsten, Y.; Halestrap, A.P.; Bangsbo, J. Effect of high-intensity exercise training on lactate/H⁺ transport capacity in human skeletal muscle. *Am. J. Physiol.* **1999**, *276*, E255–E261. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
49. Freund, H.; Oyono-Enguelle, S.; Heitz, A.; Marbach, J.; Ott, C.; Zouloumian, P.; Lampert, E.; Messonnier, L.A.; Emhoff, C.-A.W.; Fattor, J.A.; et al. Work rate-dependent lactate kinetics after exercise in humans. *J. Appl. Physiol.* **1986**, *61*, 932–939. [\[CrossRef\]](#)
50. Brun, A.; Engesgaard, P. Modelling of transport and biogeochemical processes in pollution plumes: Literature review and model development. *J. Hydrol.* **2002**, *256*, 211–227. [\[CrossRef\]](#)
51. Thomas, C.; Perrey, S.; Lambert, K.; Hugon, G.; Mornet, D.; Mercier, J. Monocarboxylate transporters, blood lactate removal after supramaximal exercise, and fatigue indexes in humans. *J. Appl. Physiol.* **2005**, *98*, 804–809. [\[CrossRef\]](#)
52. Thomas, C.; Sirvent, P.; Perrey, S.; Raynaud, E.; Mercier, J. Relationships between maximal muscle oxidative capacity and blood lactate removal after supramaximal exercise and fatigue indexes in humans. *J. Appl. Physiol.* **2004**, *97*, 2132–2138. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
53. Benítez-Muñoz, J.A.; Cupeiro, R.; Rubio-Arias, J.; Amigo, T.; González-Lamuño, D. Exercise Influence on Monocarboxylate Transporter 1 (MCT1) and 4 (MCT4) in the Skeletal Muscle: A Systematic Review. *Acta Physiol.* **2024**, *240*, e14083. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
54. Callahan, M.J.; Parr, E.B.; Hawley, J.A.; Camera, D.M. Can High-Intensity Interval Training Promote Skeletal Muscle Anabolism? *Sports Med.* **2021**, *51*, 405–421. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

DISCUSSION ET CONCLUSION GÉNÉRALE

1. Rappels des objectifs et des résultats du projet de recherche

1.1. Rappel de l'objectif principal

L'objectif principal de ce travail de recherche était d'optimiser, chez des athlètes de haut-niveau, leur capacité à réitérer des performances maximales lors d'exercices de H-I en compétition.

1.2. Rappels du déroulement de la thèse et des résultats principaux

1.2.1. Étude n°1

Nous avons débuté ce travail de thèse par le suivi chronique du stress psychophysiologique d'une athlète olympique pendant six mois afin de déterminer si les différentes périodes d'entraînement (altitude, fortes charges d'entraînement, etc.) et compétitives pouvaient influencer sur son système nerveux autonome en particulier. Les résultats de cette étude ont ainsi mis en évidence une réduction significative du LnRMSSD en position couchée durant les périodes d'entraînement intensif et de stage d'entraînement, en comparaison à la baseline (LnRMSSDsu : 1.55 ± 0.30 (période d'entraînement) ; 1.69 ± 0.18 (stage d'entraînement) ; 1.80 ± 0.14 (baseline) ; $p < 0,05$). De plus, la FC en position couchée a significativement augmenté durant les périodes d'entraînement intensif et de camp d'entraînement en altitude en comparaison à la baseline (FCsu: 52.30 ± 2.56 bpm (entraînement) et 54.53 ± 2.15 bpm (stage d'entraînement en altitude) ; 49.87 ± 2.62 bpm (baseline) ; $p < 0,05$). Enfin, la qualité du sommeil a significativement diminuée durant les périodes de stage d'entraînement et de stage en altitude en comparaison à la baseline (Questionnaire de Spiegel : 25.89 ± 1.76 u.a (stage d'entraînement) ; 25.48 ± 1.85 u.a (stage en altitude) ; 28.00 ± 0.76 u.a (baseline) ; $p < 0,01$). Ceci nous a permis de confirmer que la variabilité de la fréquence cardiaque est un outil efficace pour mettre en exergue les effets du stress psychophysiologique des athlètes de haut-niveau en fonction des différentes périodes d'entraînement et de compétition avant les Jeux-Olympiques.

En parallèle de cette étude, notre équipe avait analysé les résultats d'une étude pilote menée par le Dr. Mounir Chennaoui et Catherine Drogou lors des Championnats d'Europe d'Athlétisme à Berlin. Ils avaient mesuré, en effet, des biomarqueurs salivaires du système neuro-endocrinien (SNE) chez les athlètes de l'équipe de France avant et après leurs épreuves. Ces résultats préliminaires avaient mis en évidence une dérégulation progressive du SNE au fil de la compétition, notamment une incapacité à retrouver les valeurs basales de la testostérone après chaque course, accompagnée d'une diminution progressive des niveaux de cette hormone.

Fort de ces observations et au regard des données de la littérature, nous avons souhaité caractériser plus précisément l'ensemble du stress neuroendocrinien dans des conditions standardisées, avec un nombre défini de sujets. Nous avons ainsi déterminé les effets du stress précompétitif et neuroendocrinien chez des athlètes de niveau international et national lors des Championnats de France Élite.

1.2.2. Étude n°2

Cette deuxième étude réalisée aux Championnats de France Élite à Albi en juillet 2023 a mis en évidence une diminution significativement du RMSSD en position couchée entre la baseline et les courses réalisées en séries (baseline : $110,66 \pm 21,30$ ms ; séries : $92,37 \pm 35,44$ ms ; $p < 0,05$). Cette diminution a été renforcée le matin des finales (finales : $77,40 \pm 48,14$ ms ; $p < 0,05$). Conjointement, la fréquence cardiaque mesurée en position couchée a augmenté significativement entre la baseline et les finales (baseline : $53,63 \pm 3,31$ bpm ; finales : $58,88 \pm 11,00$ bpm ; $p < 0,05$). Au niveau des marqueurs salivaires, les concentrations d'alpha-amylase salivaire ont augmenté significativement entre les mesures pré-course et post-course durant l'ensemble de la compétition ($p < 0,001$). Les niveaux de testostérone salivaire ont diminué significativement entre la baseline et les finales (baseline : $0,0194 \pm 0,0136$ µg/dL ; finales : $0,0158 \pm 0,0070$ µg/dL ; $p < 0,05$). Le ratio T/C a également diminué significativement entre la phase baseline et les différentes phases de la compétition (baseline : $0,0618 \pm 0,0440$; séries : $0,0376 \pm 0,0312$; finales : $0,0387 \pm 0,0257$; $p < 0,001$). Par ailleurs, l'intensité de l'anxiété somatique a augmenté significativement entre la phase baseline et les séries (baseline : $10,14 \pm 2,23$ u.a ; séries : $12,27 \pm 3,28$ u.a ; $p < 0,001$). Enfin, une corrélation significativement négative ($r = -0,75$; $p < 0,05$) obtenue à partir de la soustraction entre le RMSSD et le score CSAI-2R a permis de mettre en évidence que 7 athlètes répondaient davantage au stress induit par la compétition en particulier le premier jour de la compétition (séries).

À la suite de cette évaluation en condition réelle de compétition chez des athlètes de niveau international et national qui a mis en évidence un stress pré-compétitif associé à un stress neuroendocrinien, nous avons eu pour objectif de tester des contre-mesures de gestion du stress précompétitif à travers une approche innovante, la cohérence cardiaque. Pour ce faire, un groupe d'athlètes a effectué quotidiennement des séances de cohérence cardiaque, à mesure de trois fois par jour, en amont d'une simulation de compétitions internationales sur 400 m et les données ont été comparées au groupe PLA.

1.2.3. Étude n°3

Cette troisième étude a mis en évidence au sein du groupe CONT une diminution significative du RMSSD en position couchée entre les jours J4 et J5 alors qu'aucune différence n'a été observée pour le groupe RELAX (J4 : $90,29 \pm 21,26$ ms vs. J5 : $79,58 \pm 20,46$ ms. ; $p < 0,01$) qui a effectué la cohérence cardiaque tout au long de la compétition simulée. Le cortisol salivaire a significativement augmenté dans les deux groupes ($p < 0,001$) entre les valeurs pré-course et post-course au cours des trois jours de course (J4, J5, J6), mais a significativement diminué en post-course dans le groupe CONT entre le J4 et le J6 (post-course J4 : $0,796 \pm 0,385$ µg/dL. ; post-course J6 : $0,494 \pm 0,247$ µg/dL ; $p < 0,01$). Les concentrations en l'IL1-β du groupe CONT ont significativement augmenté significative entre la période pré-test et post-test J5 alors qu'aucune différence n'a été observée pour le groupe RELAX (pré-test J5 : $835,55 \pm 646,20$ pg/mL ; Post-test J5 : $1309,80 \pm 837,50$ pg/mL ; $p < 0,05$). Par ailleurs, la durée du sommeil du groupe RELAX a significativement augmenté entre la période de pré-test et le jour J4 alors qu'aucune différence n'a été observée pour le groupe CONT (pré-test : $24\ 555 \pm 4\ 697$ s ; D4 : $27\ 960 \pm 3\ 684$ s ; $p < 0,05$). Cependant, aucune différence significative n'a été observée sur les performances au 400 mètres.

Le troisième axe de cette thèse a ensuite exploré la régulation du stress métabolique induit par des exercices de H-I et son impact sur la capacité à réitérer de tels efforts en compétition. Nous avons d'abord testé en laboratoire les effets de différentes stratégies nutritionnelles, notamment des régimes alimentaires acidifiants ou alcalinisants évalués selon leur charge PRAL, associés à une consommation d'eau bicarbonatée ou d'un placebo, sur les perturbations métaboliques induites lors d'une épreuve d'aviron de 1 minute en effort maximal.

1.2.4. Étude n°4

Notre quatrième étude a mis en évidence, indépendamment du type d'alimentation, une augmentation significative du pH urinaire après la consommation d'une eau riche en bicarbonate (STY) en comparaison à l'eau placebo (PLA) (J3 : $7,06 \pm 0,50$ (STY) vs. $6,14 \pm 0,46$ (PLA), $p < 0,01$; J6 : $7,02 \pm 0,51$ (STY) vs. $6,28 \pm 0,49$ (PLA), $p < 0,01$). Le pic de lactate sanguin était significativement plus élevé pour les sujets ayant consommés l'eau STY en comparaison de l'eau PLA ([La]_{max} : $13,4 \pm 2,44$ mmol/L (STY) vs. $12,45 \pm 2,65$ mmol/L (PLA), $p < 0,05$). Par ailleurs, la concentration de bicarbonate sanguin [HCO₃⁻] du groupe STY^{ALK} par rapport à PLA^{ALK} a significativement augmenté après l'échauffement ($p < 0,05$) et directement en post-exercice (+0') ($p < 0,01$). Cependant, ces stratégies nutritionnelles n'ont eu

aucun effet significatif sur la performance ($p > 0,05$).

Compte tenu de ces résultats, où la stratégie nutritionnelle alcaline associée à une consommation d'eau bicarbonatée a montré des effets positifs sur la régulation de l'équilibre acido-basique lors d'un exercice de H-I, nous nous sommes ensuite interrogés sur l'impact de cette approche lors de la répétition d'exercices intenses, notamment au cours d'une simulation de compétition de 400 mètres.

1.2.5. Étude n°5

Ensuite, notre dernière étude a mis en évidence une augmentation significative du pH urinaire à l'issue de la consommation d'un régime alcalinisant associé à une eau riche en bicarbonate (BIC) en comparaison à une eau placebo (PLA) ($p < 0,05$). Les concentrations de bicarbonate sanguin [HCO_3^-] et le pH sanguin étaient significativement plus élevés chez le groupe BIC comparé au groupe PLA ($p < 0,01$) en amont du premier 400 m. La performance sur 400 m du groupe BIC a significativement été améliorée de 1,5% lors de la troisième course en comparaison de la première alors qu'aucune différence n'a été observé pour le groupe PLA (BIC : $54,23 \pm 4,83$ s (1^{er} 400 m) vs. $53,66 \pm 4,74$ s (3^{ème} 400 m) $p < 0,01$). Par ailleurs, les concentrations en lactate sanguin des deux conditions étaient significativement moins élevée lors du prélèvement réalisé à post 20min lors de la troisième course en comparaison à la première ($p < 0,05$).

2. Caractériser les effets d'un stress psychophysique

2.1. Quelles sont les effets du stress psychophysique induit par un enchaînement d'exercices à haute-intensité en compétition chez des athlètes élités ?

Comment expliquer la difficulté des athlètes en compétition à reproduire un niveau de performance maximale au regard des résultats discutés ci-dessus ? Il semblerait que le stress induit par un enchaînement d'exercices à H-I ne soit pas uniquement d'origine métabolique, mais inclurait également des composantes psychophysiques, qui peuvent être suivies grâce à une approche complémentaire, telle que l'analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC).

Notre troisième étude nous a ainsi permis de valider l'utilisation de la VFC, mesurée lors d'un test orthostatique, comme outil de suivi du stress psychophysique chez des athlètes de haut-niveau. Cette étude est ainsi la première à mettre en évidence les changements d'activité du SNA monitorés par l'analyse de la VFC, associés à différents marqueurs subjectifs auto-rapportés chez une athlète élite au cours d'une saison olympique. Ce type de monitoring permet en effet de mieux comprendre l'origine des changements d'activité du SNA, reflet d'un stress psychophysique induit par les différentes périodes d'une saison chez une athlète élite en préparation des Jeux-Olympiques.

2.1.1. Conséquences sur les indices de la variabilité de la fréquence cardiaque

Dans la continuité des résultats précédents, mais cette fois-ci dans un contexte unique de compétition, les résultats de notre deuxième étude ont mis en évidence une perturbation significative de l'activité du SNA le matin au cours de la période de compétition ($p < 0,05$). Ces changements d'activité du SNA se caractérisent notamment par une diminution du RMSSD, associée à l'activité parasympathique, ainsi qu'une augmentation de la fréquence cardiaque durant les deux jours de compétition.

La réduction de 16% du RMSSD observée le matin des éliminatoires et de 30% le matin des finales par rapport à la baseline est le reflet d'une diminution de l'activité parasympathique plus importante que celle rapportée dans le groupe CONT (étude n°3). Cette diminution de l'activité parasympathique associée à une réduction du RMSSD a également déjà été rapportée en réponse à une compétition de lacrosse chez des joueurs élités (Hauer et al., 2020).

Par ailleurs, tout comme les athlètes du groupe CONT, le RMSSD et la FC mesurés lors des tests orthostatiques du matin sont revenus à des valeurs proches de la baseline immédiatement après la compétition (RMSSD – post-compétition : $105,76 \pm 11,47 \text{ ms}^{-1}$; FC – post-compétition

: $53,48 \pm 2,22$ bpm). Ce retour aux valeurs basales en post-compétition, reflet d'une régulation de l'activité parasympathique, a déjà été observé en compétition chez des joueuses de football élités (Hauer et al., 2020).

De fait, alors que le RMSSD a significativement diminué et que la FC a significativement augmenté au cours de la compétition, cette régulation rapide de l'activité du SNA en post-compétition démontre que la compétition induit un stress cumulé. En effet, notre étude est la première à mettre en évidence que la répétition d'exercices à H-I en compétition perturbe de manière transitoire l'activité du SNA, témoignant d'un stress psychophysiologique chez des athlètes élités.

2.1.2. Conséquences de l'état d'anxiété pré-compétitif

Afin de caractériser et de mieux comprendre les effets d'un stress psychophysiologique induit par une répétition d'exercices à H-I en compétition, nous nous sommes intéressés à l'évolution de l'état d'anxiété précompétitif. Cet état d'anxiété, évalué à partir du CSAI-2R, a mis en évidence une augmentation significative de l'anxiété somatique avant les épreuves de qualification. Ce résultat peut s'expliquer par la pression liée à la performance et la crainte de ne pas se qualifier pour la finale, renforçant cet état d'anxiété et induisant une augmentation de la fréquence cardiaque ainsi qu'une inhibition parasympathique (Hanton et al., 2004).

Ainsi, l'état d'anxiété induit par la compétition influence directement l'activité du SNA en renforçant l'activation de la branche sympathique, ce qui pourrait expliquer l'augmentation de la FC des athlètes au cours de la compétition en comparaison avec la baseline (Mosley & Laborde, 2022).

Par conséquent, notre étude met en évidence une augmentation de l'état d'anxiété précompétitif, associée à des perturbations du SNA, en réponse au stress psychophysiologique induit par la compétition chez des athlètes élités.

2.1.3. Conséquences sur les marqueurs salivaires

L'augmentation significative de l'alpha-amylase salivaire observée en post-course durant les séries et les finales met en évidence une perturbation aiguë de l'activité du SNA en réponse à des efforts supra-maximaux, avec notamment un retrait de l'activité parasympathique au profit d'une activation du système sympathique (séries – pré-course : $182,21 \pm 102,49$ U/mL ; post-course : $318,28 \pm 114,03$ U/mL ; finales – pré-course : $139,73 \pm 91,25$ U/mL ; post-course : $310,71 \pm 163,83$ U/mL). Alors que le RMSSD, témoin de l'activité parasympathique, a significativement diminué au cours de la compétition, les concentrations d'alpha-amylase n'ont montré aucun changement significatif le matin au réveil pendant la compétition ($p > 0,05$).

Dans la continuité des études précédentes, ce résultat pourrait ainsi indiquer que les concentrations d'alpha-amylase, marqueur de l'activité sympathique, sont davantage sensibles au stress aigu induit par la répétition d'exercices à H-I, comparativement aux marqueurs de la VFC, qui semblent mieux refléter les changements d'activité du SNA en réponse au stress psychophysiologique induit par la compétition (Edmonds et al., 2016).

Bien que non significative en raison d'une forte variabilité interindividuelle ($p = 0,08$; coefficient de variation $> 25\%$; D de Cohen = -0,43), le cortisol salivaire recueilli le matin au réveil a augmenté au cours de la compétition avant de revenir à des valeurs proches de la baseline à l'issue de la compétition (baseline : $0,39 \pm 0,29$ µg/d ; séries : $0,53 \pm 0,31$ µg/d ; finales : $0,48 \pm 0,23$ µg/d ; post-compétition : $0,35 \pm 0,21$ µg/d). Cette augmentation au cours de la compétition, inversement proportionnelle au RMSSD, est associée à un changement d'activité du système neuro-endocrinien et plus précisément de l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien (HPA) (Chennaoui et al., 2016). Cette corrélation négative entre ces deux marqueurs du stress a déjà été étudiée chez de jeunes athlètes issus des sports d'endurance, mettant en évidence que le RMSSD semble davantage répondre aux effets du stress que le cortisol salivaire (Mishica et al., 2021).

Par conséquent, notre étude est la première à mettre en évidence une perturbation de l'axe HPA associée aux perturbations du SNA au cours d'une compétition chez des athlètes élités. Les résultats obtenus dans cette étude démontrent ainsi que le cortisol salivaire semble moins sensible que les marqueurs de la VFC en réponse au stress psychophysiologique induit par la répétition d'exercices à H-I en compétition chez des athlètes élités.

Enfin, nous avons observé une diminution progressive et significative ($p < 0,05$) des niveaux de testostérone salivaire recueillis le matin, depuis la baseline jusqu'aux séries et finales,

confirmant ainsi nos résultats préliminaires obtenus lors des championnats d'Europe de Berlin et l'impact d'une réitération d'exercices à H-I en compétition sur l'axe HPA (baseline : $0,0194 \pm 0,0136 \mu\text{g/dL}$; séries : $0,0165 \pm 0,0078 \mu\text{g/dL}$; finales : $0,0158 \pm 0,0070 \mu\text{g/dL}$). Cette baisse du taux de testostérone, inversement proportionnelle au cortisol et associée à la réduction du rapport T/C, reflète une perturbation endocrinienne marquée par un déséquilibre entre système anabolique et catabolique (Curzi et al., 2024).

En somme, l'ensemble de nos résultats met pour la première fois en évidence qu'une réitération d'exercices à H-I en compétition perturbe non seulement l'activité du SNA, mais également celle du SNE chez des athlètes élités. Ces perturbations, associées aux suivis de la VFC, de l'état d'anxiété précompétitif et des marqueurs salivaires, démontrent qu'une réitération d'exercices à H-I en compétition induit un stress psychophysiologique.

Nos résultats nous permettent également de conclure que l'analyse de la VFC, comparativement aux marqueurs salivaires, semble plus sensible aux effets du stress psychophysiologique. Cependant, bien que le stress ne soit pas nécessairement associé à une contre-performance (Étude 5) (Stanley et al., 2013), les conséquences du stress psychophysiologique décrites ci-dessus (augmentation de l'activité sympathique, réduction de l'activité parasympathique, augmentation du cortisol) peuvent perturber la qualité et la quantité de sommeil, en prolongeant notamment le délai d'endormissement, en fragmentant les cycles de sommeil et en perturbant les phases profondes réparatrices (Myllymäki et al., 2011).

Un sommeil perturbé implique, de ce fait, une mauvaise récupération, pouvant renforcer les perturbations du SNA et du SNE (diminution des hormones anabolisantes comme la testostérone, activité sympathique exacerbée) et, par conséquent, impacter négativement la performance des athlètes au fil des répétitions (Craven et al., 2022; Chennaoui et al., 2020).

2.1.4. Variations inter-individuelles

Enfin, les résultats de cette deuxième étude nous ont permis, pour la première fois, de mettre en évidence des réponses individuelles chez des athlètes nationaux et internationaux face au stress psychophysiologique induit par la compétition en Championnats de France Élite. En effet, un résultat particulièrement intéressant et novateur de notre recherche réside dans l'identification d'un profil spécifique d'athlètes qui sembleraient être plus sensibles aux effets du stress psychophysiologique.

À partir d'un nouveau marqueur, basé sur la différence entre le RMSSD et le score CSAI-2R obtenus à l'issue de la baseline et des séries, nous avons constaté que sept athlètes répondent

davantage au stress psychophysique induit par la compétition. En utilisant ces deux indices et en isolant ces sept athlètes, nous avons identifié une corrélation négative significative ($p < 0,05$; $r = -0,75$), mettant en évidence une augmentation marquée des effets du stress, en particulier le premier jour de la compétition (séries).

De plus, en considérant les différents marqueurs de stress psychophysique (RMSSD, cortisol, testostérone, alpha-amylase, CSAI-2R) et en se référant à une variation de plus de 25% de ces marqueurs par rapport à la baseline (Bonafiglia et al., 2016), 50% des athlètes étaient particulièrement stressés le jour des séries. La présence d'une championne de France correspondant à ce profil suggère fortement que l'évolution de ces différents marqueurs était indépendante du niveau de performance et refléterait un stress psychophysique accru le jour des séries, associé à la crainte de ne pas se qualifier pour les finales.

Par conséquent, notre étude est la première à mettre en évidence qu'une approche croisée, comprenant des marqueurs objectifs (indice de la VFC) et subjectifs (questionnaire CSAI-2R), permet de mieux caractériser les réponses individuelles des athlètes de haut-niveau face au stress psychophysique induit par la compétition. L'hétérogénéité des effets du stress psychophysique sur les athlètes de haut-niveau souligne l'intérêt de ce type de monitoring, afin de proposer des stratégies de régulation du stress individualisées.

2.2. Quelles sont les effets du stress psychophysique induit par un enchaînement d'exercices à haute-intensité lors d'une compétition simulée chez des athlètes très entraînés ?

2.2.1. Conséquences sur les indices de la variabilité de la fréquence cardiaque

En nous appuyant sur la méthodologie mise en place dans cette étude de cas, les résultats de notre troisième étude ont rapporté, dans le groupe CONT, une diminution de la FC et une augmentation du RMSSD le matin du premier jour de la compétition simulée par rapport aux valeurs mesurées durant la période de pré-test. Bien que ces évolutions ne soient pas significatives ($p > 0,05$), elles sont cohérentes avec les observations de notre troisième étude, qui a également rapporté une diminution de la FC et une augmentation du RMSSD en position couchée pendant la période précompétitive. Ces résultats reflètent un processus d'affûtage en réponse à une réduction de la charge d'entraînement (Mujika et al., 2000; Bosquet et al., 2007), entraînant une régulation favorable de l'activité du SNA via une augmentation de l'activité parasympathique, comme cela a déjà été rapporté chez un triathlète de haut niveau une semaine avant sa compétition (Stanley et al., 2015).

Cependant, au cours de la compétition simulée, notre cinquième étude a révélé une augmentation significative de la FC ($p < 0,05$) et une réduction du RMSSD ($p < 0,01$) en position couchée lors de la deuxième course de 400 mètres par rapport à la première dans le groupe CONT. Ces perturbations dans l'activité du SNA ont persisté durant la troisième journée de compétition simulée (J6), avant de revenir à des valeurs proches de celles du premier jour de test (J4) au cours des deux jours suivant la compétition (post-test).

Malgré le retour aux valeurs basales des différents biomarqueurs sanguins, la régulation de l'activité parasympathique en post-exercice, qui est généralement corrélée significativement avec les concentrations en lactate sanguin (Buchheit et al., 2011) et l'acidose métabolique (Buchheit et al., 2007, 2010), n'a cessé de diminuer au cours de la période de test (compétition simulée). En effet, bien qu'en post-exercice la resynchronisation de la branche parasympathique soit généralement associée à la régulation de l'homéostasie, cette évolution du RMSSD mesuré le matin témoigne d'une perturbation prolongée du SNA au cours de la répétition d'exercices à H-I réalisés en compétition simulée (Stanley et al., 2013).

De ce fait, notre étude est la première à mettre en évidence une perturbation prolongée de l'activité parasympathique au cours d'une répétition d'exercices à H-I en compétition simulée. L'évolution au cours de la période de test et durant la période de post-test démontre ainsi que le délai de resynchronisation de l'activité parasympathique ne dépend pas uniquement de l'intensité de l'exercice et du stress métabolique associé, mais pourrait également être influencé par un stress psychophysiologique cumulé.

2.2.2. Conséquences sur les marqueurs salivaires

À l'inverse du RMSSD, mais tout comme la FC, les concentrations d'alpha-amylase recueillies le matin au réveil ont significativement diminué ($p = 0,03$) entre la période de pré-test et le premier jour de tests. Ce résultat renforce notre observation précédente en confirmant les conclusions de notre troisième étude, à savoir qu'une baisse de la charge d'entraînement pendant une période précompétitive permet de réguler l'activité du SNA, réduisant ainsi l'activité sympathique (Stanley et al., 2015).

Par ailleurs, au cours de la compétition simulée, les concentrations d'alpha-amylase du groupe CONT ont significativement augmenté ($p < 0,05$). Ce résultat confirme les observations précédentes relatives aux marqueurs de la VFC et démontre qu'une répétition d'exercices à H-I au cours d'une compétition simulée induit une activation accrue de l'activité sympathique au détriment de l'activité parasympathique (Chicharro et al., 1998 ; Druică et al., 2018).

Enfin, les concentrations de cortisol salivaire du groupe CONT mesurées en post-exercice ont significativement diminué tout au long de la compétition simulée ($p < 0,01$). De ce fait, la répétition d'exercices à H-I durant trois jours consécutifs induit un épuisement des glandes surrénales en réponse à l'exposition prolongée à un stress intense, entraînant une diminution de la production de cortisol (Brooks & Carter, 2013).

Par conséquent, nos travaux mettent en évidence que la répétition d'exercices à H-I durant trois jours au cours d'une compétition simulée induit chez des athlètes très entraînés des changements d'activité du SNA et du SNE. Outre le stress métabolique généralement associé à ce type d'effort, la répétition d'exercices H-I au cours d'une compétition simulée pourrait induire un stress psychophysiologique cumulé impliquant des perturbations du SNA et du SNE.

3. Réguler les effets du stress psychophysique

Au regard des résultats discutés ci-dessus, le stress métabolique induit par un enchaînement d'exercices à H-I ne semble pas être à l'origine de la difficulté des athlètes à réitérer un niveau de performance maximal au cours d'une compétition. Cette difficulté pourrait être induite par un stress psychophysique, mis en évidence par les changements d'activité du SNA et de l'axe HPA. En effet, ces perturbations du SNA et du SNE peuvent, à terme, perturber la qualité et la quantité de sommeil, altérant par conséquent la récupération des athlètes.

Afin de réguler le stress psychophysique, la mise en place de stratégies de relaxation centrées sur la respiration pourrait optimiser le sommeil et, à terme, la récupération. L'efficacité de la cohérence cardiaque, choisie en raison de son rapport coût-efficacité, de son accessibilité et de sa reproductibilité, a été testée sur les différents marqueurs du stress psychophysique.

3.1. Quels sont les effets de la cohérence cardiaque sur les marqueurs du stress

Les résultats de notre troisième étude ont mis en évidence une réduction significative ($p < 0,05$) du RMSSD au cours de la compétition simulée entre le premier et le deuxième jour de course pour le groupe CONT, alors qu'aucune différence significative n'a été observée dans le groupe RELAX. Cette régulation de l'activité du SNA peut être expliquée par le contrôle des cycles inspiration/expiration, favorisant la synchronisation entre la fréquence respiratoire et la fréquence intrinsèque du système baroréflexe, ce qui renforce l'activation parasympathique (Lehrer et al., 2020).

Dans la continuité des études précédentes ayant montré qu'une respiration contrôlée avait des effets bénéfiques sur l'activité du SNA (Shao et al., 2024), cette étude est la première à mettre en évidence que la cohérence cardiaque limite les perturbations du SNA en régulant l'activité parasympathique au cours d'une réitération d'exercices à H-I en compétition simulée chez des athlètes très entraînés.

De plus, nous avons observé que le cortisol salivaire recueilli le matin était resté stable au cours de la compétition simulée pour le groupe RELAX, contrairement au groupe CONT, où les concentrations ont significativement diminué entre le deuxième et le troisième 400 mètres ($p < 0,05$). Par ailleurs, les concentrations de cortisol en post-exercice du groupe RELAX n'étaient pas significativement différentes au cours de la compétition simulée, contrairement au groupe CONT, où le cortisol salivaire post-exercice a significativement diminué entre le premier et le troisième 400 mètres ($p < 0,05$).

Par conséquent, notre étude permet de conclure que la cohérence cardiaque régule l'activité de l'axe HPA chez des athlètes spécialistes de sprint long, en limitant les effets délétères du stress psychophysiologique sur les glandes surrénales, responsables de la production de cortisol (Brooks & Carter, 2013).

Les scores du CSAI-2R rapportés dans cette étude ont mis en évidence une augmentation significative de l'anxiété somatique et cognitive pour les deux groupes en réponse à la compétition simulée. Cependant, alors qu'aucune différence significative n'a été observée dans le groupe RELAX, la confiance en soi du groupe CONT a diminué de manière significative entre la phase de familiarisation (pré-test) et le premier 400 mètres ($p < 0,05$). Alors qu'un manque de confiance peut avoir des effets délétères sur la performance (Craft, 2003), les résultats de notre étude montrent pour la première fois que la cohérence cardiaque régule cette composante centrale de l'état d'anxiété précompétitif chez des athlètes très entraînés au cours d'une compétition simulée. Ces résultats ont été mis en application chez certains athlètes de l'équipe de France d'athlétisme avant les Jeux-Olympiques de Paris 2024.

Enfin, notre étude s'est intéressée à la régulation de biomarqueurs inflammatoires tels que l'IL1- β . Nos résultats ont ainsi mis en évidence une différence significative entre les valeurs du pré-test et celles du post-test dans le groupe CONT ($p < 0,05$), alors qu'aucune différence significative n'a été observée pour le groupe RELAX. Les différences de concentration en IL1- β entre les valeurs pré et post-exercice ont également augmenté significativement dans le groupe CONT ($p < 0,05$) au cours de la compétition simulée, contrairement au groupe RELAX. Ces résultats confirment que la cohérence cardiaque semble jouer un rôle dans la régulation de la réponse immunitaire, notamment en réduisant l'activation des voies pro-inflammatoires comme l'IL1- β . Cette stratégie pourrait ainsi être efficace chez des athlètes de haut-niveau afin de prévenir la surcharge inflammatoire et les risques associés (Migliaccio et al., 2023).

En somme, un certain nombre d'études ont déjà rapporté les bienfaits de stratégies de relaxation (respiration contrôlée, mindfulness) sur la régulation du stress chez des athlètes élités (Battaglini et al., 2022; Mehrsavar et al., 2019; Myall et al., 2023; Pagani et al., 2023). Cependant, notre étude est la première à mettre en évidence que la cohérence cardiaque permet de limiter les effets du stress psychophysiologique en régulant la confiance en soi, le système inflammatoire ainsi que l'activité parasympathique et du SNE au cours d'une compétition simulée chez des athlètes très entraînés.

3.2. Quels sont les effets de la cohérence cardiaque sur le sommeil

En réponse au stress, le sommeil joue un rôle majeur dans les processus de régulation de l'homéostasie, représentant par conséquent un élément clé dans la récupération des athlètes au cours d'une compétition (Walsh et al., 2021). Nos résultats ont rapporté une augmentation significative ($p < 0,05$) de la durée totale du sommeil dans le groupe RELAX au jour 4 comparativement à la période de pré-test, alors que le groupe CONT n'a montré aucune différence significative.

De plus, nous avons observé que le délai d'endormissement a significativement augmenté au cours de la compétition simulée pour la condition CONT ($p < 0,03$). À l'inverse, le délai d'endormissement dans la condition RELAX n'a pas été modifié de façon significative ($p > 0,05$) au cours de la compétition simulée.

Cette augmentation du sommeil total de 15% pour la condition RELAX peut s'expliquer par une meilleure régulation de l'activité parasympathique (Shao et al., 2024), réduisant le délai d'endormissement et optimisant ainsi la quantité de sommeil (Trinder et al., 2012; Nobue et al., 2024). Des résultats similaires ont montré que la mise en place d'une autre stratégie de relaxation (HRV-Biofeedback) régulaient l'activité parasympathique, améliorant ainsi la qualité du sommeil d'athlètes olympiques de bobsleigh (Li et al., 2022).

Par conséquent, nos résultats sont les premiers à mettre en évidence que la cohérence cardiaque optimise la quantité de sommeil grâce à une meilleure régulation parasympathique à l'issue d'une réitération d'exercices à H-I lors d'une compétition simulée chez des athlètes très entraînés. Enfin, et dans la continuité des résultats précédents, cette étude souligne l'intérêt de ce type de stratégie accessible, reproductible et facile à mettre en place afin de limiter les effets du stress psychophysiologique, notamment auprès des athlètes de haut-niveau, qui semblent les plus impactés.

Après avoir analysé les effets du stress psychophysiologique ainsi que les réponses des systèmes nerveux autonome et neuro-endocrinien lors de la répétition d'exercices de haute-intensité en contexte écologique ou simulé, en intégrant des contre-mesures comme la cohérence cardiaque, nous avons choisi explorer un autre aspect de stress généré au cours de compétition de 400 m. En effet, forts de nos connaissances des réponses métaboliques et des perturbations de l'équilibre acido-basique des exercices de haute-intensité, et plus spécifiquement au cours d'un 400 m (Hanon et al., 2010, Nummela et al., 1992), nous avons cherché à étudier les moyens de réguler l'équilibre acido-basique afin de proposer des recommandations nutritionnelles et hydriques simples et directement applicables en compétition.

4. Retarder les effets de l'acidose métabolique

Rappelons que l'implication prédominante du système énergétique anaérobie lors d'un exercice à H-I induit une acidose métabolique ayant des conséquences non négligeables en fin d'exercice et de ce fait sur la performance finale. Grâce à ses effets ergogéniques, la supplémentation en bicarbonate de sodium sous forme de gélules apparaît comme une stratégie efficace afin d'optimiser le pouvoir tampon de l'organisme (Grgic et al., 2021). Cependant, certains athlètes ne souhaitent pas mettre en place cette stratégie en raison des troubles gastro-intestinaux parfois associés (Ragone et al., 2020) et du caractère jugé non naturel de cette supplémentation. À ce titre, la consommation d'une eau riche en bicarbonate et d'une alimentation alcalinisante constitue une alternative nutritionnelle intéressante pour atteindre cet objectif (Heil, 2010; Limmer et al., 2018).

4.1. Quels sont les effets d'un régime alcalin associée à la consommation d'une eau riche en bicarbonate de sodium ?

4.1.1. Contrecarrer les effets délétères d'une alimentation acidifiante

Tout d'abord, les résultats de notre quatrième étude ont démontré que la consommation d'une eau riche en bicarbonate permettait, indépendamment du type d'alimentation, d'augmenter le pH urinaire des sujets (pH urinaire à J3 – STY : $7,06 \pm 0,50$ vs. PLA : $6,14 \pm 0,46$; $p = 0,01$). Ses effets ont également limité le déséquilibre acido-basique induit par une alimentation acidifiante (pH urinaire à J6 – STY^{ACI} : $6,86 \pm 0,60$ vs. PLA^{ACI} : $6,19 \pm 0,45$; $p = 0,01$).

Dans le cadre des exigences musculaires liées à l'entraînement de haut-niveau, les athlètes adoptent fréquemment un régime riche en protéines animales, souvent associé à une

alimentation acidifiante. Ce type de régime peut toutefois engendrer des effets négatifs sur la performance, la récupération et la santé des athlètes (Cairns, 2006; Cacicano et al., 2015.; Applegate et al., 2017).

Au regard du type d'alimentation généralement privilégié par les athlètes de haut-niveau, la consommation chronique d'une eau riche en bicarbonate s'avère bénéfique pour réguler l'équilibre acido-basique de l'organisme et optimiser la récupération.

4.1.2. Améliorer de la performance grâce à l'optimisation du pouvoir tampon

Par ailleurs, l'augmentation significative ($p < 0,05$) de la concentration sanguine en $[\text{HCO}_3^-]$ observée dans notre première étude pour le groupe STY^{ALK}, en comparaison avec le groupe PLA^{ALK}, après échauffement et en post-exercice, démontre que l'adoption d'un régime alcalinisant potentialise les effets de la consommation d'une eau riche en bicarbonate. Cet effet tampon additionnel a également été mis en évidence dans l'étude n°5, à la suite de la consommation chronique de 1,5 à 2 L d'eau riche en bicarbonate associée à un régime alcalinisant (condition BIC), en comparaison avec la condition placebo.

En effet, nous avons observé une augmentation significative ($p < 0,05$) des concentrations sanguines en $[\text{HCO}_3^-]$ ainsi que du pH sanguin en amont de la première course de 400 m. Cette alcalose métabolique en pré-exercice a amélioré de 1,5% la performance lors de la 3^e course de 400 mètres pour le groupe BIC comparé au groupe PLA, indépendamment de la motivation et de la difficulté de l'effort perçu, évaluées en post-exercice, qui n'ont pas montré de différence significative entre les conditions ni entre les trois courses.

En effet, l'optimisation de la capacité tampon a retardé les effets de l'acidose métabolique, permettant ainsi aux athlètes du groupe BIC de limiter significativement leur décélération lors des derniers 200 m de la course ($p < 0,05$; $28,40 \pm 2,75$ s contre $28,96 \pm 2,80$ s lors de la première course, $p = 0,01$).

Dans la continuité des travaux de Limmer et al., (2018), qui ont observé une amélioration de la performance lors d'un 400 mètres isolé chez des étudiants grâce à un régime alcalin, notre étude est la première à mettre en évidence les effets bénéfiques d'une telle stratégie nutritionnelle chez des athlètes spécialistes des exercices à H-I. La consommation d'eau riche en bicarbonate a ainsi renforcé la capacité tampon grâce à une augmentation des concentrations en ions HCO_3^- circulants, favorisant une alcalose métabolique et une augmentation du pH sanguin.

Cette différence de concentration a augmenté le gradient de pression entre le muscle et le sang, facilitant ainsi la diffusion des ions H^+ hors du muscle. Ces ions H^+ , transférés du compartiment

musculaire au compartiment sanguin via les transporteurs MCT (MCT4 et MCT1), sont ensuite pris en charge par les ions bicarbonates et éliminés par le système cardiopulmonaire lors de l'expiration (Hollidge-Horvat et al., 2000; Bishop et al., 2009; Grgic, 2021).

En complément, un régime alcalinisant (majoritairement composé de végétaux et limitant les produits d'origine animale) apporte des minéraux basiques tels que le potassium, le magnésium et le calcium. Ces minéraux favorisent l'alcalose métabolique en stimulant la production de bicarbonates par le système rénal, tout en atténuant les effets délétères des aliments acidifiants comme les protéines animales ou les céréales raffinées (Remer et Manz, 1995; Burke & Hawley, 2018).

Par conséquent, et en comparaison des précédentes études qui ont rapporté des résultats contrastés (Chycki et al., 2017 ; Brancaccio et al., 2012), nos travaux sont les premiers à mettre en évidence les effets bénéfiques d'une supplémentation chronique en eau riche en bicarbonate associée à une alimentation alcalinisante sur l'équilibre acido-basique et sur la performance.

De plus, notre étude est la première à mettre en évidence de tels effets chez une population d'athlètes spécialistes des exercices à H-I. Ces résultats démontrent ainsi l'intérêt de cette stratégie nutritionnelle, peu onéreuse en comparaison de celles proposées habituellement, afin d'améliorer le pouvoir tampon de l'organisme et, de ce fait, d'optimiser la performance lors d'exercices à H-I auprès d'athlètes spécialistes de ce type d'effort.

4.2. Est-ce que les athlètes spécialistes des exercices à haute-intensité sont capables de réitérer leur performance durant plusieurs jours consécutifs ?

Comme évoqué en avant-propos, les athlètes spécialistes des exercices à H-I rencontrent des difficultés à reproduire des performances maximales durant plusieurs jours consécutifs, bien que les biomarqueurs sanguins, reflets de l'acidose métabolique, reviennent à leurs valeurs basales en moins de quatre-vingt-dix minutes après un effort intense (Robergs et al., 2005). Par conséquent, dans quelle mesure ces athlètes sont-ils capables de réitérer une performance maximale tout en sollicitant pleinement leur système anaérobie, compte tenu du stress métabolique important induit par un tel exercice (Hanon et al., 2010) ?

Avant de répondre à cette question, l'évolution des marqueurs associés à la fatigue neuromusculaire offre un éclairage pertinent sur les conséquences d'une répétition d'exercices à H-I. Les résultats montrent que la hauteur des sauts (SJ) et la force de préhension (H-G) ne présentaient pas de différences significatives ($p > 0,05$) entre les mesures effectuées avant le premier, le deuxième et le troisième 400 m. Ce retour aux valeurs basales pourrait indiquer que

le stress induit par une répétition d'exercices à H-I n'engendre pas de fatigue neuro-musculaire cumulée.

Toutefois, l'étude plus approfondie de cette fatigue, notamment en explorant des marqueurs plus sensibles de la fatigue centrale et périphérique, pourrait apporter des informations précieuses sur les effets spécifiques de la fatigue neuro-musculaire induite par une course de 400 m.

4.2.1. Conséquences sur la performance et sur les biomarqueurs sanguins

Selon les résultats de notre cinquième étude, les performances des participants du groupe PLA lors des courses de 400 mètres, représentant 98% de leurs meilleures performances enregistrées au cours de la saison, n'étaient pas significativement différentes au cours des trois jours consécutifs. De plus, et contrairement à la majorité des études précédentes, les participants de notre protocole étaient des spécialistes de ce type d'effort et peuvent être considérés comme des sujets experts, selon les critères de McKay et al., (2021). Les conséquences d'une mauvaise gestion de l'effort (« stratégie de pacing »), pouvant modifier les cinétiques des biomarqueurs sanguins (Hanon et al., 2010), ont été évitées grâce au niveau des participants et contrôlées grâce aux temps de passage intermédiaires enregistrés tous les 100 mètres et à la reproduction des conditions de compétition (échauffement, départ en starting blocks, confrontation avec un autre participant de même niveau etc..).

Les variations des biomarqueurs sanguins dans notre étude, reflètent de l'implication du système glycolytique, renforcent également ces observations. Dans le groupe PLA, les concentrations de lactates, de bicarbonates et le pH sanguin n'ont pas présenté de différences significatives ($p > 0,05$) entre les trois courses de 400 mètres réalisées sur trois jours consécutifs. Par ailleurs, les valeurs minimales de $[\text{HCO}_3^-]$ et de pH sanguin, ainsi que les concentrations maximales de lactates mesurées après l'effort, sont comparables à celles rapportées dans des études précédentes sur des athlètes élités (Hanon et al., 2010; Lacour et al., 1990). Ces résultats démontrent ainsi que les perturbations métaboliques induites par ces efforts restent similaires, même dans le cadre d'une répétition quotidienne d'exercices à H-I.

En somme, les résultats de cette étude sont les premiers à mettre en évidence que les athlètes spécialistes des exercices à H-I sont capables de maintenir des performances proches de leur niveau maximal lors de trois courses de 400 mètres répétées quotidiennement durant trois jours consécutifs. Ces athlètes parviennent également à solliciter efficacement leur système anaérobie comme en témoigne l'évolution des biomarqueurs sanguins.

4.2.2. Conséquences sur la vitesse d'élimination du lactate

Les résultats de notre dernière étude ont, par ailleurs, mis en évidence une diminution significative des concentrations de lactate sanguin chez tous les athlètes, aussi bien dans les conditions PLA que BIC, après 20 minutes de récupération à l'issue de la troisième course de 400 mètres, en comparaison à la première ($p < 0,05$). Plus précisément, les valeurs observées étaient de $12,92 \pm 2,34 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ contre $15,99 \pm 3,54 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ pour PLA, et de $14,26 \pm 2,71 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ contre $16,48 \pm 1,92 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ pour BIC. Cette diminution après 20 minutes a été observée, bien que les concentrations maximales de lactate sanguin entre les deux conditions (PLA vs. BIC) et entre les courses (1^{ère} vs. 3^e) n'étaient pas significativement différentes, suggérant par conséquent une adaptation aiguë en réponse à l'exercice.

Ce résultat, bien qu'inattendu, peut être expliqué par une amélioration de l'élimination du lactate sanguin, estimée à l'aide du modèle mathématique de Brun et Engesgaard, (2002), reposant sur le calcul de la constante de temps Gamma 2 (γ_2) (Freund et al., 1986). La vitesse d'élimination du lactate (γ_2), calculée à partir des concentrations mesurées à 8 et 20 minutes en post-exercice, s'est avérée significativement plus rapide après la troisième course de 400 mètres en comparaison à la première, et ce, pour les deux conditions ($p = 0,03$). Une telle amélioration dans la clairance du lactate a déjà été rapportée dans la littérature, à l'issue d'un exercice isolé, notamment chez des athlètes bien entraînés (Pilegaard et al., 1994; Thomas et al., 2005).

De plus, cette capacité à éliminer rapidement le lactate est encore plus marquée chez des sujets très entraînés en comparaison à des athlètes moins entraînés (Oyono-Enguelle et al., 1990; Messonnier et al., 1997). Ce phénomène peut notamment s'expliquer par une optimisation de la capacité de transport du lactate, avec ou sans modification de la teneur en MCT (Benítez-Muñoz et al., 2024) et de la capacité oxydative maximale de ces athlètes très entraînés (Callahan et al., 2021). En effet, certaines études rapportent qu'un exercice à H-I induit une augmentation significative des transporteurs MCT, et plus spécifiquement des MCT1, en réponse à l'acidose métabolique induite par l'exercice (Juel et al., 2004; Benítez-Muñoz et al., 2024).

Cette adaptation aiguë permettrait ainsi une meilleure régulation du pH musculaire, en renforçant la capacité tampon de l'organisme à travers de meilleurs échanges des ions lactate et proton au niveau sarcolemmal (Coles et al., 2004).

APPLICATIONS PRATIQUES DE CE TRAVAIL DE THÈSE

Ce travail de recherche, mené par le laboratoire LBEPS de l'Université d'Évry Paris Saclay et le laboratoire VIFASOM de l'université Paris Cité, a été réalisé en collaboration avec la Fédération Française d'Athlétisme et sa cellule d'Optimisation de la Performance. En nous appuyant sur les résultats de notre travail et grâce aux liens établis avec les différents acteurs du sport de haut-niveau, nous avons accompagné de nombreux entraîneurs et athlètes lors de leur préparation olympique pour Paris 2024. Ces missions d'Accompagnement Scientifique à la Performance (ASP), initiées il y a sept ans au cours de mes études de master, se poursuivent encore aujourd'hui auprès des membres de l'Équipe de France d'Athlétisme, que ce soit lors de stages d'entraînement à l'étranger ou au quotidien à l'Institut du Sport de l'Expertise et de la Performance (INSEP). Ainsi, la nature holistique de ce projet de recherche m'a permis de multiplier les perspectives et de soutenir au mieux les différents acteurs du sport de haut-niveau dans leur quête de performance (Annexe n°1).

Dans un premier temps, l'axe développé autour du monitoring du Système Nerveux Autonome (SNA) grâce au suivi de la Variabilité de la Fréquence Cardiaque (VFC) a confirmé l'intérêt de cet outil pour mesurer les effets du stress psychophysiologique chez les athlètes de haut-niveau. L'intégration de cet outil dans ce projet de recherche m'a permis d'approfondir la compréhension et les limites de ce type de monitoring, initialement mis en place dans le cadre des missions d'ASP, puis appliqué dans mon projet de recherche en master 2.

Au cours de ces sept dernières années, j'ai proposé à différents athlètes membres de l'Équipe de France un suivi de leur VFC. Ce monitoring avait pour objectif de mesurer les effets de l'entraînement afin d'aider les entraîneurs à prendre des décisions concernant la périodisation, la planification et la programmation. Ces suivis ont donné lieu à des échanges quotidiens avec les entraîneurs ainsi qu'à des rapports journaliers (Annexe n°2), mettant en évidence les changements d'activité du SNA associés à l'évolution de marqueurs subjectifs auto-rapportés. Cependant, cette mise en place peut représenter une charge mentale pour les athlètes, renforçant parfois les effets du stress psychophysiologique. Par exemple, certains athlètes, pour des raisons personnelles, ne pouvaient maintenir la rigueur nécessaire pour ce type de monitoring. Par ailleurs, l'analyse et l'interprétation des tests peuvent également être anxiogènes. En effet, bien qu'une perturbation du SNA n'est pas nécessairement synonyme de contre-performance, cet effet associé à la représentation de ne pas être pleinement en mesure de performer, peut

renforcer le stress psychophysiological, notamment en période de compétition.

En somme, la VFC est un outil pertinent pour le suivi des changements d'activité du SNA associés au stress psychophysiological des sportifs de haut-niveau. Bien que simple, reproductible et peu coûteux, son application n'est pas toujours réalisable auprès de cette population.

Par ailleurs, les méthodes de relaxation ont déjà démontré leur efficacité pour réguler les effets du stress psychophysiological. Toutefois, leur mise en œuvre reste complexe, notamment en raison des coûts associés et du manque d'autonomie et de reproductibilité. En identifiant, grâce au CSAI-2R et à l'analyse de la VFC, les athlètes les plus sensibles aux effets du stress, nous avons proposé des techniques comme la cohérence cardiaque pour réguler l'activité parasympathique. Cette recommandation, initiée par notre équipe, a été appliquée à des athlètes de l'Équipe de France pour limiter les effets délétères du stress en compétition notamment au cours de cette saison olympique.

Ces stratégies visent aussi à améliorer le sommeil, pilier central de la récupération des sportifs. En collaboration avec l'hôpital de l'Hôtel-Dieu, nous avons suivi le sommeil d'athlètes grâce à la bague Oura, notamment pour gérer le décalage horaire lors de compétitions (Annexe n°3). Bien que cet outil présente des limites dans l'évaluation des phases du sommeil, il nous a permis à travers sa simplicité d'utilisation, de sensibiliser les athlètes à l'optimisation de leur récupération.

De plus et dans le cadre des missions d'ASP initié par la FFA, nous avons créé des fiches destinées aux athlètes et aux entraîneurs (Annexe n°4). La première avait pour objectif de présenter les grands principes du sommeil afin d'identifier les différents éléments qui pouvaient influencer ce dernier. La deuxième présentait les variations physiologiques associées au rythme circadien afin de mettre en évidence leurs conséquences sur la performance et le sommeil. Enfin, la troisième avait pour objectif d'identifier à partir d'un questionnaire, les besoins spécifiques des athlètes ainsi que certains troubles éventuels.

Dans un second temps, l'axe développé autour du métabolisme anaérobie m'a permis d'approfondir les mécanismes associés à la glycolyse, la capacité tampon et le rôle du lactate. Lors des entraînements, des prélèvements sanguins de lactate ont été effectués pour aider les entraîneurs à ajuster les intensités ou les temps de récupération à court terme, comparer différents entraînements à moyen terme et orienter les profils métaboliques à long terme. Ce travail collaboratif a conduit à la création d'un tableau permettant de déterminer les intensités

d'entraînement à partir de marqueurs physiologiques (Annexe n°5).

À partir des résultats de nos deux dernières études et en nous appuyant sur des spécialistes, nous avons également proposé des recommandations spécifiques aux athlètes afin de les accompagner dans la gestion de leurs repas en période de compétition. Ces fiches avaient pour objectif de proposer des menus types favorisant un régime alcalin afin de limiter la charge acide délétère pour la performance (Annexe n°6). Bien que la nutrition soit centrale pour la récupération et l'optimisation de la performance, les recommandations destinées aux sportifs doivent tenir compte des spécificités de chacun tout en valorisant le plaisir associé à l'alimentation.

De plus, grâce aux résultats de notre dernière étude, nous avons mis en avant l'intérêt d'une alimentation alcalinisante associée à une hydratation riche en bicarbonate de sodium pour retarder les effets de l'acidose métabolique. Ce type de stratégie nutritionnelle, destiné à optimiser le pouvoir tampon, a été proposé aux athlètes spécialistes des disciplines à haute-intensité, qui préféreraient éviter des stratégies jugées « non naturelles ».

Par ailleurs, grâce aux compétences développées dans ce projet de recherche, nous avons initié, au sein de la Fédération Française d'Athlétisme (FFA), la mise en place d'une supplémentation en bicarbonate de sodium. Cet apport exogène, fourni par un produit développé par une société spécialisée en nutrition sportive, a été évalué sur plus de cinquante athlètes au repos et à l'effort. Après avoir mesuré la concentration en lactate sanguin et les gaz du sang, nous avons recommandé cette supplémentation pour les athlètes des épreuves de 400 m, 800m, 1500m, 3000m steeple et 5000m lors des compétitions de championnats.

Par ailleurs, au cours de ce projet de recherche, j'ai eu l'opportunité de vivre des expériences internationales. J'ai participé à des stages d'entraînement nationaux au Kenya, en Afrique du Sud, à La Réunion, à Font-Romeu et au Portugal, où j'ai conduit mes missions d'ASP.

Ces expériences ont ainsi donné lieu à des échanges enrichissants avec des entraîneurs étrangers, ainsi qu'à des présentations destinées aux entraîneurs. Durant ces quatre années de thèse, j'ai ainsi présenté les résultats de notre travail aux entraîneurs de la FFA et souligné l'intérêt des missions d'ASP lors de colloques, notamment à l'île de La Réunion et au CNEA de Font-Romeu (Annexes n°7).

Enfin, l'ensemble de ce travail a été valorisé à travers des articles de vulgarisation scientifique (annexes n°8), des interviews dans la presse (le journal l'Équipe, Le Figaro, Ouest-France), ainsi que l'enregistrement de podcasts destinés au grand public et aux spécialistes de l'athlétisme (Dans la Tête d'un Coureur, RunWise et One Your Marks).

En somme, l'ensemble de ce travail, initié dès le début de mon master et poursuivi au cours de ce projet de recherche, m'a permis de contribuer directement ou indirectement à la réalisation de divers records d'Europe, records de France, médailles internationales, titres de champions de France et qualifications pour les Jeux-Olympiques de Paris 2024.

Plus qu'une simple thèse, ce projet de recherche m'a permis d'approfondir ma culture scientifique, d'appréhender de manière systématique les dynamiques de la performance, d'enrichir ma connaissance du haut-niveau, mais surtout de contribuer à l'un des plus grands événements sportifs internationaux de ces dernières années.

Enfin, ce travail m'a également permis de prendre conscience de la complexité d'un écosystème tel que celui du sport de haut-niveau. Grâce à la diversification des perspectives que j'ai pu adopter au cours de mon parcours, j'entrevois avec confiance une suite professionnelle en tant que jeune éducateur, entraîneur, accompagnateur scientifique et chercheur, venant d'être recruté sur un poste d'entraîneur national des courses de fond et demi-fond chez Swiss Athletics à partir du 1er février 2025.

PERSPECTIVES

Les résultats obtenus dans le cadre de ce travail de recherche ouvrent plusieurs perspectives qui permettraient d'approfondir notre compréhension des mécanismes influençant la performance des athlètes de haut-niveau engagés dans la répétition d'exercices à H-I en compétition.

Une première perspective consisterait à tenir compte des singularités de chaque athlète en évaluant leur trait d'anxiété ainsi que leur chronotype pouvant exercer une influence sur le rythme circadien. Au regard de l'influence du chronotype (Lastella et al., 2016; Vitale & Weydahl, 2017), et de l'anxiété (Rice et al., 2019; Datcu et al., 2021; Lim et al., 2021) sur la performance ou sur la récupération, les recherches futures pourraient explorer l'interaction entre ces paramètres afin de développer des stratégies adaptées aux profils des athlètes. Intégrer ces variables dans la préparation des athlètes pourrait par conséquent améliorer la performance tout en réduisant les effets délétères du stress psychophysiologique.

Une deuxième perspective réside dans l'étude des effets de la cohérence cardiaque en fonction des différents profils d'athlètes, en tenant compte de leur sensibilité au stress psychophysiologique. Cette approche pourrait être étendue à des contextes de compétition internationale afin d'étudier l'efficacité de cette stratégie dans des situations entraînant un stress psychophysiologique important.

De plus, dans un cadre expérimental plus contrôlé, l'utilisation d'outils avancés, comme la polysomnographie, permettrait d'évaluer avec précision les effets de la cohérence cardiaque sur la qualité du sommeil, notamment sur les phases de sommeil lent profond (Baharav et al., 1995; De Zambotti et al., 2019; Roberts et al., 2019). Ce type de recherche contribuerait à mieux comprendre les liens entre régulation parasympathique, sommeil et récupération chez les athlètes de haut-niveau.

Par ailleurs, les résultats de la cinquième étude suggèrent qu'une investigation plus précise des effets d'une répétition de 400 m durant trois jours consécutifs sur les marqueurs de la fatigue est nécessaire. Cela inclurait l'intégration de marqueurs spécifiques de la fatigue neuromusculaire, en particulier ceux liés aux muscles extenseurs de la hanche (ischio-jambiers et fessiers), qui sont fortement sollicités lors d'un 400 m (Kakehata et al., 2024). Des techniques comme l'électromyographie de surface combinée à la neuro-stimulation percutanée pourraient également être utilisées afin d'évaluer la fatigue centrale (Nummela et al., 1992; Tomazin et al., 2012; Yousif et al., 2019).

Enfin, les résultats obtenus sur la clairance du lactate à l'issue de la répétition de trois courses de 400 m laissent entrevoir des mécanismes adaptatifs encore peu explorés. Une approche fondamentale pourrait investiguer les effets d'une surcompensation dans le nombre de transporteurs MCT1 et l'optimisation du fonctionnement des MCT4 (pour revue, Thomas et al., 2012). Ces travaux permettraient d'approfondir notre compréhension des mécanismes sous-jacents à l'amélioration de la clairance du lactate et leur contribution à la régulation de l'acidose métabolique.

CONCLUSION

L'objectif principal de ce travail de recherche était d'optimiser la capacité des athlètes de haut-niveau à réitérer des performances maximales lors d'exercices à H-I en compétition. Pour cela, nous avons analysé les effets du stress psychophysiologique et métabolique associé à de tels exercices tout en explorant des stratégies innovantes destinées à améliorer la récupération et retarder les effets de l'acidose métabolique.

Tout d'abord, nos travaux ont permis de caractériser le stress psychophysiologique induit par une saison pré-olympique et par les championnats de France Élites chez des athlètes de haut-niveau. Les résultats ont démontré que la réitération d'exercices à H-I en compétition perturbe l'activité du système nerveux autonome (SNA) et du système neuro-endocrinien (SNE). Ces perturbations, mis en évidence par une diminution significative du RMSSD, une augmentation de la fréquence cardiaque et des variations des marqueurs salivaires (alpha-amylase, cortisol, testostérone), témoignent d'un stress psychophysiologique cumulé. L'utilisation de la variabilité de la fréquence cardiaque comme outil de suivi a montré une sensibilité accrue par rapport aux marqueurs salivaires, permettant une analyse fine de l'impact du stress sur la performance. De plus, nos résultats ont mis en lumière des variations interindividuelles dans les réponses au stress, suggérant la nécessité de stratégies individualisées de gestion du stress.

Dans cette continuité, nous avons évalué l'efficacité de la cohérence cardiaque comme outil de régulation du stress psychophysiologique. Cette stratégie a démontré son potentiel pour limiter les effets du stress, en régulant l'activité parasympathique et la réponse inflammatoire (notamment via l'IL1- β). Par ailleurs, cette stratégie de relaxation a permis de réduire le délai d'endormissement et la durée totale de sommeil, composante essentielle dans la récupération des athlètes lors de la réitération d'exercice à H-I en compétition. Ces résultats confirment ainsi l'intérêt de cette méthode accessible, reproductible et peu coûteuse pour optimiser la récupération des athlètes.

Par ailleurs, nos travaux ont exploré les effets d'une stratégie nutritionnelle associant un régime alcalin à la consommation d'eau riche en bicarbonate. Cette approche a montré son efficacité pour améliorer l'équilibre acido-basique, augmenter la concentration sanguine en bicarbonates, et retarder les effets de l'acidose métabolique. Cette optimisation de la capacité tampon a permis aux athlètes ayant adopté cette stratégie d'améliorer significativement leur performance à l'issue de leur troisième 400 m. Par ailleurs, nous avons mis en évidence que les athlètes

spécialistes des exercices à H-I sont capables de maintenir des performances proches de leur niveau maximal lors de trois courses de 400 m répétées durant trois jours consécutifs en compétition simulée. Ces athlètes parviennent de fait à solliciter efficacement leur système anaérobie comme en témoigne l'évolution des biomarqueurs sanguins.

Enfin, la nature systémique de ce projet de recherche a permis de démontrer que les difficultés des athlètes à reproduire des performances maximales lors de la répétition d'exercices H-I en compétition provient majoritairement d'un stress psychophysique cumulé. Afin de réguler ces effets, l'intégration de stratégies innovantes, offre des solutions prometteuses afin d'améliorer la récupération et d'optimiser les performances des athlètes de haut-niveau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbiss, C. R., & Laursen, P. B. (2008). Describing and Understanding Pacing Strategies during Athletic Competition: *Sports Medicine*, 38(3), 239-252. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838030-00004>
- Adams, G. R., Foley, J. M., & Meyer, R. A. (1990). Muscle buffer capacity estimated from pH changes during rest-to-work transitions. *Journal of Applied Physiology*, 69(3), 968-972. <https://doi.org/10.1152/jappl.1990.69.3.968>
- Aftyka, J., Staszewski, J., Dębiec, A., Pogoda-Wesołowska, A., & Zebrowski, J. (2023). Heart rate variability as a predictor of stroke course, functional outcome, and medical complications: A systematic review. *Frontiers in Physiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1115164>.
- Al Haddad, H., Laursen, P. B., Ahmaidi, S., & Buchheit, M. (2010). Influence of cold water face immersion on post-exercise parasympathetic reactivation. *European Journal of Applied Physiology*, 108(3), 599-606. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1253-9>
- Allen, D. G., Lamb, G. D., & Westerblad, H. (2008). Skeletal muscle fatigue: Cellular mechanisms. *Physiological reviews*, 88(1), 287-332.
- Applegate, C., Mueller, M., & Zuniga, K. E. (2017). Influence of Dietary Acid Load on Exercise Performance. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 27(3), 213-219. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2016-0186>
- Åstrand, P.-O., Rodahl, K., & Lacour, J. R. (1980). Précis de physiologie de l'exercice musculaire. (*No Title*).
- Ayuso-Moreno, R. M., Fuentes-García, J. P., Nobari, H., & Villafaina, S. (2021). Impact of the Result of Soccer Matches on the Heart Rate Variability of Women Soccer Players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17), 9414. <https://doi.org/10.3390/ijerph18179414>
- Baharav, A., Kotagal, S., Gibbons, V., Rubin, B. K., Pratt, G., Karin, J., & Akselrod, S. (1995). Fluctuations in autonomic nervous activity during sleep displayed by power spectrum analysis of heart rate variability. *Neurology*, 45(6), 1183-1187. <https://doi.org/10.1212/WNL.45.6.1183>
- Balthazar, C. H., Garcia, M. C., & Spadari-Bratfisch, R. C. (2012). Salivary concentrations of cortisol and testosterone and prediction of performance in a professional triathlon competition. *Stress*, 15(5), 495-502. <https://doi.org/10.3109/10253890.2011.642033>
- Baranauskas, M., Jablonskienė, V., Abaravičius, J. A., Samsonienė, L., & Stukas, R. (2020). Dietary Acid-Base Balance in High-Performance Athletes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15), 5332. <https://doi.org/10.3390/ijerph17155332>
- Battaglini, M. P., Pessôa Filho, D. M., Calais, S. L., Miyazaki, M. C. O. S., Neiva, C. M., Espada, M. C., De Moraes, M. G., & Verardi, C. E. L. (2022). Analysis of Progressive Muscle Relaxation on Psychophysiological Variables in Basketball Athletes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), 17065. <https://doi.org/10.3390/ijerph192417065>

- Benítez-Muñoz, J. A., Cupeiro, R., Rubio-Arias, J. Á., Amigo, T., & González-Lamuño, D. (2024). Exercise influence on monocarboxylate transporter 1 (MCT1) and 4 (MCT4) in the skeletal muscle: A systematic review. *Acta Physiologica*, 240(3), e14083. <https://doi.org/10.1111/apha.14083>
- Bigland-Ritchie, B. (1981). EMG/force relations and fatigue of human voluntary contractions. *Exercise and sport sciences reviews*, 9(1), 75-118.
- Bigland-Ritchie, B. R., Dawson, N. J., Johansson, R. S., & Lippold, O. C. (1986). Reflex origin for the slowing of motoneurone firing rates in fatigue of human voluntary contractions. *The Journal of Physiology*, 379(1), 451-459. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1986.sp016263>
- Bishop, D., Edge, J., Mendez-Villanueva, A., Thomas, C., & Schneiker, K. (2009a). High-intensity exercise decreases muscle buffer capacity via a decrease in protein buffering in human skeletal muscle. *Pflügers Archiv - European Journal of Physiology*, 458(5), 929-936. <https://doi.org/10.1007/s00424-009-0673-z>
- Bolger, N., DeLongis, A., Kessler, R. C., & Schilling, E. A. (1989). Effects of daily stress on negative mood. *Journal of personality and social psychology*, 57(5), 808.
- Bollinger, T., Bollinger, A., Oster, H., & Solbach, W. (2010). Sleep, Immunity, and Circadian Clocks : A Mechanistic Model. *Gerontology*, 56(6), 574-580. <https://doi.org/10.1159/000281827>
- Bonafiglia, J. T., Rotundo, M. P., Whittall, J. P., Scribbans, T. D., Graham, R. B., & Gurd, B. J. (2016). Inter-Individual Variability in the Adaptive Responses to Endurance and Sprint Interval Training: A Randomized Crossover Study. *PLOS ONE*, 11(12), e0167790. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167790>
- Bonato, M., La Torre, A., Saresella, M., Marventano, I., Merati, G., & Vitale, J. A. (2017). Salivary cortisol concentration after high-intensity interval exercise: Time of day and chronotype effect. *Chronobiology International*, 34(6), 698-707. <https://doi.org/10.1080/07420528.2017.1311336>
- Bosquet, L., Merkari, S., Arvisais, D., & Aubert, A. E. (2008). Is heart rate a convenient tool to monitor over-reaching? A systematic review of the literature. *British Journal of Sports Medicine*, 42(9), 709-714. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.042200>
- Bosquet, L., Montpetit, J., Arvisais, D., & Mujika, I. (2007). Effects of tapering on performance : A meta-analysis. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(8), 1358-1365.
- Brancaccio, P., Limongelli, F. M., Paolillo, I., & Rastrelli, L. (2012). *Supplementation of Acqua LetteW (Bicarbonate Calcic Mineral Water) improves hydration status in athletes after short term anaerobic exercise.*
- Brooks, G. A. (2000). Intra- and extra-cellular lactate shuttles: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(4), 790-799. <https://doi.org/10.1097/00005768-200004000-00011>

Brooks, G. A. (2018). The Science and Translation of Lactate Shuttle Theory. *Cell Metabolism*, 27(4), 757-785. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2018.03.008>

Brooks, G. A., Osmond, A. D., Arevalo, J. A., Duong, J. J., Curl, C. C., Moreno-Santillan, D. D., & Leija, R. G. (2023). Lactate as a myokine and exerkine : Drivers and signals of physiology and metabolism. *Journal of Applied Physiology*, 134(3), 529-548. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00497.2022>

Brooks, K. A., & Carter, J. (2013). Overtraining, exercise, and adrenal insufficiency. *Journal of novel physiotherapies*, 3(125).

Brosschot, J. F., Verkuil, B., & Thayer, J. F. (2016). The default response to uncertainty and the importance of perceived safety in anxiety and stress : An evolution-theoretical perspective. *Journal of Anxiety Disorders*, 41, 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2016.04.012>

Brun, A., & Engesgaard, P. (2002). Modelling of transport and biogeochemical processes in pollution plumes : Literature review and model development. *Journal of Hydrology*, 256(3-4), 211-227. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00547-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00547-9)

Buchheit, M., Al Haddad, H., Mendez-Villanueva, A., Quod, M. J., & Bourdon, P. C. (2011). Effect of Maturation on Hemodynamic and Autonomic Control Recovery Following Maximal Running Exercise in Highly Trained Young Soccer Players. *Frontiers in Physiology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fphys.2011.00069>

Buchheit, M., Duché, P., Laursen, P. B., & Ratel, S. (2010). Postexercise heart rate recovery in children : Relationship with power output, blood pH, and lactate. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 35(2), 142-150. <https://doi.org/10.1139/H09-140>

Buchheit, M., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S. (2007a). Parasympathetic reactivation after repeated sprint exercise. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 293(1), H133-H141. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00062.2007>

Burke, L. M. (2013). Practical Considerations for Bicarbonate Loading and Sports Performance. In K. D. Tipton & L. J. C. Van Loon (Éds.), *Nestlé Nutrition Institute Workshop Series* (Vol. 75, p. 15-26). S. Karger AG. <https://doi.org/10.1159/000345814>

Burke, L. M., & Hawley, J. A. (2018). Swifter, higher, stronger : What's on the menu? *Science*, 362(6416), 781-787.

Caciano, S. L., Inman, C. L., Gockel-Blessing, E. E., & Weiss, E. P. (s. d.). *Effects of Dietary Acid Load on Exercise Metabolism and Anaerobic Exercise Performance*.

Cairns, S. P. (2006). Lactic Acid and Exercise Performance : Culprit or Friend? *Sports Medicine*, 36(4), 279-291. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636040-00001>

Callahan, M. J., Parr, E. B., Hawley, J. A., & Camera, D. M. (2021). Can High-Intensity Interval Training Promote Skeletal Muscle Anabolism? *Sports Medicine*, 51(3), 405-421. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01397-3>

Calvo, J. L., Xu, H., Mon-López, D., Pareja-Galeano, H., & Jiménez, S. L. (2021). Effect of sodium bicarbonate contribution on energy metabolism during exercise : A systematic review

and meta-analysis. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 18(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s12970-021-00410-y>

Capranica, L., Condello, G., Tornello, F., Iona, T., Chiodo, S., Valenzano, A., De Rosas, M., Messina, G., Tessitore, A., & Cibelli, G. (2017). Salivary alpha-amylase, salivary cortisol, and anxiety during a youth taekwondo championship : An observational study. *Medicine*, 96(28), e7272. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000007272>

Carroll, T. J., Taylor, J. L., & Gandevia, S. C. (2017). Recovery of central and peripheral neuromuscular fatigue after exercise. *Journal of Applied Physiology*, 122(5), 1068-1076. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00775.2016>

Castellini, M. A., & Somero, G. N. (1981). Buffering capacity of vertebrate muscle : Correlations with potentials for anaerobic function. *Journal of Comparative Physiology*, 143(2), 191-198. <https://doi.org/10.1007/BF00797698>

Chauvineau, M. (2024). *Sleep in elite athletes : From the impact of training load to bedding optimization for the Paris 2024 Olympic Games*.

Chen, I. (2017). *Le stress, l'hyperactivation et l'insomnie*.

Cheng, W.-N. K., Hardy, L., & Markland, D. (2009). Toward a three-dimensional conceptualization of performance anxiety : Rationale and initial measurement development. *Psychology of Sport and Exercise*, 10(2), 271-278. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2008.08.001>

Chennaoui, M., Bougard, C., Drogou, C., Langrume, C., Miller, C., Gomez-Merino, D., & Vergnoux, F. (2016). Stress Biomarkers, Mood States, and Sleep during a Major Competition : “Success” and “Failure” Athlete’s Profile of High-Level Swimmers. *Frontiers in Physiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00094>

Chennaoui, M., Gomez-Merino, D., Drogou, C., Bourrilhon, C., Sautivet, S., & Guezennec, C. Y. (2004). Hormonal and metabolic adaptation in professional cyclists during training. *Canadian journal of applied physiology*, 29(6), 714-730.

Chennaoui, M., Léger, D., & Gomez-Merino, D. (2020). Sleep and the GH/IGF-1 axis : Consequences and countermeasures of sleep loss/disorders. *Sleep Medicine Reviews*, 49, 101223. <https://doi.org/10.1016/j.smr.2019.101223>

Chevrette, T. (2012). La structure du sommeil et l’activité cardiaque nocturne chez les adolescents ayant un trouble anxieux.

Chicharro, J. L., Lucía, A., Pérez, M., Vaquero, A. F., & Ureña, R. (1998). Saliva Composition and Exercise. *Sports Medicine*, 26(1), 17-27. <https://doi.org/10.2165/00007256-199826010-00002>

Chycki, J., Zając, T., Maszczyk, A., & Kurylas, A. (2017). The effect of mineral-based alkaline water on hydration status and the metabolic response to short-term anaerobic exercise. *Biology of Sport*, 3, 255-261. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2017.66003>

Clausen, T. (2003). Na²-K² Pump Regulation and Skeletal Muscle Contractility. *Physiol Rev*, 83.

Coles, L., Litt, J., Hatta, H., & Bonen, A. (2004). Exercise rapidly increases expression of the monocarboxylate transporters MCT1 and MCT4 in rat muscle. *The Journal of Physiology*, 561(1), 253-261. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2004.073478>

Cottin, F., Durbin, F., & Papelier, Y. (2004). Heart rate variability during cycloergometric exercise or judo wrestling eliciting the same heart rate level. *European Journal of Applied Physiology*, 91(2-3), 177-184. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0969-1>

Couderc, A., Thomas, C., Lacome, M., Piscione, J., Robineau, J., Delfour-Peyrethon, R., Borne, R., & Hanon, C. (2017). Movement patterns and metabolic responses during an international rugby sevens tournament. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(7), 901-907.

Craven, J., McCartney, D., Desbrow, B., Sabapathy, S., Bellinger, P., Roberts, L., & Irwin, C. (2022a). Effects of Acute Sleep Loss on Physical Performance : A Systematic and Meta-Analytical Review. *Sports Medicine*, 52(11), 2669-2690. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01706-y>

Crewther, B. T., Heke, T., & Keogh, J. W. L. (2011). The Effects of Training Volume and Competition on the Salivary Cortisol Concentrations of Olympic Weightlifters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(1), 10-15. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181fb47f5>

Curzi, D., Amatori, S., Silvestri, F., Marcelli, L., Campanella, M., Perroni, F., Gallotta, M. C., Favoriti, A., Baldari, C., & Guidetti, L. (2024). Professional football training and recovery : A longitudinal study on the effects of weekly conditioning session and workload variables. *Plos one*, 19(9), e0310036.

D'Ascenzi, F., Alvino, F., Natali, B. M., Cameli, M., Palmitesta, P., Boschetti, G., Bonifazi, M., & Mondillo, S. (2014). Precompetitive assessment of heart rate variability in elite female athletes during play offs. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 34(3), 230-236. <https://doi.org/10.1111/cpf.12088>

Datcu, R. F., Brîndescu, S., & Petracovski, S. (2021). Anxiety and athlete performance : A systematic narrative review of the mutual influence of these concepts. *Timisoara Physical Education and Rehabilitation Journal*, 14(26), 62-75. <https://doi.org/10.2478/tperj-2021-0007>

De Oliveira, L. F., Dolan, E., Swinton, P. A., Durkalec-Michalski, K., Artioli, G. G., McNaughton, L. R., & Saunders, B. (2022). Extracellular Buffering Supplements to Improve Exercise Capacity and Performance : A Comprehensive Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine*, 52(3), 505-526. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01575-x>

De Pero, R., Minganti, C., Cibelli, G., Cortis, C., & Piacentini, M. F. (2021). The Stress of Competing : Cortisol and Amylase Response to Training and Competition. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 6(1), 5. <https://doi.org/10.3390/jfmk6010005>

De Zambotti, M., Rosas, L., Colrain, I. M., & Baker, F. C. (2019). The Sleep of the Ring : Comparison of the ÖURA Sleep Tracker Against Polysomnography. *Behavioral Sleep Medicine*, 17(2), 124-136. <https://doi.org/10.1080/15402002.2017.1300587>

DeGraves, B. S., Titley, H., Duan, Y., Thorne, T. E., Banerjee, S., Ginsburg, L., Salma, J., Hegadoren, K., Angel, C., Keefe, J., Lanius, R., & Estabrooks, C. A. (2024). Workforce

resilience supporting staff in managing stress : A coherent breathing intervention for the long-term care workforce. *Journal of the American Geriatrics Society*, 72(3), 753-766. <https://doi.org/10.1111/jgs.18727>

Dehghan, F., Khodaei, F., Afshar, L., Shojaei, F. K., Poorhakimi, E., Soori, R., Fatolahi, H., & Azarbayjani, M. A. (2019). Effect of competition on stress salivary biomarkers in elite and amateur female adolescent inline skaters. *Science & Sports*, 34(1), e37-e44. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2018.04.011>

Di Iorio, B., Di Micco, L., Marzocco, S., De Simone, E., De Blasio, A., Sirico, M., Nardone, L., & On behalf of UBI Study Group. (2017). Very Low-Protein Diet (VLPD) Reduces Metabolic Acidosis in Subjects with Chronic Kidney Disease : The “Nutritional Light Signal” of the Renal Acid Load. *Nutrients*, 9(1), 69. <https://doi.org/10.3390/nu9010069>

Druică, A., Anton-Păduraru, D., & Mocanu, V. (2018). The Effects Of High Intensity Training On Salivary Markers Of The Sympathetic Nervous System. *I8(2)*.

Ducker, K. J., Dawson, B., & Wallman, K. E. (2013). Effect of Beta Alanine and Sodium Bicarbonate Supplementation on Repeated-Sprint Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(12), 3450-3460. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31828fd310>

Edge, J., Bishop, D., & Goodman, C. (2006). Effects of chronic NaHCO₃ ingestion during interval training on changes to muscle buffer capacity, metabolism, and short-term endurance performance. *Journal of applied physiology*, 101(3), 918-925.

Edmonds, R., Leicht, A., Burkett, B., & McKean, M. (2016). Cardiac Autonomic and Salivary Responses to a Repeated Training Bout in Elite Swimmers. *Sports*, 4(1), 13. <https://doi.org/10.3390/sports4010013>

Edmonds, R., Sinclair, W., & Leicht, A. (2013). Effect of a Training Week on Heart Rate Variability in Elite Youth Rugby League Players. *International Journal of Sports Medicine*, 34(12), 1087-1092. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1333720>

Ellis, B. J., & Del Giudice, M. (2019). Developmental Adaptation to Stress : An Evolutionary Perspective. *Annual Review of Psychology*, 70(1), 111-139. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-122216-011732>

Elloumi, M., Maso, F., Michaux, O., Robert, A., & Lac, G. (2003). Behaviour of saliva cortisol [C], testosterone [T] and the T/C ratio during a rugby match and during the post-competition recovery days. *European Journal of Applied Physiology*, 90(1-2), 23-28. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0868-5>

Engert, V., Vogel, S., Efanov, S. I., Duchesne, A., Corbo, V., Ali, N., & Pruessner, J. C. (2011). Investigation into the cross-correlation of salivary cortisol and alpha-amylase responses to psychological stress. *Psychoneuroendocrinology*, 36(9), 1294-1302.

Esquivel, A. G., Torres, B., Corrales, M. M., Salazar, M. G., & Orellana, J. N. (2011). Heart rate variability after three badminton matches. Are there gender differences? *Archivos de Medicina del deporte*, 28(144), 257-264.

- Favero, T. G., Zable, A. C., Bowman, M. B., Thompson, A., & Abramson, J. J. (1995). Metabolic end products inhibit sarcoplasmic reticulum Ca^{2+} release and $[^3\text{H}]$ ryanodine binding. *Journal of Applied Physiology*, 78(5), 1665-1672. <https://doi.org/10.1152/jappl.1995.78.5.1665>
- Filaire, E., Alix, D., Ferrand, C., & Verger, M. (2009). Psychophysiological stress in tennis players during the first single match of a tournament. *Psychoneuroendocrinology*, 34(1), 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2008.08.022>
- Frazier, S. E., & Parker, S. H. (2019). Measurement of physiological responses to acute stress in multiple occupations: A systematic review and implications for front line healthcare providers. *Translational Behavioral Medicine*, 9(1), 158-166. <https://doi.org/10.1093/tbm/iby019>
- Freis, T., Hecksteden, A., Such, U., & Meyer, T. (2017). Effect of sodium bicarbonate on prolonged running performance: A randomized, double-blind, cross-over study. *PloS one*, 12(8), e0182158.
- Freund, H., & Gendry, P. (1978). Lactate kinetics after short strenuous exercise in man. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 39(2), 123-135.
- Freund, H., Oyono-Enguelle, S., Heitz, A., Marbach, J., Ott, C., Zouloumian, P., & Lampert, E. (1986). Work rate-dependent lactate kinetics after exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, 61(3), 932-939.
- Gajer, B., Reine, B., & Bonvin, P. (2002). Analyse descriptive du 400 mètres.
- García-González, S., López-Plaza, D., & Abellán-Aynés, O. (2022). Influence of Competition on Anxiety and Heart Rate Variability in Young Tennis Players. *Healthcare*, 10(11), 2237. <https://doi.org/10.3390/healthcare10112237>
- Gough, L. A., & Sparks, S. A. (2024). The Effects of a Novel Sodium Bicarbonate Ingestion System on Repeated 4 km Cycling Time Trial Performance in Well-Trained Male Cyclists. *Sports Medicine*, 1-12.
- Grgić, D., Babic, V., University of Zagreb, Blažević, I., & Juraj Dobrila University of Pula. (2019). Running Dynamics In Male 400 m Sprint Event. *Series IX Sciences of Human Kinetics*, 12(61)(2), 41-48. <https://doi.org/10.31926/but.shk.2019.12.61.2.37>
- Grgic, J., Pedisic, Z., Saunders, B., Artioli, G. G., Schoenfeld, B. J., McKenna, M. J., Bishop, D. J., Kreider, R. B., Stout, J. R., Kalman, D. S., Arent, S. M., VanDusseldorp, T. A., Lopez, H. L., Ziegenfuss, T. N., Burke, L. M., Antonio, J., & Campbell, B. I. (2021a). International Society of Sports Nutrition position stand: Sodium bicarbonate and exercise performance. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 18(1), 61. <https://doi.org/10.1186/s12970-021-00458-w>
- Guilhem, G., Hanon, C., Gendreau, N., Bonneau, D., Guével, A., & Chennaoui, M. (2015). Salivary Hormones Response to Preparation and Pre-competitive Training of World-class Level Athletes. *Frontiers in Physiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00333>
- Gurton, W., Macrae, H., Gough, L., & King, D. G. (2021). Effects of post-exercise sodium bicarbonate ingestion on acid-base balance recovery and time-to-exhaustion running

performance : A randomised crossover trial in recreational athletes. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 46(9), 1111-1118. <https://doi.org/10.1139/apnm-2020-1120>

Hadzic, M., Eckstein, M. L., & Schugardt, M. (2019). The impact of sodium bicarbonate on performance in response to exercise duration in athletes : A systematic review. *Journal of sports science & medicine*, 18(2), 271.

Hamilton, L. D., Van Anders, S. M., Cox, D. N., & Watson, N. V. (2009). The Effect of Competition on Salivary Testosterone in Elite Female Athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 4(4), 538-542. <https://doi.org/10.1123/ijsp.4.4.538>

Hanon, C. (2019). *Sports à haute intensité : Mieux comprendre la performance pour mieux l'entraîner*. INSEP-Editions.

Hanon, C., & Gajer, B. (2009). Velocity and Stride Parameters of World-Class 400-Meter Athletes Compared With Less Experienced Runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(2), 524-531. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318194e071>

Hanon, C., Lepretre, P.-M., Bishop, D., & Thomas, C. (2010). Oxygen uptake and blood metabolic responses to a 400-m run. *European Journal of Applied Physiology*, 109(2), 233-240. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1339-4>

Hanon, C., Rabate, M., & Thomas, C. (2011). Effect of Expertise on Postmaximal Long Sprint Blood Metabolite Responses. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(9), 2503-2509. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182001807>

Hanton, S., Mellalieu, S. D., & Hall, R. (2004). Self-confidence and anxiety interpretation : A qualitative investigation. *Psychology of sport and exercise*, 5(4), 477-495.

Hargreaves, M., McKenna, M. J., Jenkins, D. G., Warmington, S. A., Li, J. L., Snow, R. J., & Febbraio, M. A. (1998). Muscle metabolites and performance during high-intensity, intermittent exercise. *Journal of Applied Physiology*, 84(5), 1687-1691. <https://doi.org/10.1152/jappl.1998.84.5.1687>

Hauer, R., Tessitore, A., Knaus, R., & Tschann, H. (2020). Lacrosse Athletes Load and Recovery Monitoring : Comparison between Objective and Subjective Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9), 3329. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093329>

Hausmann, M. F., Vleck, C. M., & Farrar, E. S. (2007). A laboratory exercise to illustrate increased salivary cortisol in response to three stressful conditions using competitive ELISA. *Advances in Physiology Education*, 31(1), 110-115. <https://doi.org/10.1152/advan.00058.2006>

Hayes, L. D., Grace, F. M., Baker, J. S., & Sculthorpe, N. (2015). Exercise-induced responses in salivary testosterone, cortisol, and their ratios in men : A meta-analysis. *Sports Medicine*, 45, 713-726.

Heil, D. P. (2010). Acid-base balance and hydration status following consumption of mineral-based alkaline bottled water. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 7, 1-12.

- Hernández-Cruz, G., Quezada-Chacon, J. T., González, R. A., Flores-Miranda, F. J., & Naranjo-Orellana, J. (2017). Effect of consecutive matches on heart rate variability in elite volleyball players. *Revista de Psicología Del Deporte*, 26.
- Hill, A. V., & Lupton, H. (1923). Muscular Exercise, Lactic Acid, and the Supply and Utilization of Oxygen. *QJM, os-16*(62), 135-171. <https://doi.org/10.1093/qjmed/os-16.62.135>
- Hill, D. W. (1999). Energy system contributions in middle-distance running events. *Journal of sports sciences*, 17(6), 477-483.
- Hirvonen, J., Nummela, A., Rusko, H., Rehunen, S., & Härkönen, M. (1992). Fatigue and changes of ATP, creatine phosphate, and lactate during the 400-m sprint. *Can J Sport Sci*, 17(2), 141-144.
- Hollidge-Horvat, M. G., Parolin, M. L., Wong, D., Jones, N. L., & Heigenhauser, G. J. F. (2000). Effect of induced metabolic alkalosis on human skeletal muscle metabolism during exercise. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 278(2), E316-E329. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.2000.278.2.E316>
- Hooshmand, F., Rahmanian, K., Rahmanian, V., Shakeri, M., & Sotoodeh Jahromi, A. (2022). Effect of Competition on the Salivary Cortisol Level in Elite Boy Swimmers. *Trends in Medical Sciences*, 2(2). <https://doi.org/10.5812/tms-129845>
- Hough, J., Leal, D., Scott, G., Taylor, L., Townsend, D., & Gleeson, M. (2021). Reliability of salivary cortisol and testosterone to a high-intensity cycling protocol to highlight overtraining. *Journal of Sports Sciences*, 39(18), 2080-2086. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1918362>
- Huikuri, H. V., Kessler, K. M., Terracall, E., Castellanos, A., Linnaluoto, M. K., & Myerburg, R. J. (1990). Reproducibility and circadian rhythm of heart rate variability in healthy subjects. *The American journal of cardiology*, 65(5), 391-393.
- Hureau, T. J., Ducrocq, G. P., & Blain, G. M. (2016). Peripheral and central fatigue development during all-out repeated cycling sprints. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(3), 391-401.
- James, D. V. B., Munson, S. C., Maldonado-Martin, S., & De Ste Croix, M. B. A. (2012). Heart Rate Variability : Effect of Exercise Intensity on Postexercise Response. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 83(4), 533-539. <https://doi.org/10.1080/02701367.2012.10599142>
- Jerath, R., Beveridge, C., & Barnes, V. A. (2019). Self-Regulation of Breathing as an Adjunctive Treatment of Insomnia. *Frontiers in Psychiatry*, 9, 780. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2018.00780>
- Juel, C. (1997). Lactate-proton cotransport in skeletal muscle. *Physiological Reviews*, 77(2), 321-358. <https://doi.org/10.1152/physrev.1997.77.2.321>
- Juel, C., Klarskov, C., Nielsen, J. J., Krstrup, P., Mohr, M., & Bangsbo, J. (2004). Effect of high-intensity intermittent training on lactate and H⁺ release from human skeletal muscle. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 286(2), E245-E251. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00303.2003>

Takehata, G., Saito, H., Takei, N., Yokoyama, H., & Nakazawa, K. (2024). Changes in muscle coordination patterns during 400-m sprint: Impact of fatigue and performance decline. *European Journal of Sport Science*, 24(3), 341-351. <https://doi.org/10.1002/ejsc.12085>

Kilian, Y., Engel, F., Wahl, P., Achtzehn, S., Sperlich, B., & Mester, J. (2016). Markers of biological stress in response to a single session of high-intensity interval training and high-volume training in young athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 116(11-12), 2177-2186. <https://doi.org/10.1007/s00421-016-3467-y>

Kivlighan, K. T., & Granger, D. A. (2006). Salivary α -amylase response to competition: Relation to gender, previous experience, and attitudes. *Psychoneuroendocrinology*, 31(6), 703-714. <https://doi.org/10.1016/j.psychneuen.2006.01.007>

Kjaer, M., Engfred, K., Fernandes, A., Secher, N. H., & Galbo, H. (1993). Regulation of hepatic glucose production during exercise in humans: Role of sympathoadrenergic activity. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 265(2), E275-E283.

Koziris, L. P. (s. d.). The Authors Discovered that, in highly trained athletes, the relative contribution of the. *Strength and Conditioning Journal*.

Kraemer, R. R., Durand, R. J., Acevedo, E. O., Johnson, L. G., Synovitz, L. B., Kraemer, G. R., Gimpel, T., & Castracane, V. D. (2003). Effects of High-Intensity Exercise on Leptin and Testosterone Concentrations in Well-Trained Males. *Endocrine*, 21(3), 261-266. <https://doi.org/10.1385/ENDO:21:3:261>

Kuoppasalmi, K., Näveri, H., Härkönen, M., & Adlercreutz, H. (1980). Plasma cortisol, androstenedione, testosterone and luteinizing hormone in running exercise of different intensities. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*, 40(5), 403-409. <https://doi.org/10.3109/00365518009101862>

Laborde, S., Allen, M. S., Borges, U., Iskra, M., Zammit, N., You, M., Hosang, T., Mosley, E., & Dosseville, F. (2022). Psychophysiological effects of slow-paced breathing at six cycles per minute with or without heart rate variability biofeedback. *Psychophysiology*, 59(1), e13952. <https://doi.org/10.1111/psyp.13952>

Laborde, S., Hosang, T., Mosley, E., & Dosseville, F. (2019). Influence of a 30-Day Slow-Paced Breathing Intervention Compared to Social Media Use on Subjective Sleep Quality and Cardiac Vagal Activity. *Journal of Clinical Medicine*, 8(2), 193. <https://doi.org/10.3390/jcm8020193>

Lacour, J., Bouvat, E., & Barthelemy, J. (1990). Post-competition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 61(3), 172-176.

Lancha Junior, A. H., De Salles Painelli, V., Saunders, B., & Artioli, G. G. (2015). Nutritional Strategies to Modulate Intracellular and Extracellular Buffering Capacity During High-Intensity Exercise. *Sports Medicine*, 45(S1), 71-81. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0397-5>

Lane, A. R., & Hackney, A. C. (2014). *Relationship between salivary and serum testosterone levels in response to different exercise intensities*.

- Lastella, M., Roach, G. D., Halson, S. L., & Sargent, C. (2016). The Chronotype of Elite Athletes. *Journal of Human Kinetics*, 54(1), 219-225. <https://doi.org/10.1515/hukin-2016-0049>
- Léger, D., Debellemanni, E., Rabat, A., Bayon, V., Benchenane, K., & Chennaoui, M. (2018). Slow-wave sleep: From the cell to the clinic. *Sleep Medicine Reviews*, 41, 113-132. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2018.01.008>
- Lehrer, P., Kaur, K., Sharma, A., Shah, K., Huseby, R., Bhavsar, J., Sgobba, P., & Zhang, Y. (2020). Heart Rate Variability Biofeedback Improves Emotional and Physical Health and Performance: A Systematic Review and Meta Analysis. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 45(3), 109-129. <https://doi.org/10.1007/s10484-020-09466-z>
- Lehrer, P. M. (1996). Varieties of relaxation methods and their unique effects. *International Journal of Stress Management*, 3(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/BF01857884>
- Li, Q., Steward, C. J., Cullen, T., Che, K., & Zhou, Y. (2022). Presleep Heart-Rate Variability Biofeedback Improves Mood and Sleep Quality in Chinese Winter Olympic Bobsleigh Athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(10), 1516-1526. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2022-0037>
- Lim, I.-S. (2018). Comparative analysis of the correlation between anxiety, salivary alpha amylase, cortisol levels, and athletes' performance in archery competitions. *Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry*, 22(4), 69-74. <https://doi.org/10.20463/jenb.2018.0032>
- Lim, S.-T., Kim, D.-Y., Kwon, H.-T., & Lee, E. (2021). Sleep quality and athletic performance according to chronotype. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 13(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s13102-020-00228-2>
- Limmer, M., Eibl, A. D., & Platen, P. (2018). Enhanced 400-m sprint performance in moderately trained participants by a 4-day alkalizing diet: A counterbalanced, randomized controlled trial. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 15(1), 25.
- Lindh, A., Peyrebrune, M., Ingham, S., Bailey, D., & Folland, J. (2008). Sodium Bicarbonate Improves Swimming Performance. *International Journal of Sports Medicine*, 29(6), 519-523. <https://doi.org/10.1055/s-2007-989228>
- Lipmann, F. (1941). Metabolic Generation and Utilization of Phosphate Bond Energy. In F. F. Nord & C. H. Werkman (Éds.), *Advances in Enzymology—And Related Areas of Molecular Biology* (1^{re} éd., Vol. 1, p. 99-162). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470122464.ch4>
- Lopes-Silva, J. P., Reale, R., & Franchini, E. (2019). Acute and chronic effect of sodium bicarbonate ingestion on Wingate test performance: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Sports Sciences*, 37(7), 762-771. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1524739>
- Louis, J., Billaut, F., Bernad, T., Vettoretti, F., Hausswirth, C., & Brisswalter, J. (2013). Physiological demands of a simulated BMX competition. *International journal of sports medicine*, 34(06), 491-496.
- Ma, X., Yue, Z.-Q., Gong, Z.-Q., Zhang, H., Duan, N.-Y., Shi, Y.-T., Wei, G.-X., & Li, Y.-F. (2017). The Effect of Diaphragmatic Breathing on Attention, Negative Affect and Stress in Healthy Adults. *Frontiers in Psychology*, 8, 874. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00874>

- Mahboobi, S., Mollard, R., Tangri, N., Askin, N., Rabbani, R., Abou-Setta, A. M., & Mackay, D. (2023). *Effects of dietary interventions focused on adding base in the management of metabolic acidosis in adults with chronic kidney disease : A protocol for systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials*. <https://doi.org/10.1101/2023.04.06.23288246>
- Makivić, B., Nikić, M. D., & Willis, M. S. (2013). Heart Rate Variability (HRV) as a Tool for Diagnostic and Monitoring Performance in Sport and Physical Activities.
- Malik, M. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use: Task force of the European Society of Cardiology and the North American Society for Pacing and Electrophysiology. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 1(2), 151-181.
- Manresa-Rocamora, A., Sarabia, J. M., Javaloyes, A., Flatt, A. A., & Moya-Ramon, M. (2021). Heart rate variability-guided training for enhancing cardiac-vagal modulation, aerobic fitness, and endurance performance: A methodological systematic review with meta-analysis. *International journal of environmental research and public health*, 18(19), 10299.
- Martens, R. (1990). Competitive anxiety in sport. *Human kinetics*.
- Martinet, G., Ferrand, C., Guillet, E., & Gauthier, S. (2010). Validation of the French version of the Competitive State Anxiety Inventory-2 Revised (CSAI-2R) including frequency and direction scales. *Psychology of Sport and exercise*, 11(1), 51-57.
- Massin, M. M., Maeyns, K., Withofs, N., Ravet, F., & Gérard, P. (2000). Circadian rhythm of heart rate and heart rate variability. *Archives of disease in childhood*, 83(2), 179-182.
- Matson, L. G., & Tran, Z. V. (1993). Effects of Sodium Bicarbonate Ingestion on Anaerobic Performance : A Meta-Analytic Review. *International Journal of Sport Nutrition*, 3(1), 2-28. <https://doi.org/10.1123/ijnsn.3.1.2>
- Maughan, R., Gleeson, M., & Greenhaff, P. (1997). *Biochemistry of exercise and training* : Oxford University Press.
- McKay, A. K., Stellingwerff, T., Smith, E. S., Martin, D. T., Mujika, I., Goosey-Tolfrey, V. L., Sheppard, J., & Burke, L. M. (2021). Defining training and performance caliber : A participant classification framework. *International journal of sports physiology and performance*, 17(2), 317-331.
- McNaughton, L. R., Gough, L., Deb, S., Bentley, D., & Sparks, S. A. (2016). Recent Developments in the Use of Sodium Bicarbonate as an Ergogenic Aid. *Current Sports Medicine Reports*, 15(4), 233-244. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000283>
- Mehrsafar, A. H., Rosa, M. A. S., Zadeh, A. M., & Gazerani, P. (2020). A feasibility study of application and potential effects of a single session transcranial direct current stimulation (tDCS) on competitive anxiety, mood state, salivary levels of cortisol and alpha amylase in elite athletes under a real-world competition. *Physiology & Behavior*, 227, 113173. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2020.113173>

- Mehrsafar, A. H., Strahler, J., Gazerani, P., Khabiri, M., Sánchez, J. C. J., Moosakhani, A., & Zadeh, A. M. (2019). The effects of mindfulness training on competition-induced anxiety and salivary stress markers in elite Wushu athletes : A pilot study. *Physiology & Behavior*, 210, 112655. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2019.112655>
- Mehta, P. H., Wuehrmann, E. V., & Josephs, R. A. (2009). When are low testosterone levels advantageous? The moderating role of individual versus intergroup competition. *Hormones and Behavior*, 56(1), 158-162. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2009.04.001>
- Mero, A. A., Hirvonen, P., Saarela, J., Hulmi, J. J., Hoffman, J. R., & Stout, J. R. (2013). Effect of sodium bicarbonate and beta-alanine supplementation on maximal sprint swimming. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 10(1), 52. <https://doi.org/10.1186/1550-2783-10-52>
- Messonnier, L., Freund, H., Bourdin, M., Belli, A., & Lacour, J.-R. (1997). Lactate exchange and removal abilities in rowing performance: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 29(3), 396-401. <https://doi.org/10.1097/00005768-199703000-00016>
- Migliaccio, G. M., Russo, L., Maric, M., & Padulo, J. (2023). Sports Performance and Breathing Rate : What Is the Connection? A Narrative Review on Breathing Strategies. *Sports*, 11(5), 103. <https://doi.org/10.3390/sports11050103>
- Miranda, J. M. D. Q., Maia, A., Rica, R. L., Barbosa, W. A., Souza, A. D. S., Bergamin, M., Valenti, V. E., Baker, J. S., Shimojo, G. L., Prestes, J., Stone, W. J., Bocalini, D. S., & Wich, R. B. (2019). Effects of a Competitive Season on Autonomic Heart Rate Modulation in Field Soccer Athletes. *International Journal of Exercise Science*, 12(2), 1198-1205. <https://doi.org/10.70252/DZOI4036>
- Mishica, C., Kyröläinen, H., Hynynen, E., Nummela, A., Holmberg, H.-C., & Linnamo, V. (2021). Relationships between Heart Rate Variability, Sleep Duration, Cortisol and Physical Training in Young Athletes. *Journal of Sports Science and Medicine*, 778-788. <https://doi.org/10.52082/jssm.2021.778>
- Monje, C., Rada, I., Castro-Sepulveda, M., Peñailillo, L., Deldicque, L., & Zbinden-Foncea, H. (2020). Effects of a high intensity interval session on mucosal immune function and salivary hormones in male and female endurance athletes. *Journal of sports science & medicine*, 19(2), 436.
- Montaruli, A., Galasso, L., Caumo, A., Cè, E., Pesenti, C., Roveda, E., & Esposito, F. (2017). The circadian typology : The role of physical activity and melatonin. *Sport Sciences for Health*, 13(3), 469-476. <https://doi.org/10.1007/s11332-017-0389-y>
- Mortatti, A. L., Moreira, A., Aoki, M. S., Crewther, B. T., Castagna, C., De Arruda, A. F. S., & Filho, J. M. (2012). Effect of Competition on Salivary Cortisol, Immunoglobulin A, and Upper Respiratory Tract Infections in Elite Young Soccer Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(5), 1396-1401. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31822e7b63>
- Mosley, E., & Laborde, S. (2024). A scoping review of heart rate variability in sport and exercise psychology. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 17(2), 773-847. <https://doi.org/10.1080/1750984X.2022.2092884>

Mujika, Iñigo; Goya, Alfredo; Padilla, Sabino; Grijalba, Ana; Gorostiaga, Esteban; Ibañez, Javier. Physiological responses to a 6-d taper in middle-distance runners: influence of training intensity and volume. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 32(2):p 511, February 2000.

Myall, K., Montero-Marin, J., Gorczynski, P., Kajee, N., Syed Sheriff, R., Bernard, R., Harriss, E., & Kuyken, W. (2023). Effect of mindfulness-based programmes on elite athlete mental health : A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 57(2), 99-108. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-105596>

Myllymäki, T., Kyröläinen, H., Savolainen, K., Hokka, L., Jakonen, R., Juuti, T., Martinmäki, K., Kaartinen, J., Kinnunen, M.-L., & Rusko, H. (2011). Effects of vigorous late-night exercise on sleep quality and cardiac autonomic activity : Late-night exercise and sleep. *Journal of Sleep Research*, 20(1pt2), 146-153. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2010.00874.x>

McNaughton, L., & Thompson, D. (2001). Acute versus chronic sodium bicarbonate ingestion and anaerobic work and power output. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 41(4), 456.

Neves, R. S., Da Silva, M. A. R., De Rezende, M. A. C., Caldo-Silva, A., Pinheiro, J., & Santos, A. M. C. (2023). Salivary Markers Responses in the Post-Exercise and Recovery Period : A Systematic Review. *Sports*, 11(7), 137. <https://doi.org/10.3390/sports11070137>

Nielsen, H. B., Boushel, R., Madsen, P., & Secher, N. H. (1999). Cerebral desaturation during exercise reversed by O₂ supplementation. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 277(3), H1045-H1052. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.1999.277.3.H1045>

Nuuttila, O., Seipäjäarvi, S., Kyröläinen, H., & Nummela, A. (2022). Reliability and Sensitivity of Nocturnal Heart Rate and Heart-Rate Variability in Monitoring Individual Responses to Training Load.. *International journal of sports physiology and performance*, 1-8 . <https://doi.org/10.1123/ijsp.2022-0145>.

Nielsen, O. B., Ørtenblad, N., Lamb, G. D., & Stephenson, D. G. (2004). Excitability of the T-tubular system in rat skeletal muscle : Roles of K⁺ and Na⁺ gradients and Na⁺ -K⁺ pump activity. *The Journal of Physiology*, 557(1), 133-146. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.059014>

Nobue, A., Sano, K., & Ishikawa, M. (2024). Magnetic Garments Promote Parasympathetic Dominance and Improve Sleep Quality in Male Long-Distance Runners Following a 30 km Run. *Sensors*, 24(21), 6820. <https://doi.org/10.3390/s24216820>

Ntovas, P., Loumprinis, N., Maniatakos, P., Margaritidi, L., & Rahiotis, C. (2022). The Effects of Physical Exercise on Saliva Composition : A Comprehensive Review. *Dentistry Journal*, 10(1), 7. <https://doi.org/10.3390/dj10010007>

Nummela, A., Vuorimaa, T., & Rusko, H. (1992). Changes in force production, blood lactate and EMG activity in the 400-m sprint. *Journal of sports sciences*, 10(3), 217-228.

Oda, S., & Shirakawa, K. (2014). Sleep onset is disrupted following pre-sleep exercise that causes large physiological excitement at bedtime. *European Journal of Applied Physiology*, 114(9), 1789-1799. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-2873-2>

Ogilvie, R. D., Wilkinson, R. T., & Allison, S. (1989). The Detection of Sleep Onset: Behavioral, Physiological, and Subjective Convergence. *Sleep*, 12(5), 458-474. <https://doi.org/10.1093/sleep/12.5.458>

Oyono-Enguelle, S., Marbach, J., Heitz, A., Ott, C., Gartner, M., Pape, A., Vollmer, J. C., & Freund, H. (1990). Lactate removal ability and graded exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, 68(3), 905-911. <https://doi.org/10.1152/jappl.1990.68.3.905>

Pagani, E., Gavazzoni, N., Bernardelli, G., Malacarne, M., Solaro, N., Giusti, E., Castelnovo, G., Volpi, P., Carimati, G., & Lucini, D. (2023). Psychological Intervention Based on Mental Relaxation to Manage Stress in Female Junior Elite Soccer Team : Improvement in Cardiac Autonomic Control, Perception of Stress and Overall Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 942. <https://doi.org/10.3390/ijerph20020942>

Pawlowski, R., Buszko, K., Newton, J., Kujawski, S., & Zalewski, P. (2021). Heart Rate Asymmetry Analysis During Head-Up Tilt Test in Healthy Men. *Frontiers in Physiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.657902>.

Peart, D. J., Siegler, J. C., & Vince, R. V. (2012). *Practical Recommendations For Coaches And Athletes: A Meta-Analysis Of Sodium Bicarbonate Use For Athletic Performance*.

Peçanha, T., Bartels, R., Brito, L. C., Paula-Ribeiro, M., Oliveira, R. S., & Goldberger, J. J. (2017). Methods of assessment of the post-exercise cardiac autonomic recovery : A methodological review. *International Journal of Cardiology*, 227, 795-802. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2016.10.057>

Pelka, M., Heidari, J., Ferrauti, A., Meyer, T., Pfeiffer, M., & Kellmann, M. (2016). Relaxation techniques in sports : A systematic review on acute effects on performance. *Performance Enhancement & Health*, 5(2), 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.peh.2016.05.003>

Perciavalle, V., Blandini, M., Fecarotta, P., Buscemi, A., Di Corrado, D., Bertolo, L., Fichera, F., & Coco, M. (2017). The role of deep breathing on stress. *Neurological Sciences*, 38(3), 451-458. <https://doi.org/10.1007/s10072-016-2790-8>

Pierpont, G. L., Stolpmann, D. R., & Gornick, C. C. (2000). Heart rate recovery post-exercise as an index of parasympathetic activity. *Journal of the Autonomic Nervous System*, 80(3), 169-174. [https://doi.org/10.1016/S0165-1838\(00\)00090-4](https://doi.org/10.1016/S0165-1838(00)00090-4)

Pilegaard, H., Bangsbo, J., Richter, E. A., & Juel, C. (1994). Lactate transport studied in sarcolemmal giant vesicles from human muscle biopsies : Relation to training status. *Journal of Applied Physiology*, 77(4), 1858-1862. <https://doi.org/10.1152/jappl.1994.77.4.1858>

Plews, D. J., Laursen, P. B., Stanley, J., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2013). Training Adaptation and Heart Rate Variability in Elite Endurance Athletes : Opening the Door to Effective Monitoring. *Sports Medicine*, 43(9), 773-781. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0071-8>

Podstawski, R., Boraczyński, M., Nowosielska-Swadźba, D., & Zwolińska, D. (2014). Heart rate variability during pre-competition and competition periods in volleyball players. *Biomedical Human Kinetics*, 6(1). <https://doi.org/10.2478/bhk-2014-0004>

Pressman, M. R., & Fry, J. M. (1989). Relationship of Autonomic Nervous System Activity to Daytime Sleepiness and Prior Sleep. *Sleep*, 12(3), 239-245. <https://doi.org/10.1093/sleep/12.3.239>

Ragone, L., Guilherme Vieira, J., Camaroti Laterza, M., Leitão, L., Da Silva Novaes, J., Macedo Vianna, J., & Ricardo Dias, M. (2020). Acute Effect of Sodium Bicarbonate Supplementation on Symptoms of Gastrointestinal Discomfort, Acid-Base Balance, and Performance of Jiu-Jitsu Athletes. *Journal of Human Kinetics*, 75(1), 85-93. <https://doi.org/10.2478/hukin-2020-0039>

Raphael, K. L. (2019). Metabolic Acidosis in CKD : Core Curriculum 2019. *American Journal of Kidney Diseases*, 74(2), 263-275. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2019.01.036>

Remer, T., & Manz, F. (1995). Potential renal acid load of foods and its influence on urine pH. *Journal of the American Dietetic Association*, 95(7), 791-797.

Rice, S. M., Gwyther, K., Santesteban-Echarri, O., Baron, D., Gorczynski, P., Goutteborge, V., Reardon, C. L., Hitchcock, M. E., Hainline, B., & Purcell, R. (2019). Determinants of anxiety in elite athletes : A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 53(11), 722-730. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2019-100620>

Richard, R., Jimenez, L., Duvallet, A., & Rieu, M. (2000). Effet d'une boisson bicarbonatée sodée sur les adaptations physiologiques à l'effort. *Science & sports*, 15(1), 18-25.

Robergs, R. A., Ghiasvand, F., & Parker, D. (2004). Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 287(3), R502-R516. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00114.2004>

Robergs, R., Hutchinson, K., Hendee, S., Madden, S., & Siegler, J. (2005). Influence of pre-exercise acidosis and alkalosis on the kinetics of acid-base recovery following intense exercise. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 15(1), 59-74.

Roberts, S. S. H., Teo, W.-P., Aisbett, B., & Warmington, S. A. (2019). Extended Sleep Maintains Endurance Performance Better than Normal or Restricted Sleep. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 51(12), 2516-2523. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002071>

Roberts, S. S. H., Teo, W.-P., & Warmington, S. A. (2019a). Effects of training and competition on the sleep of elite athletes : A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 53(8), 513-522. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099322>

Robson-Ansley, P. J., Gleeson, M., & Ansley, L. (2009). Fatigue management in the preparation of Olympic athletes. *Journal of Sports Sciences*, 27(13), 1409-1420. <https://doi.org/10.1080/02640410802702186>

Rodrigues Neto Angéloco, L., Arces De Souza, G. C., Almeida Romão, E., & Garcia Chiarello, P. (2018). Alkaline Diet and Metabolic Acidosis : Practical Approaches to the Nutritional Management of Chronic Kidney Disease. *Journal of Renal Nutrition*, 28(3), 215-220. <https://doi.org/10.1053/j.jrn.2017.10.006>

Saboul, D. (2013). Apports de la variabilité de la fréquence cardiaque dans l'évaluation de la charge d'entraînement et le suivi d'athlètes: aspects méthodologiques et applications pratiques (*Doctoral dissertation, Université Claude Bernard-Lyon I*).

Sagheer, Dr. A. H., Nassif, A. J., & Batwli, A. N. (2023). Special exercises according to the effect of aerobic and anaerobic effort on developing some physiological variables and speed of recovery among young 400 m runners. *International Journal of Physiology, Nutrition and Physical Education*, 8(2), 483-489. <https://doi.org/10.22271/journalofsport.2023.v8.i2g.2841>

Sahlin, K., Harris, R. C., Nylin, B., & Hultman, E. (1976). Lactate content and pH in muscle samples obtained after dynamic exercise. *Pflügers Archiv European Journal of Physiology*, 367(2), 143-149. <https://doi.org/10.1007/BF00585150>

Saks, V. A., Kongas, O., Vendelin, M., & Kay, L. (2000). Role of the creatine/phosphocreatine system in the regulation of mitochondrial respiration. *Acta Physiologica Scandinavica*, 168(4), 635-641. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201x.2000.00715.x>

Sammito, S., Sammito, W., & Böckelmann, I. (2016). The circadian rhythm of heart rate variability. *Biological Rhythm Research*, 47, 717 - 730. <https://doi.org/10.1080/09291016.2016.1183887>.

Sartor, F., Capuzzoni, S., Rospo, G., La Torre, A., Vailati, F., & Vailati, E. (2017). Influence of Competition Day on Cognitive Control and HRV in Young Male Gymnasts. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(7), 1982-1993. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001652>

Schmitt, L., Regnard, J., & Millet, G. P. (2015). Monitoring Fatigue Status with HRV Measures in Elite Athletes: An Avenue Beyond RMSSD? *Frontiers in Physiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00343>

Schmitt, L., Regnard, J., Parmentier, A. L., Mauny, F., Mourot, L., Coulmy, N., & Millet, G. P. (2015). Typology of “fatigue” by heart rate variability analysis in elite nordic-skiers. *International journal of sports medicine*, 36(12), 999-1007.

Schneiderman, N., Ironson, G., & Siegel, S. D. (2005). Stress and health: Psychological, behavioral, and biological determinants. *Annu. Rev. Clin. Psychol.*, 1(1), 607-628.

Scott, S. B., Graham-Engeland, J. E., Engeland, C. G., Smyth, J. M., Almeida, D. M., Katz, M. J., Lipton, R. B., Mogle, J. A., Munoz, E., & Ram, N. (2015). The effects of stress on cognitive aging, physiology and emotion (ESCAPE) project. *BMC psychiatry*, 15, 1-14.

Seiler, S., Haugen, O., & Kuffel, E. (2007). Autonomic Recovery after Exercise in Trained Athletes: Intensity and Duration Effects. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(8), 1366-1373. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318060f17d>

Shao, R., Man, I. S. C., & Lee, T. M. C. (2024). The Effect of Slow-Paced Breathing on Cardiovascular and Emotion Functions: A Meta-Analysis and Systematic Review. *Mindfulness*, 15(1), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12671-023-02294-2>

Siegler, J. C., Marshall, P. W. M., Bishop, D., Shaw, G., & Green, S. (2016). Mechanistic Insights into the Efficacy of Sodium Bicarbonate Supplementation to Improve Athletic Performance. *Sports Medicine - Open*, 2(1), 41. <https://doi.org/10.1186/s40798-016-0065-9>

Smith, S. M., & Vale, W. W. (2006). The role of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis in neuroendocrine responses to stress. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 8(4), 383-395. <https://doi.org/10.31887/DCNS.2006.8.4/ssmith>

Spielberger, C. D. (1972). CURRENT TRENDS IN THEORY AND RESEARCH ON ANXIETY. In *Anxiety* (p. 3-19). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-657401-2.50008-3>

Spriet, L. (1995). Anaerobic metabolism during high-intensity exercise. *Exercise Metabolism/Human Kinetics*.

Stanley, J., D'Auria, S., & Buchheit, M. (2015). Cardiac Parasympathetic Activity and Race Performance : An Elite Triathlete Case Study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(4), 528-534. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0196>

Stanley, J., Peake, J. M., & Buchheit, M. (2013). Cardiac Parasympathetic Reactivation Following Exercise : Implications for Training Prescription. *Sports Medicine*, 43(12), 1259-1277. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0083-4>

Stratakis, C. A., & Chrousos, G. P. (1995). Neuroendocrinology and pathophysiology of the stress system. *ANNALS-NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES*, 771, 1-18.

Stults-Kolehmainen, M. A., Bartholomew, J. B., & Sinha, R. (2014). Chronic Psychological Stress Impairs Recovery of Muscular Function and Somatic Sensations Over a 96-Hour Period. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(7), 2007-2017. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000335>

Taylor, S. R., Rogers, G. G., & Driver, H. S. (1997). Effects of training volume on sleep, psychological, and selected physiological profiles of elite female swimmers. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(5), 688-693.

Thomas, C., Delfour-Peyrethon, R., Dorel, S., & Hanon, C. (2021). Positive effects of pre-exercise metabolic alkalosis on perceived exertion and post-exercise squat jump performance in world-class cyclists. *The Journal of Strength & Conditioning Research*.

Thomas, C., Bishop, D. J., Lambert, K., Mercier, J., & Brooks, G. A. (2012). Effects of acute and chronic exercise on sarcolemmal MCT1 and MCT4 contents in human skeletal muscles : Current status. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 302(1), R1-R14. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00250.2011>

Thomas, C., Perrey, S., Lambert, K., Hugon, G., Mornet, D., & Mercier, J. (2005). Monocarboxylate transporters, blood lactate removal after supramaximal exercise, and fatigue indexes in humans. *Journal of Applied Physiology*, 98(3), 804-809. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01057.2004>

Thomas, H. J., Ang, T., Morrison, D. J., Keske, M. A., & Parker, L. (2023). Acute exercise and high-glucose ingestion elicit dynamic and individualized responses in systemic markers of redox homeostasis. *Frontiers in Immunology*, 14, 1127088. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1127088>

- Thomas, J. M., Kern, P. A., Bush, H. M., McQuerry, K. J., Black, W. S., Clasey, J. L., & Pendergast, J. S. (2020). Circadian rhythm phase shifts caused by timed exercise vary with chronotype. *JCI Insight*, 5(3), e134270. <https://doi.org/10.1172/jci.insight.134270>
- Tobias, G., Benatti, F. B., De Salles Painelli, V., Roschel, H., Gualano, B., Sale, C., Harris, R. C., Lancha, A. H., & Artioli, G. G. (2013). Additive effects of beta-alanine and sodium bicarbonate on upper-body intermittent performance. *Amino Acids*, 45(2), 309-317. <https://doi.org/10.1007/s00726-013-1495-z>
- Tomazin, K., Morin, J. B., Strojnik, V., Podpecan, A., & Millet, G. Y. (2012). Fatigue after short (100-m), medium (200-m) and long (400-m) treadmill sprints. *European Journal of Applied Physiology*, 112(3), 1027-1036. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2058-1>
- Tornero-Aguilera, J. F., Jimenez-Morcillo, J., Rubio-Zarapuz, A., & Clemente-Suárez, V. J. (2022). Central and peripheral fatigue in physical exercise explained: A narrative review. *International journal of environmental research and public health*, 19(7), 3909.
- Trinder, J., Waloszek, J., Woods, M. J., & Jordan, A. S. (2012). Sleep and cardiovascular regulation. *Pflügers Archiv - European Journal of Physiology*, 463(1), 161-168. <https://doi.org/10.1007/s00424-011-1041-3>
- Tsigos, C., & Chrousos, G. P. (2002). Hypothalamic–pituitary–adrenal axis, neuroendocrine factors and stress. *Journal of Psychosomatic Research*, 53(4), 865-871. [https://doi.org/10.1016/S0022-3999\(02\)00429-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3999(02)00429-4)
- Van Hall, G. (2010). Lactate kinetics in human tissues at rest and during exercise. *Acta physiologica*, 199(4), 499-508.
- VanBruggen, M. D., Hackney, A. C., McMurray, R. G., & Ondrak, K. S. (2011). The Relationship Between Serum and Salivary Cortisol Levels in Response to Different Intensities of Exercise. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(3), 396-407. <https://doi.org/10.1123/ijsp.6.3.396>
- Vitale, J. A., & Weydahl, A. (2017). Chronotype, Physical Activity, and Sport Performance: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 47(9), 1859-1868. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0741-z>
- Walsh, N. P., Halson, S. L., Sargent, C., Roach, G. D., Nédélec, M., Gupta, L., Leeder, J., Fullagar, H. H., Coutts, A. J., Edwards, B. J., Pullinger, S. A., Robertson, C. M., Burniston, J. G., Lastella, M., Le Meur, Y., Hausswirth, C., Bender, A. M., Grandner, M. A., & Samuels, C. H. (2021). Sleep and the athlete: Narrative review and 2021 expert consensus recommendations. *British Journal of Sports Medicine*, 55(7), 356-368. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-102025>
- Weber, J., Angerer, P., & Apolinário-Hagen, J. (2022). Physiological reactions to acute stressors and subjective stress during daily life: A systematic review on ecological momentary assessment (EMA) studies. *PLOS ONE*, 17(7), e0271996. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271996>
- Westerblad, H., Allen, D. G., & Lännergren, J. (2002). Muscle Fatigue: Lactic Acid or Inorganic Phosphate the Major Cause? *Physiology*, 17(1), 17-21. <https://doi.org/10.1152/physiologyonline.2002.17.1.17>

Withers, R. T., Sherman, W. M., Clark, D. G., Esselbach, P. C., Nolan, S. R., Mackay, M. H., & Brinkman, M. (s. d.). *Muscle metabolism during 30, 60 and 90 s of maximal cycling on an air-braked ergometer.*

You, M., Laborde, S., Zammit, N., Iskra, M., Borges, U., Dosseville, F., & Vaughan, R. S. (2021). Emotional Intelligence Training : Influence of a Brief Slow-Paced Breathing Exercise on Psychophysiological Variables Linked to Emotion Regulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(12), 6630. <https://doi.org/10.3390/ijerph18126630>

Yousif, H. A., Norasmadi, A. R., Bin Salleh, A. F., Ammar, Z., & Alfarhan, K. A. (2019). Assessment of Muscles Fatigue during 400-Meters Running Strategies Based on the Surface EMG Signals. *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, 42, 1-13. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JBBBE.42.1>

Zaccaro, A., Piarulli, A., Laurino, M., Garbella, E., Menicucci, D., Neri, B., & Gemignani, A. (2018). How Breath-Control Can Change Your Life : A Systematic Review on Psycho-Physiological Correlates of Slow Breathing. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 353. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00353>

Zajac, A., Cholewa, J., Poprzecki, S., & Wa, Z. (s. d.). *Effects of sodium bicarbonate ingestion on swim performance in youth athletes.*

Zhou, N., Fan, Y., Wang, X., Wang, J., & Wu, H. (2022). Acute enteric-coated sodium bicarbonate has negligible effect on anaerobic performance but affects metabolomics and attenuates the gastrointestinal response. *Frontiers in Physiology*, 13, 996381. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.996381>

Zilioli, S., & Watson, N. V. (2012). The hidden dimensions of the competition effect : Basal cortisol and basal testosterone jointly predict changes in salivary testosterone after social victory in men. *Psychoneuroendocrinology*, 37(11), 1855-1865. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2012.03.022>

Zilioli, S., & Watson, N. V. (2014). Testosterone across successive competitions : Evidence for a ‘winner effect’ in humans? *Psychoneuroendocrinology*, 47, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2014.05.001>

ANNEXE n° 1

LES OBJECTIFS

Aide la prise de décisions des entraîneurs et des responsables fédéraux par le développement de nouvelles connaissances (recherche) ou l'accompagnement scientifique sur le terrain (ASP)

LES MISSIONS & LES ACTIONS

Projets de Recherche en cours

Accompagnement Scientifique à la Performance (ASP)

Christine Hanon
Référénte scientifique FFA

Projet PÉGASE

Profil
force-vitesse

FULGUR

Blessures aux
ischios-jambiers

Vulgarisation

Enquête sociologique

Accessibilité

Carrières de
haut niveau

Identifier les freins et leviers d'accès à la
Haute Performance chez les athlètes féminines

Adapter la charge d'entraînement pour
prévenir des blessures musculaires

Environnement
sportif

Entraînement
invisible

Sommeil

Diffuser les connaissances scientifiques
au plus grand nombre

Thèses CIFRE FFA

Caractérisation biomécanique
du sprint en virage

REVEA

Transmissions

Réalité
virtuelle

Relais

Utiliser les technologies virtuelles pour
améliorer l'entraînement

Suivi biomécanique et physiologique

Rapport d'analyse de
courses et concours

Vidéo, laser,
Optojump...

Variabilité de la
Fréquence
Cardiaque,
Lactates

Suivi des paramètres clés de la
performances chez les athlètes top Elite

VERTUO

1/2 fond, fond,
trail et saut
féminin

Comprendre l'émergence de troubles du
comportement alimentaire

Perche

Ingénierie

Science
2024

Étudier les propriétés mécaniques
de la perche lors du saut

Stratégie
d'acclimatation

Préparation des J.O.

Stratégies de
cooling

Hydratation &
nutrition

Accompagner les athlètes dans leur préparation aux
conditions climatiques extrêmes (exemple de Tokyo)

ANNEXE n° 2

Athlète

Informations

Prénom NOM

Âge

Fédération

18,60

FFA

ans

Taille

Masse

Date de naissance

Discipline

Date du Test

168

49

mercredi 26 décembr...

3000m Steeple

Plusieurs sélections

cm

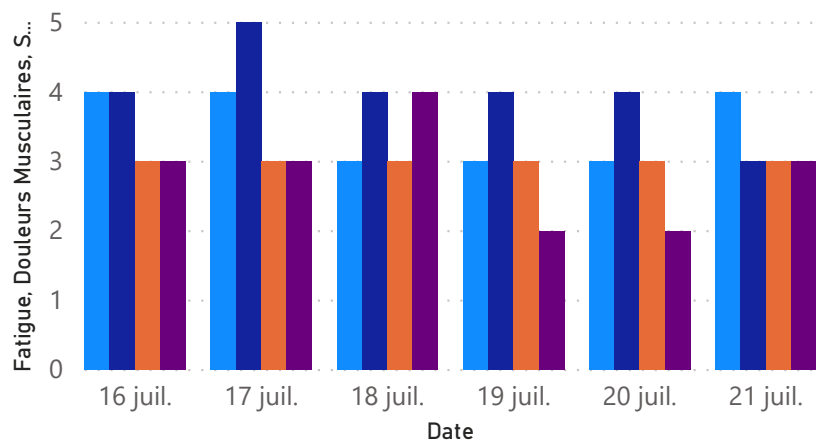
kg

Résultats

Variabilité de la Fréquence Cardiaque

Fatigue, Douleurs Musculaires, Stress et Qualité du Sommeil par Date

● Fatigue ● Douleurs Musculaires ● Stress ● Qualité du Sommeil

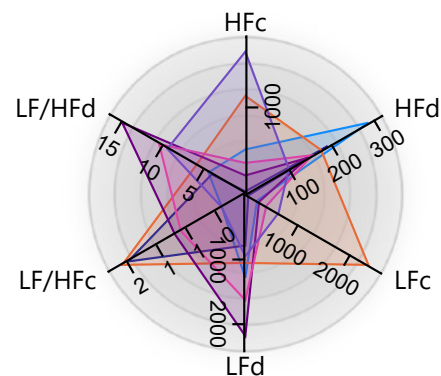


23/02/2020

21/07/2020

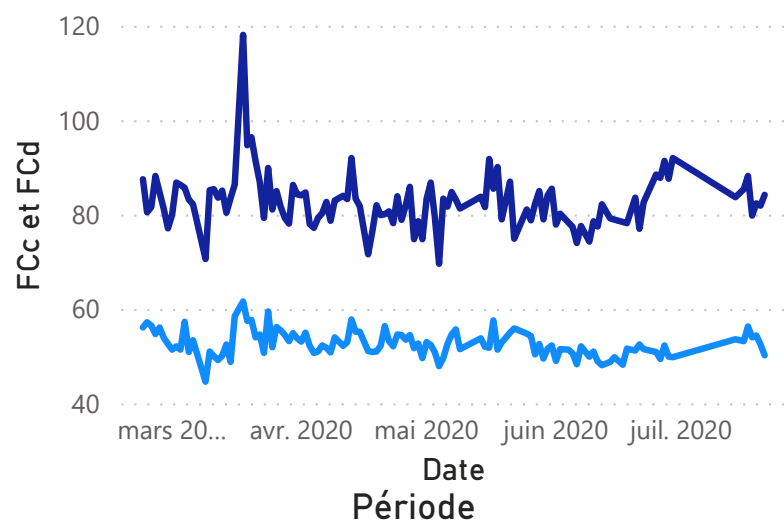
Date	Heure	Fenêtre choisie	RPE	Quantité de Sommeil
16 juillet	8h55	4'25/3'59	7	9h
17 juillet	9h24	4'34/4'23	7	10h
18 juillet	8h18	4'33/4'20	4	9h15
19 juillet	9h28	4'30/4'26	7	9h15
20 juillet	9h53	4'18/4'28	4	10h30

Date ● 16 juillet ● 17 juillet ● 18 juillet



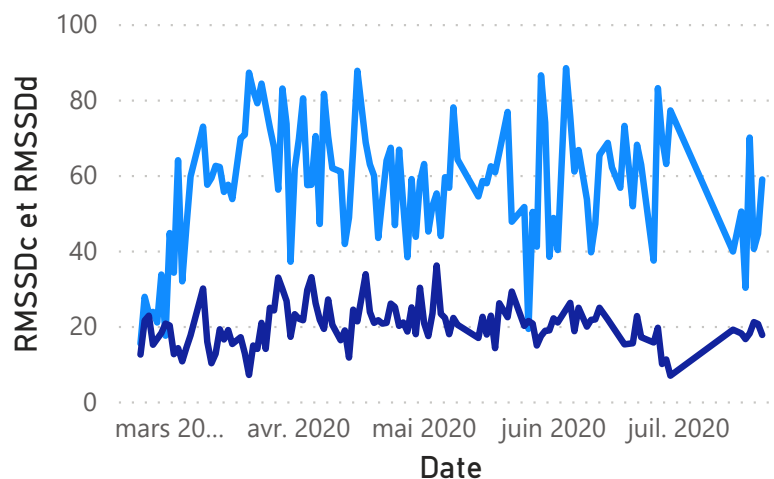
FCc et FCd par Date

● FCc ● FCd



RMSSDc et RMSSDd par Date

● RMSSDc ● RMSSDd



Commentaire

Retour à l'INSEP après 1 semaine de vacance = en mode stage

Veille 30' footing + petite aérobie (2000 /2x10x100m) + petite muscul et Kiné+cryo+yoga

ANNEXE n° 3

France **FR** vers USA **US** + 9 heures : ex 15h en France = 6h aux USA

Départ le lundi 23/05 ou mardi 24/05

Course (1500m) le 28/05 (en début d'après-midi)

OBJECTIF : SE DÉCALER SEULEMENT DE 5 HEURES

SE COUCHER VERS 20h30

- ✓ Prendre une **douche froide** (ou finir par du froid sur la nuque)
- ✓ Prendre son dîner en privilégiant **les glucides**
- ✓ **S'exposer à la lumière** pleinement l'après-midi (**mais pas après 19h**)
- ✓ Éviter de trop boire **après le dîner**

SE RÉVEILLER VERS 5H30

- ✓ Prendre une **douche chaude**
- ✓ Prendre son **petit-déjeuner** (favoriser les **protéines**)
- ✓ Ne pas s'exposer le matin complètement à la lumière du jour (lunettes de soleil à l'extérieur)
- ✓ Possibilité de prendre 1 café
- ✓ Favoriser la séance « intense » en **fin de matinée**

*Possibilité de prendre 1 à 2 cafés par jours; **Privilégier le vol de jour** (départ de Paris le matin)
Faire une **sieste de 15minutes** (ou **temps de détente**) tous les jours*

USA **US** vers France **FR** – 9 heures : ex 8h aux USA = 17h en France

Retour le jour même (28/05) ou le lendemain (29/05)

OBJECTIF : SE DÉCALER SUR LES HORAIRES FRANÇAIS

SE COUCHER VERS 00H00

- ✓ Prendre **une douche froide** (ou finir par du froid sur la nuque)
- ✓ Ne pas s'exposer complètement à la lumière du jour l'après-midi (lunettes de soleil à l'extérieur)
- ✓ **Favoriser** la séance « intense » dans l'après-midi

SE RÉVEILLER VERS 8H00

- ✓ Prendre une **douche chaude**
- ✓ S'exposer à la **lumière du jour**
- ✓ **Éviter** les séances « intenses » le matin

***Privilégier le vol de nuit** (départ de Eugen le soir); Essayer de **dormir un maximum** dans l'avion;
Remettre **progressivement de l'intensité** ou du **spécifique** à partir de 3 jours après le retour;
Dans la mesure du possible **ne pas prendre trop de rdv au cabinet** lors des premiers jours après le retour*

France **FR** vers USA **US** + 9 heures : ex 15h en France = 6h aux USA

Départ le mercredi 26/07

OBJECTIF : SE CALER SUR LE RYTHME DES USA

SE COUCHER VERS 20h30

- ✓ Prendre une **douche froide** (ou finir par du froid sur la nuque)
- ✓ Prendre son dîner en privilégiant **les glucides**
- ✓ **S'exposer à la lumière** pleinement l'après-midi (**mais pas après 19h**)
- ✓ Éviter de trop boire **après le dîner**

SE RÉVEILLER VERS 5H30

- ✓ Prendre une **douche chaude**
- ✓ Prendre son **petit-déjeuner** (favoriser les **protéines**)
- ✓ Ne pas s'exposer le matin complètement à la lumière du jour (lunettes de soleil à l'extérieur)
- ✓ Possibilité de prendre 1 café
- ✓ Favoriser la séance « intense » en **fin de matinée**

*Possibilité de prendre 1 à 2 cafés par jours; **Privilégier le vol de jour** (départ de Paris le matin)
Faire une **sieste de 15minutes** (ou **temps de détente**) tous les jours*

USA **US** vers France **FR** – 9 heures : ex 8h aux USA = 17h en France

Retour le jour même (28/05) ou le lendemain (29/05)

OBJECTIF : SE DÉCALER SUR LES HORAIRES FRANÇAIS

SE COUCHER VERS 00H00

- ✓ Prendre **une douche froide** (ou finir par du froid sur la nuque)
- ✓ Ne pas s'exposer complètement à la lumière du jour l'après-midi (lunettes de soleil à l'extérieur)
- ✓ **Favoriser** la séance « intense » dans l'après-midi

SE RÉVEILLER VERS 8H00

- ✓ Prendre une **douche chaude**
- ✓ S'exposer à la **lumière du jour**
- ✓ **Éviter** les séances « intenses » le matin

***Privilégier le vol de nuit** (départ de Eugen le soir); Essayer de **dormir un maximum** dans l'avion;
Remettre **progressivement de l'intensité** ou du **spécifique** à partir de 3 jours après le retour;
Dans la mesure du possible **ne pas prendre trop de rdv au cabinet** lors des premiers jours après le retour*

Départ le mercredi 06/07

Le 06-07-08-09/07 : SE CALER SUR LE RYTHME DES USA

SE COUCHER VERS 20h30 +ou- 30min

- ✓ Prendre une **douche froide** (ou finir par du froid sur la nuque) avant de se coucher
- ✓ Se coucher entre 19h30 et 21h30
- ✓ Rester dans des lieux sombre/obscur à partir de 19h (ne plus sortir dehors)
- ✓ Éteindre son téléphone, température de la chambre entre 18 et 20°C avant de se coucher
- ✓ Prendre une **douche chaude** au réveil le matin
- ✓ Prendre son petit-déjeuner au plus tard à 9h
- ✓ S'exposer à la lumière du jour le matin

- ➔ **Sieste de 30 à 40 minutes maximum à 14h00 (1h30 max dans l'avion)**
- ➔ **Donner son portable au début de sieste ; la personne le redonne après la sieste**
 - ➔ **Mettre des lunettes de soleil l'après-midi**
 - ➔ **Mettre la bague avant de dormir et la synchroniser tous les matins**

Retour le jour même (28/05) ou le lendemain (29/05)

OBJECTIF : SE DÉCALER SUR LES HORAIRES FRANÇAIS

SE COUCHER VERS 00H00

- ✓ Prendre **une douche froide** (ou finir par du froid sur la nuque)
- ✓ Ne pas s'exposer complètement à la lumière du jour l'après-midi (lunettes de soleil à l'extérieur)
- ✓ **Favoriser** la séance « intense » dans l'après-midi

SE RÉVEILLER VERS 8H00

- ✓ Prendre une **douche chaude**
- ✓ S'exposer à la **lumière du jour**
- ✓ **Éviter** les séances « intenses » le matin

*Privilégier le vol de nuit (départ de Eugen le soir) ; Essayer de **dormir un maximum** dans l'avion ;
Remettre **progressivement de l'intensité** ou du **spécifique** à partir de 3 jours après le retour ;
Dans la mesure du possible **ne pas prendre trop de rdv au cabinet** lors des premiers jours après le retour*

ANNEXE n° 4



Sommeil réparateur =
meilleurs temps de
réaction et capacités de
prise de décision

Besoins en sommeil
des athlètes (8 à 9h)
supérieur à celui des
non-sportifs (6 à 8h)

Sommeil qualitatif et
quantitatif =
moins envie de gras
et de sucre (-559
kcal/jour)

Sommeil & performance *Le saviez-vous ?*



Aux J.O de Rio, 80%
des médaillés
français dormaient
entre 7h et 9h/nuite

Sommeil optimal =
améliore la croissance
musculaire, la production
de testostérone et la
restauration du glycogène

Délais
d'endormissement
rapide = moins de
chances d'être
malade

Au moins 8h de
sommeil par nuit =
2 fois moins de
risque de se blesser

Cependant, plus de la moitié des sportifs élités souffrent de problèmes liés au sommeil. Heureusement, celui-ci peut être amélioré et ainsi bénéficier à la performance !



Jamie Webb (800m)
Médaille européenne (GB)

« Obtenir au moins 8 heures de sommeil est une priorité. Je travaille beaucoup sur ma routine de sommeil. »

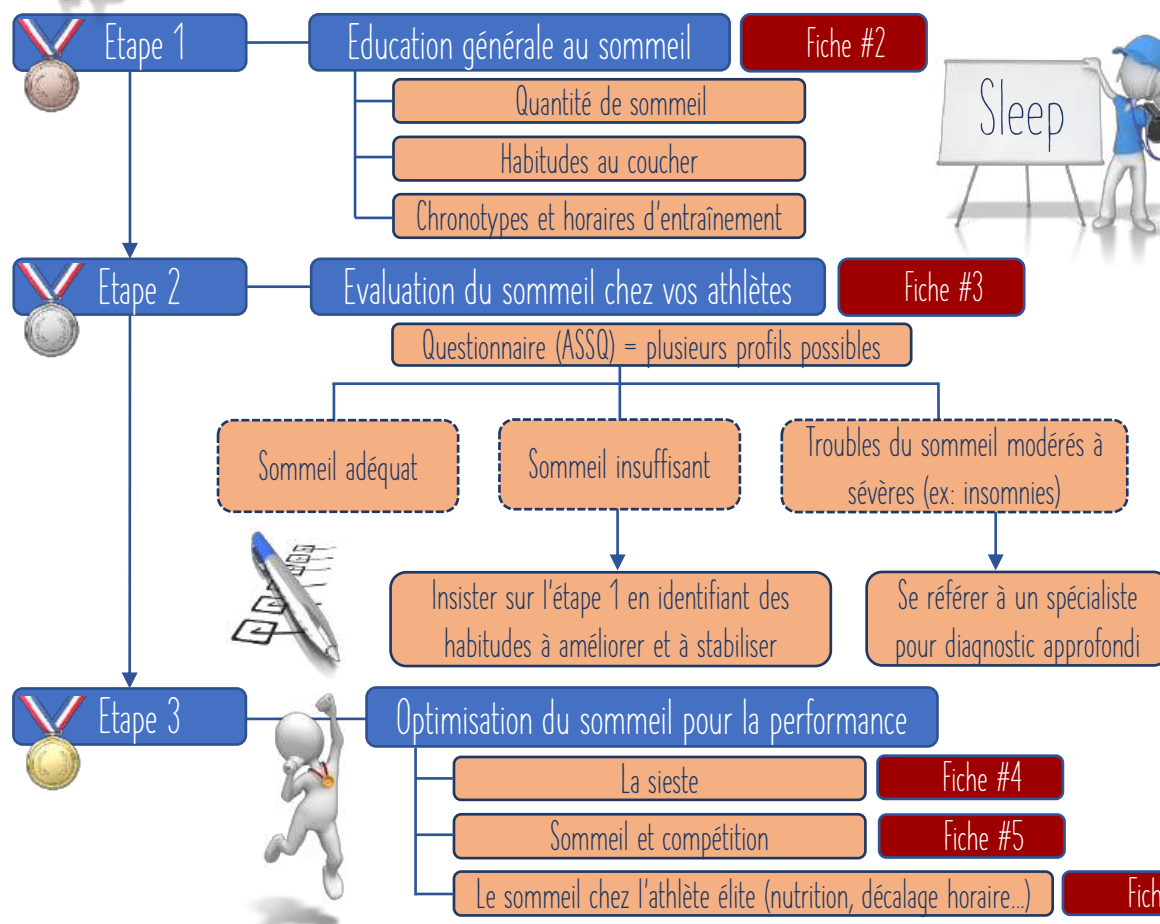


Emma Coburn (steeple)
Médaille olympique (USA)

« J'essaie de prendre beaucoup de repos, de faire des siestes régulières et d'avoir un bon sommeil. »

Entraîneurs d'athlétisme : 3 étapes et 6 fiches pratiques pour améliorer le sommeil de vos athlètes

Références

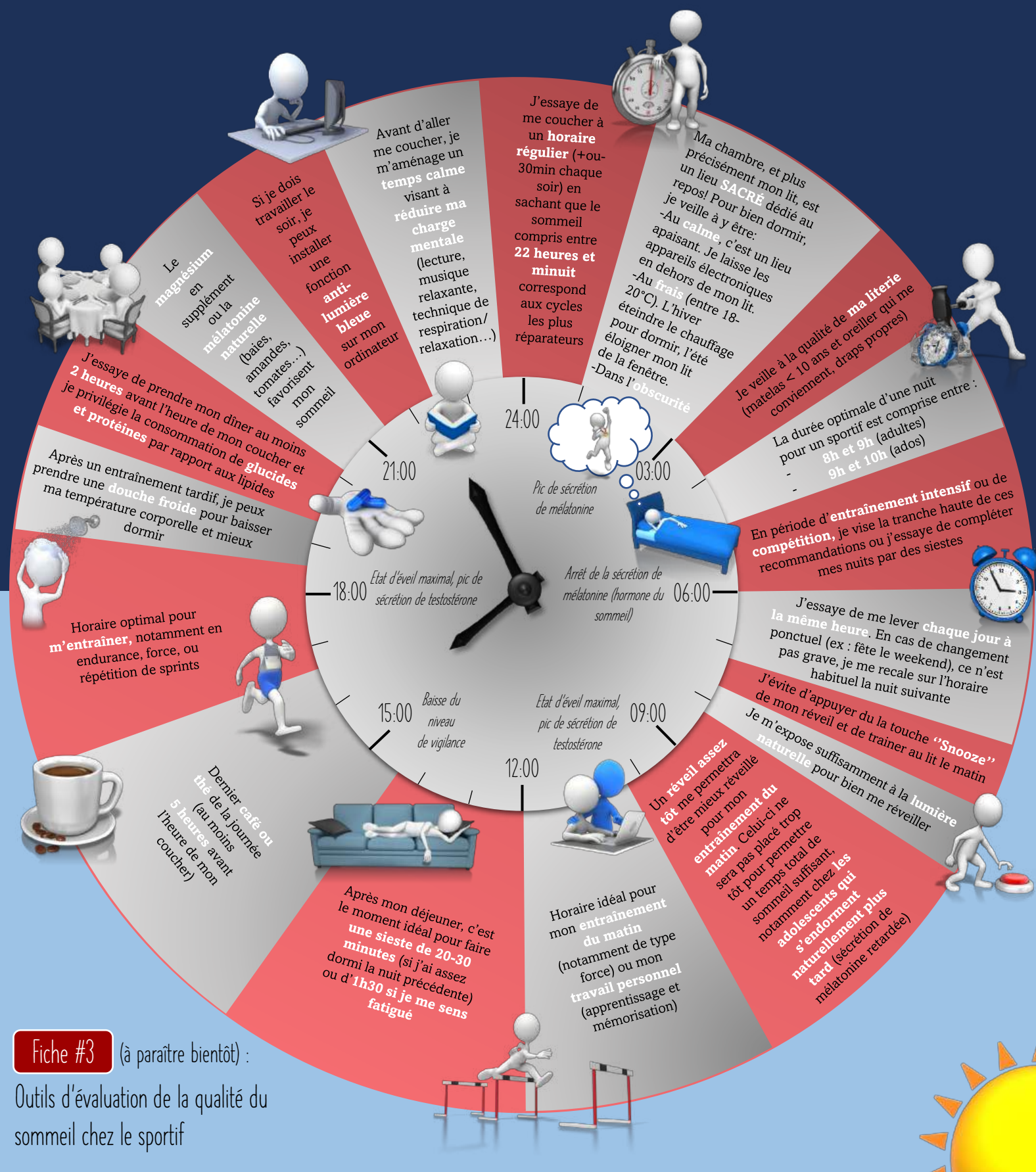


- Walsh et al. (Consensus statement, BJSM, 2020)
- Halsom (Sports sci, 2013).
- Bonnar et al. (Sports Med, 2018)



Fiches #2 à #6
à paraître
prochainement !

Voici quelques habitudes que je peux mettre en place afin d'améliorer mon sommeil, et donc la qualité de ma récupération et mes performances en athlétisme. Parallèlement, je peux chercher à mieux connaître mon chronotype (si je suis plutôt du matin, plutôt du soir, ou neutre) et essayer de dormir et de m'entraîner en le respectant au maximum.



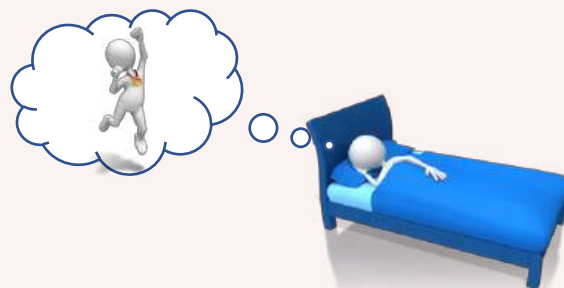
Fiche #3 (à paraître bientôt) :

Outils d'évaluation de la qualité du sommeil chez le sportif

Instructions. Les questions suivantes portent sur vos habitudes de sommeil. Veuillez entourer la proposition qui reflète le mieux vos habitudes de sommeil ces derniers temps. Pour toutes les questions, entourez une lettre entre 'a' et 'e' sauf indication contraire.

1. Ces derniers temps, combien d'heures effectives avez-vous dormi par nuit ? (ce chiffre peut être différent du nombre d'heures que vous avez passées au lit).

- a. 5 à 6 heures
- b. 6 à 7 heures
- c. 7 à 8 heures
- d. 8 à 9 heures
- e. Plus de 9 heures



2. A quel point êtes-vous satisfait/insatisfait de la qualité de votre sommeil ?

- a. Très satisfait
- b. Assez satisfait
- c. Ni satisfait ni insatisfait
- d. Assez insatisfait
- e. Très insatisfait



3. Ces derniers temps, combien de temps vous a-t-il généralement fallu pour vous endormir chaque soir ?

- a. 15 minutes ou moins
- b. 16-30 minutes
- c. 31-60 minutes
- d. Plus de 60 minutes



4. A quelle fréquence avez-vous du mal à rester endormi ?

- a. Jamais
- b. Une ou deux fois par semaine
- c. Trois ou quatre fois par semaine
- d. Cinq à sept fois par semaine

5. Ces derniers temps, à quelle fréquence avez-vous pris des médicaments pour vous aider à dormir (sur prescription médicale ou de votre plein grès) ?

- a. Jamais
- b. Une ou deux fois par semaine
- c. Trois ou quatre fois par semaine
- d. Cinq à sept fois par semaine



6. Combien faites-vous de siestes par semaine ?

- a. Aucune
- b. Une ou deux
- c. Trois ou quatre
- d. Cinq à sept



7. En moyenne, combien de produits caféinés (caféine en comprimés, café, thé, soda, boisson énergisante) consommez-vous par jour ? Pour le café et le thé, une dose de produit = 177-237ml ; pour les sodas caféinés, une dose de produit = une canette (33cl).

- a. Moins de un par jour
- b. 1-2 par jour
- c. 3 par jour
- d. 4 par jour
- e. 5 ou plus par jour



8. Ces derniers temps, à quelle fréquence avez-vous utilisé un appareil électronique (exemple : smartphone, ordinateur, tablette, TV., etc...) au cours de l'heure précédant votre coucher ?

- a. Jamais
- b. 1-3 fois par semaine
- c. 4-6 fois par semaine
- d. Tous les jours



Questions bonus

9. En tenant uniquement compte de votre propre rythme idéal, à quelle heure vous leveriez-vous si vous étiez entièrement libre d'organiser votre journée ?

- a. 5:00 – 6:30
- b. 6:30 – 7:45
- c. 7:45 – 9:45
- d. 9:45 – 11:00
- e. 11:00 – 12:00 (midi)



10. A quel point vous sentez-vous vigilant au cours de la demi-heure suivant votre réveil ?

- a. Pas du tout vigilant
- b. Légèrement vigilant
- c. Assez vigilant
- d. Très vigilant

11. Vous considérez-vous comme étant du matin ou du soir ?

- a. Assurément du matin
- b. Plus du matin que du soir
- c. Plus du soir que du matin
- d. Assurément du soir



12. En tenant uniquement compte de votre propre rythme idéal, à quelle heure iriez-vous vous coucher si vous étiez entièrement libre d'organiser votre soirée ?

- a. 20:00 – 21:00
- b. 21:00 – 22:15
- c. 22:15 – 00:30
- d. 00:30 – 1:45
- e. 1:45 – 3:00



13. Lorsque vous voyagez pour votre sport, éprouvez-vous des troubles du sommeil ?

- a. Oui
- b. Non

14. Lorsque vous voyagez pour votre sport, éprouvez-vous des troubles en journée (ne pas se sentir bien en général ou faire de mauvaises performances) ?

- a. Oui
- b. Non



15. Etes-vous en règle générale un gros ronfleur ?

- a. Oui
- b. Non

16. Vous-a-t-on dit que vous suffoquiez, haletiez, ou vous arrêtiez de respirer par moments pendant votre sommeil ?

- a. Oui
- b. Non



Retrouvez la version numérique
de cette fiche pour la partager



Calcul du score et recommandations pratiques

Score de troubles du sommeil. Additionnez les points des questions 1 à 5 pour obtenir le score de troubles du sommeil en vous reportant au tableau suivant (nombre de points attribué en fonction de la réponse) :

Réponses	a	b	c	d	e
Question 1	4	3	2	1	0
Question 2	0	1	2	3	4
Question 3	0	1	2	3	
Question 4	0	1	2	3	
Question 5	0	1	2	3	

Le score correspond aux catégories de troubles cliniques du sommeil suivantes :

0-4 : aucun trouble → se référer aux conseils de la fiche sommeil #2 (horloge) et des fiches à paraître #4 (sieste), #5 (sommeil et compétition) et #6 (le sommeil chez l'athlète élite : nutrition, décalage horaire...) pour optimiser le sommeil à des fins de performance.

5-7 : troubles légers → insister sur les conseils de la fiche sommeil #2 en identifiant des habitudes de sommeil à améliorer et à stabiliser.

8-10 : troubles modérés

11-17 : troubles sévères

} influence négative probable sur la performance voir sur la santé de l'athlète. Se référer à un spécialiste pour un diagnostic approfondi.

Questions 6, 7 et 8 → Orientez les stratégies d'optimisation du sommeil vers l'utilisation plus fréquente de siestes, la réduction de la consommation de caféine, et la réduction de l'utilisation d'appareils électroniques avant le coucher (attention sur ce point à ne pas stigmatiser les athlètes).

Troubles respiratoires du sommeil → si l'athlète répond oui à la question 15 (ronflement lourd) ou 16 (apnée du sommeil) → se référer à un spécialiste pour un diagnostic approfondi.

Troubles du sommeil et de la performance en voyage → Si l'athlète répond oui à la question 13 (troubles du sommeil), une éducation à la gestion des voyages et du décalage horaire peut être nécessaire → voir recommandations spécifiques (fiche #6 à paraître). Si l'athlète répond oui à la question 14 (troubles de la performance) → le problème est plus sérieux et pourrait nécessiter un accompagnement particulier → Se référer à un spécialiste pour un diagnostic approfondi.

Chronotype (du soir) → les athlètes étant des personnes « du soir » ont plus de risques d'être sujets à des troubles du sommeil. Additionnez le score des questions 9 à 12 pour obtenir le score de chronotype du soir à l'aide de ce tableau :

Réponses	a	b	c	d	e
Question 9	4	3	2	1	0
Question 10	0	1	2	3	
Question 11	3	2	1	0	
Question 12	4	3	2	1	0

Un score inférieur ou égal à 4 indique un chronotype du soir → Se référer à un spécialiste pour un diagnostic approfondi.

ANNEXE n° 5

Jimmy				
Intentions / Sensations	Zones de travail	Fcmax au cours de la séance(bpm)	Lactatémie (mmol)	Allure de course (min/kilo)
<i>1 : aisance respiratoire (tu peux parler tout au long de l'effort)</i>	<i>Endurance Fondamentale : 60/65%</i>	< 135	entre 0,5- 2,5	4'20 vers 3'45/km
<i>2 : équilibre équilibre (tu peux échanger quelques phrases)</i>	<i>Endurance active 70/75%</i>	135-145	entre 2 - 5	3'45 vers 3'15/km
<i>3 : confort respiratoire d'un semi marathon</i>	<i>Tempo facile et Seuil- 80/85%</i>	150-160	entre 3 - 7	3'10 vers 2'55/km
4 : sensation d'un 10km	Seuil+ et Fartlek (90/95%)	160-168	entre 7 - 10	2'48 vers 2'42/km
<i>5 : sensations d'un 5000m</i>	<i>VMA longue (95/100%)</i>	<i>165-175</i>	entre 9 et 12	<i>2'38 vers 2'34/km</i>
<i>6 : sensations d'un 3000m</i>	<i>VMA courte (100/105%)</i>	> 170	entre 10 et 13	2'32 vers 2'28/km

ANNEXE n° 6

INDICATIONS GÉNÉRALES POUR UN RÉGIME ALCALINISANT

À LIMITER

- ⇒ **Sources de protéines :**
 - Viande rouge (*porc, vache*)
 - Crustacés
 - Poissons gras (*saumon, truite*)
- Fromages
(*bleu, feta, fromage blanc riche en protéines*)
- ⇒ **Sources de glucides :**
 - Grains entiers
 - Riz brun, épeautre et avoine
- ⇒ **Sources de matières grasses**
 - Fruits secs (*en particulier cacahuètes et noix du Brésil*)
 - Tahini (*crème de sésame*)

ACCEPTÉE

- ⇒ **Sources de protéines :**
 - *Tempeh, poids chiches, haricots, œufs, fromage blanc sans matières grasses*
- ⇒ **Sources de glucides :**
 - Pâtes et riz non complets
- ⇒ **Sources de matières grasses**
 - Amandes, pistaches, yaourt entier

À PRIVILÉGIER

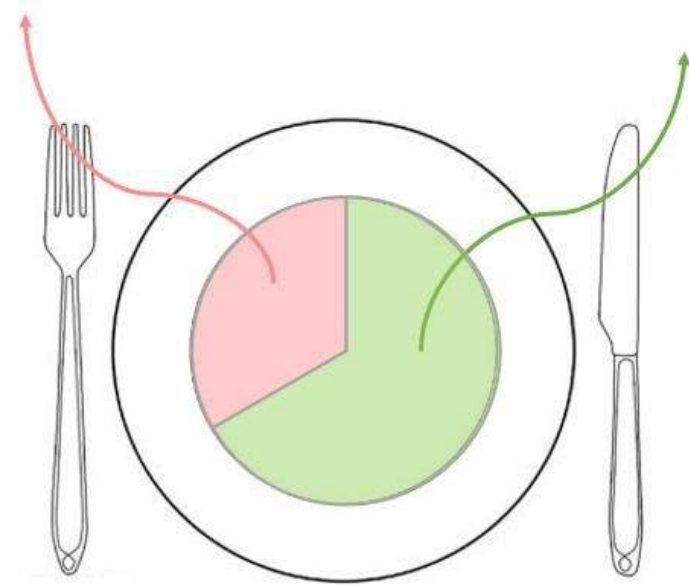
- ⇒ **Sources de protéines :**
 - Tofu (*et d'autres dérivés du soja*)
- ⇒ **Sources de glucides :**
 - Pommes de terre
- ⇒ **Sources de matières grasses**
 - Avocat, huile de coco
 - Tous les types de fruits
(*pomme, poire, raisin, banane, kiwi, abricot...*)
 - Légumes (*betteraves, brocoli, choux, carotte, concombre, aubergine, haricots verts, roquette, épinards...*) de préférence de saison.

INDICATIONS GÉNÉRALES POUR UN RÉGIME ALCALINISANT



*Les aliments acidifiants (à limiter) doivent représenter un faible pourcentage du repas (environ **1/3**), tandis que les aliments recommandés doivent représenter AU MOINS les **2/3** restants du repas.*

PÉRIODE DE COMPÉTITION



- Inclure au moins **une portion de légume et une portion de fruit** à chaque repas.
- Préférer les **pommes de terre** comme source de glucide **avant la compétition**; une alternative pourrait être des *gnocchis de pommes de terre* ou des *pâtes non complètes*.
- Privilégier la **viande blanche** ou le **poisson maigre** comme *source de protéines d'origine animale*; il est également recommandé de consommer des produits laitiers tels que le **fromage blanc** et le **fromage cottage**.
- Si possible et toléré, privilégier les **protéines d'origine végétale** : *soja et dérivés* (ex : tofu)
- Pour les en-cas, préférez les **fruits frais**, accompagnés de **quelques fruits secs** ou de produits laitiers allégés comme le **fromage blanc**.

EXEMPLES DE MENUES PRÉ-COMPÉTITIF

PETIT DÉJEUNER	DÉJEUNER	DINER
Fromage Blanc avec Céréales pour petit déjeuner sans sucre ajouté (exemple: corn flakes, riz soufflé...) Chocolat noir (75% minimum) Un fruit	Pommes de terre bouillies avec filet de poulet, assaisonné avec huile d'olive à ajouter après (peuvent également être cuisinées avec des légumes si tolérées) Salade verte avec tomates, concombres et graines diverses Assaisonner avec de l'huile et du vinaigre Un petit fruit	Ratatouille de légumes avec pommes de terre Steak de soja Salade verte à assaisonner avec de l'huile et du vinaigre Un petit fruit xs
Chia Pudding (avec lait coco), Fruit et chocolat noir (75% minimum)	Salade de pâtes à la mozzarella et à la tomate Salade verte mixte et graines diverses, avec de l'huile et du vinaigre Un petit fruit	Filet de poisson blanc avec pommes de terre, tomates et olives Salade de crudités à l'huile et au vinaigre
Yaourt allégé avec muesli ou céréales pour petit déjeuner sans sucre ajouté Jus d'orange (ou autres fruits), chocolat noir (75% minimum)	Gnocchi de pommes de terre à la sauce tomate Salade verte avec concombres, carottes et thon au naturel Un fruit	Salade d'œufs durs, tomates et vinaigrette Accompagnement de pommes de terre, de petits pois et de haricots verts

BOISSON RICHE EN BICARBONATES (HCO_3^-)



EN PÉRIODE D'ENTRAÎNEMENT POUR LA RÉCUPÉRATION :

Conseillé de boire **500mL à 1L par jour** + eau normale (= 1,5L minimum)

À prendre durant une journée **avant, pendant et après** la session

EN PÉRIODE DE COMPÉTITION POUR OPTIMISER LA PERFORMANCE :

Boire **1L à 1,5L maximum/3 jours avant la course** + eau normale (= 1,5L minimum)

→ *Idéalement 0,5 à 1L après la récup*



SI LA COURSE EST LE MATIN OU LE MIDI BOIRE UNIQUEMENT 0,5L

Réduire la part de sel dans l'apport quotidien (éviter de saler en plus son assiette lors du repas)

ÉQUILIBRE ACIDO-BASIQUE : BICARBONATE

BICARB SYSTEM

PÉRIODE DE COMPÉTITION



À PRENDRE : **1 dose** (un bol) **1h15 à 1h30 MAXIMUM** avant le **DÉPART DE LA COURSE**

Comment faire :

- 1) Mettre le sachet avec la poudre (hydrogel = sachet B) dans le bol**
- 2) Verser maximum 200mL d'eau dans le bol puis secouer pour avoir un mélange homogène**
- 3) Verser les granules de bicarbonates (billes blanches = sachet C) dans le bol contenant le mélange**
- 4) Manger le tout sans croquer les granules (ne pas hésiter à boire un peu pour aider à avaler)**

➔ NE PAS PRENDRE AVEC DE LA CAFÉINE !

ÉQUILIBRE ACIDO-BASIQUE : BETA-ALANINE



DURANT 12 SEMAINES :

PAR JOUR :

65mg/kg/poids de corps de Beta-Alanine **par jour** réparti en **2 doses**

Exemple pour un athlète pesant **62kg** = **4g** par jour :

- **LE MATIN 2g** dans **150 mL** d'eau
- **LE SOIR 2g** dans **150 mL** d'eau

<https://www.healthspanelite.co.uk/shop/elite-all-blacks-beta-alanine/250-g/#product-information>

ANNEXE n° 7

**RECHERCHE
ATHLÉ**

ACOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE À LA PERFORMANCE (ASP) :
UN OUTIL D'AIDE À LA PRISE DE DÉCISION



francois.chiron@athle.fr
0787279273

1

**RECHERCHE
ATHLÉ**

PÔLE FRANCE INSEP

- 10 ATHLÈTES DE HAUT-NIVEAU
- DU 800-1500M AU 10 000M EN PASSANT PAR LE STEEPLE ET LE 5000M
- ENTRAÎNEUR RÉFÉRENT ADRIEN TAOUJI




2

**RECHERCHE
ATHLÉ**

CADRE DE TRAVAIL

- Doctorant pour la FFA
- Entraîneur adjoint d'Adrien Taouji à l'INSEP
- Accompagnateur Scientifique à la Performance
 - Entraîneur de ½ fond





3

**RECHERCHE
ATHLÉ**

AU MENU

- I. Qu'est-ce que l'ASP
- II. Le suivi de la Fréquence Cardiaque
- III. Le suivi de la Variabilité de la Fréquence Cardiaque
- IV. L'entraînement croisé
- V. Quelques suivis complémentaires
- VI. Le suivi de la Lactatémie




4

RECHERCHE ATHLÈZ Entraîneur/Chercheur

Les préoccupations de l'entraîneur :

- Performance
- Accompagner les athlète(s)

« Contraintes » :

- ✓ TEMPS = managé l'imprévu, s'adapter
- ✓ Gérer l'humain (athlètes, staff...)
- ✓ Un contexte de travail complexe (multifactoriel)



Les préoccupations du chercheur:

Travail de recherche (publication)

- Cours and administratif

« Contraintes » (rigueur) :

- ✓ Pertinence
- ✓ Validité
- ✓ Fidélité/Reproductibilité
- ✓ Accessibilité

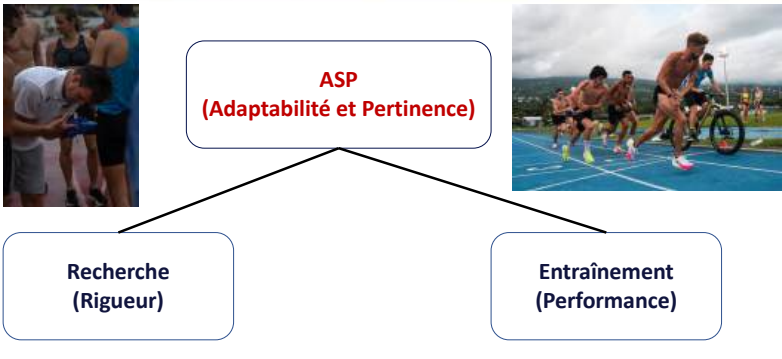


5

RECHERCHE ATHLÈZ ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE À LA PERFORMANCE : C'EST QUOI?



ASP
(Adaptabilité et Pertinence)

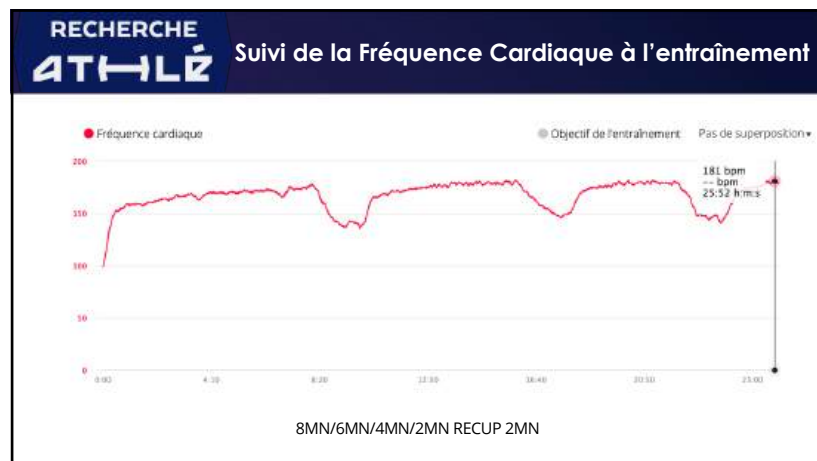




Recherche
(Rigueur)

Entraînement
(Performance)

6



7

RECHERCHE ATHLÈZ Zone de la FC à l'entraînement

Zone de travail (% de VMA)	Allure de course (km/h et min/kilo)	Fréquence Cardiaque (bpm)
Endurance Fondamentale ("endurance facile") : 60/65%	5'00 vers 4'37/km	120-155
Endurance active 70/75%	4'17 vers 4'00/km	160-170
Seuil (Tempo facile) 80/85%	3'45 vers 3'31/km	175-180
Seuil+ (Tempo actif) 85/90%	3'31 vers 3'20/km	180-188
Fartlek (90/95%)	3'20 vers 3'09"/5/km	188-195
VMA longue (95/100%)	3'05" vers 3'00/km	190-200
VMA courte (100/105%)	3'00 vers 2'51/km	195-205

8

RECHERCHE ATHLÈZ **Système Nerveux Autonome : fonction majeures**

Le SNA régule les grandes fonction de l'organisme : il est involontaire!
Il est divisé en deux parties : le système nerveux parasympathique et le sympathique

Parasympathetic system

- Constricts pupils
- Stimulates flow of saliva
- Constricts bronchi
- Slows heartbeat
- Stimulates peristalsis and secretion
- Stimulates bile release

Sympathetic system

- Dilates pupils
- Inhibits salivation
- Relaxes bronchi
- Accelerates heartbeat
- Inhibits peristalsis and secretion
- Stimulates glucose production and release
- Secretion of adrenaline and noradrenaline

- Singh, N. - A&E Review (2018)

9

RECHERCHE ATHLÈZ **La Variabilité de la Fréquence Cardiaque**

60 battements par minute $\neq$ 1 battement toutes les secondes

R-R interval (ms)

10

RECHERCHE ATHLÈZ **VFC : le guide**

VFC = + +

Marqueurs indirect du SNA

Règles

Intérêt

But

Analyse du temps entre chaque battement

Suivi de l'athlète

11

RECHERCHE ATHLÈZ **Questionnaires subjectifs**

0 aucun effort
1 très très facile
2 très facile
3 facile
4 effort modéré
5 moyen
6 un peu dur
7 dur
8 très dur
9 très très dur
10 Maximal

Stress

1 Très, très faible
2 Très faible
3 Faible
4 Moyenne
5 Elevée
6 Très élevée
7 Très, très élevée

Fatigue

1 Très, très faible
2 Très faible
3 Faible
4 Moyenne
5 Elevée
6 Très élevée
7 Très, très élevée

Douleurs musculaires

1 Très, très faibles
2 Très faibles
3 Faibles
4 Moyennes
5 Élevées
6 Très élevées
7 Très, très élevées

Questionnaire de sommeil de Spiegel

Multidimensionnel

Pour répondre, indiquez le chiffre le plus approprié pour chaque énoncé

1/ **Stade d'endormissement** : Combien de temps vous a-t-il fallu pour vous endormir ?

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

2/ **Qualité du sommeil** : Avec vous êtes-vous dormi ?

0 Oui, de façon parfaite (du sommeil parfait, sans réveil nocturne)
1 Oui, mais
2 Partiellement
3 Non, pas du tout
4 Non, pas du tout

3/ **Nombre de réveils** : Combien de temps vous êtes-vous réveillé ?

0 Très longtemps (se réveille plus de 10 fois)
1 Longtemps
2 Moyennement longtemps
3 Peu de temps
4 Très peu de temps (se réveille moins de 10 fois)
5 Ne sait pas

4/ **Réveils nocturnes** : Vous êtes-vous réveillé au cours de la nuit ?

0 Jamais (j'ai dormi d'une seule traite)
1 Rarement
2 Relativement souvent
3 Souvent
4 Très souvent (réveils réitérés)
5 Ne sait pas

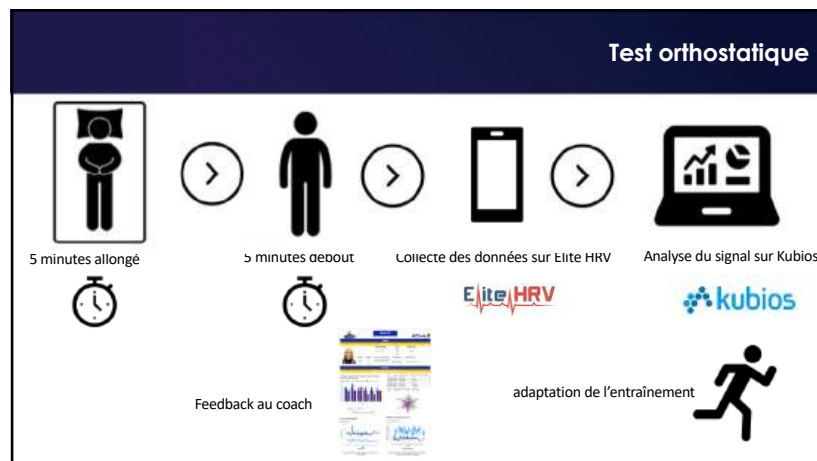
5/ **Réveil** : Avez-vous fait des réveils ?

0 Aucun
1 Quelques uns seulement
2 Modérément
3 Beaucoup
4 Souvent
5 Ne sait pas

6/ **État le matin** : Comment vous sentez-vous actuellement ?

0 En excellente forme
1 En bonne forme
2 Moyennement en forme
3 En mauvaise forme
4 En très mauvaise forme (sorgé, épuisé)
5 Ne sait pas

12



13

RECHERCHE ATHLÈ

Entraînement croisé : Intérêt de varier

Aspect préventif (diminution des blessures, charge d'entraînement non traumatisante)

Aspect performance (développement aérobie, développement musculaire)

Aspect motivationnel (variation des contenus d'entraînement hebdomadaires et mensuels, éviter la monotonie/routine de l'entraînement)

Justifications scientifique

14

RECHERCHE ATHLÈ

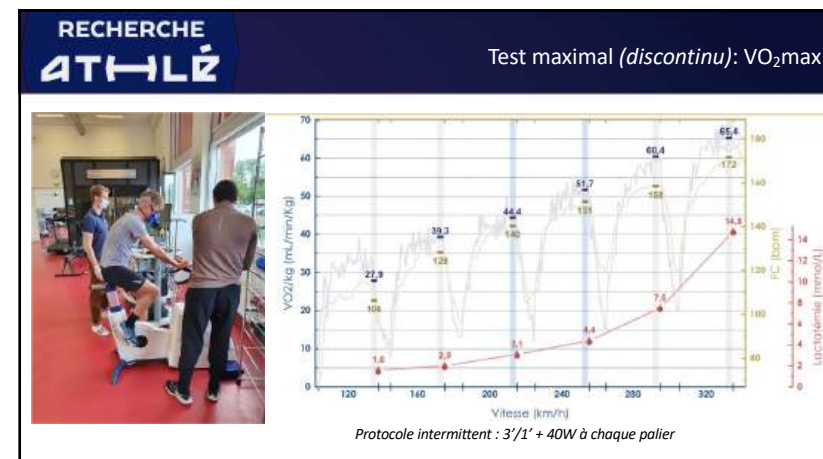
Pourquoi l'entraînement croisé

Maintenir le travail technique et les éducatifs de course

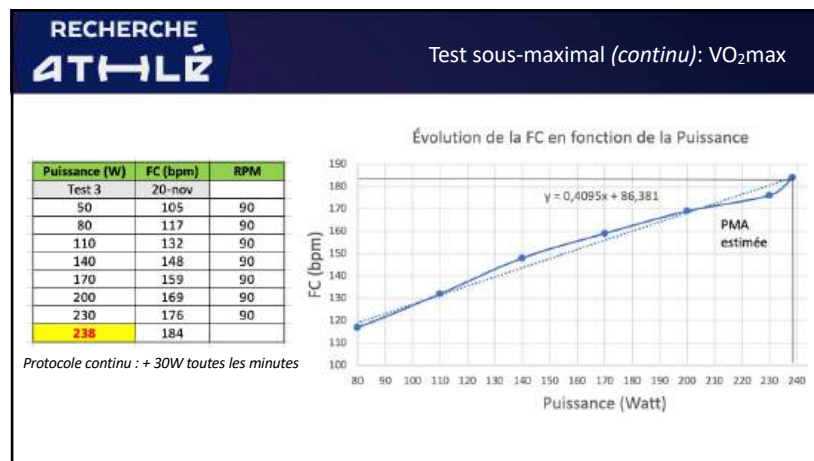
Maintenir la souplesse (yoga, stretching, souplesse active)

➔ MUSCULATION, TECHNIQUE, VÉLO, ELLIPTIQUE, ÉTIREMENTS, YOGA)

15



16



17

RECHERCHE ATHLÈ

Différentes zones de travail

% de PMA	Watt	FC
10%	24	97
20%	48	106
30%	72	116
40%	95	126
50%	119	135
60%	143	145
70%	167	154
80%	191	164
90%	215	173
100%	238	183

FC max sous-estimée en vélo par rapport à la Course à Pied :
FC en CAP > FC à vélo

18

RECHERCHE ATHLÈ

Exemples de séance sur vélo

Endurance fondamentale en fractionné		VTT
55' à 40%	15' à 40% + 15' à 50% + 10' à 55% + 5' à 60% + 10' à 50%	2700
60' à 45%	15' à 45% + 10' à 55% + 10' à 60% + 10' à 50% + 15' à 40%	2925
65' à 50%	10' à 50% + 15' à 55% + 10' à 45% + 15' à 60% + 10' à 40%	3075
65' à 50%	65' libre mais Pmoyen=50%	3250
65' à 55%	10' à 45% + 15' à 55% + 5' à 40% + 20' à 60% + 10' à 50% + 5' à 40%	3425
70' à 50%	10' à 50% + 5' à 45% + 15' à 55% + 5' à 50% + 20' à 60% + 5' à 45% + 10' à 50%	3725
70' à 55%	70' libre mais Pmoyen=55%	3850
Endurance fondamentale en continu		
60' à 40%	60' libre mais Pmoyen=40%	2400
65' à 40%	60' libre mais Pmoyen=40% avec 2x 10' à 50%	2500
65' à 45%	65' libre mais Pmoyen=45%	2925
70' à 50%	70' libre mais Pmoyen=50% avec 2x 15' à 55%	3050
75' à 50%	75' libre mais Pmoyen=50%	3750
Autres types de séances		
25' échauffement + 2x 15x 30"/25" R: 2'30 + 15' de récup		
20' échauffement + 4x 40"/20" + 5x 5" R: 1'30 + 5x 20"/20" + 10' récup		
25' échauffement + 3' à 95% unshédn avec 34x 40"/20" + 15' durécup		
20' échauffement + 4x 30"/30" + 4' 15"/16"/15"/14" r: 2' + 4x 15"/15" + 10' récup		

19

RECHERCHE ATHLÈ

Quelques recommandations nutritionnelles

RECOMMANDATIONS NUTRITIONNELLES

Possibilité de consommer 1 à 2 boissons de 500ml par jour + eau minérale (> L35 minimum)

OPTIMISER LA SÉSSION + LA RÉCUPÉRATION

À prendre durant une journée avant, pendant et après la session

Réduire le part de sel lors l'apport quotidien (éviter de saler en plus son assiette lors du repas)

Les petits + (FACULTATIFS)
À discuter avec le coach avant

OPTIMISER LA SÉSSION + LA RÉCUPÉRATION

À prendre durant une session de compétition "séquence"

Recommandation : 1 litre + 30g de poudre dans 1 litre de 350ml (ou le moitié de 500ml)

Une portion = 30g de poudre (3 blancs d'œufs)

Réduire au part de protéine lors du repas qui suit

OPTIMISER LA RÉCUPÉRATION

À prendre durant en journée après la session

20

[illegible]

21

RECHERCHE ATHLÈZ

Protocole de Récupération



Récupération : bain froid

Protocole de rééducation

Préparation bain 1

- Immersion après le séance
- Au moins 12 à 15 minutes d'immersion (sauger moules les 2 minutes pour limiter des frissons + chaleur de l'eau)
- Eau une eau entre 10°C à 15°C
- Hauteur d'immersion : immersion des membres inférieurs
- Plonger au moins 30 minutes avant de prendre sa douche

À éviter :

- Immersion des membres supérieurs (surtout bras) et des articulations de coude
- Immersion des articulations et de la région inflammatoire
- Vascularisation latérale et musculaire "à TC"



Récupération : bains contrastés

Protocole de rééducation

Préparation bain 1

- Immersion après le séance
- Au moins 12 minutes d'immersion (les dernières 2 min faire sans 7 minutes sans chaise... **FAIRE PAS LE BAIN FROID**)
- Eau une eau entre 0°C à 10°C (sans frotter) et 30°C à 40°C (sans écouler)
- Hauteur d'immersion : immersion des membres inférieurs
- Immersion au moins 30 minutes avant de prendre sa douche

À éviter :

- Châlier par portage (châlier de portage)
- Facile à l'eau immergée
- Assister l'appareil de validation (énergétique) (à la suite de la fin de la rééducation)
- Laisser la distribution de performance (les compétences) (au moins deux semaines d'entraînement)

À éviter :

Ne pas l'immersion par le bain chaud

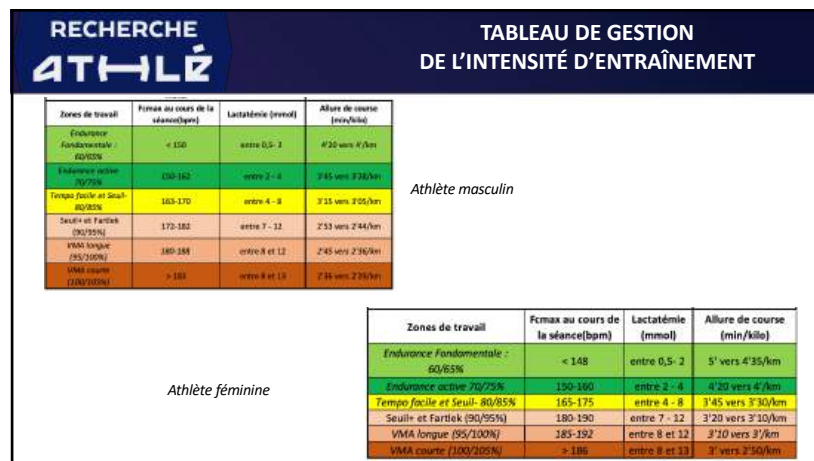
22

RECHERCHE ATHLÈ		Suivi de l'hydratation
À l'aide de l'USG (réfractomètre)		
Eau		1.0
Bien hydraté		< 1,010
Légèrement déshydraté		1.010 - 1,020
Significativement déshydraté		1.021-1.025
Très déshydraté		1.026 -1.030
Sérieusement déshydraté		>1.030

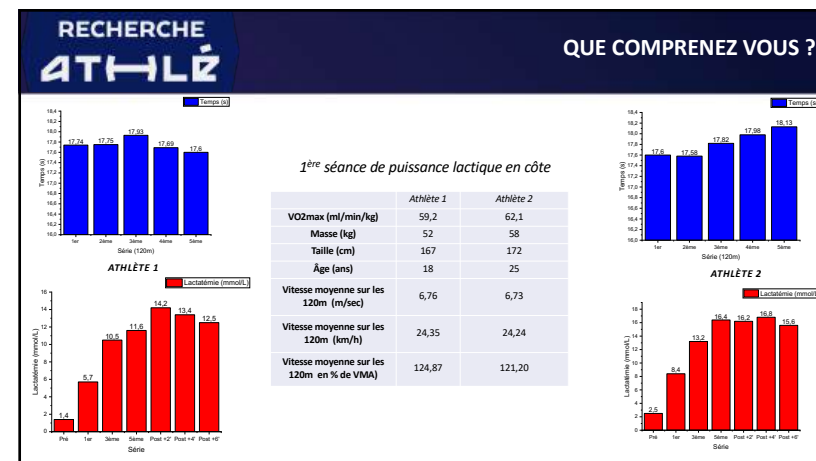
23

[illegible]

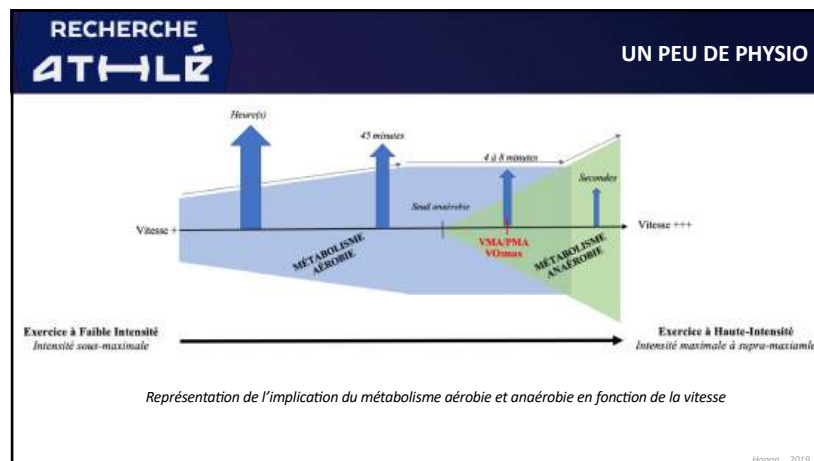
24



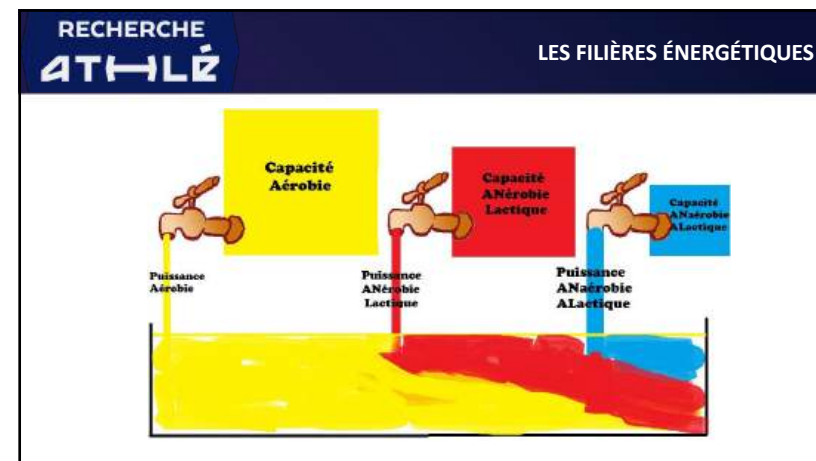
25



26



27



28

RECHERCHE ATHLÈ **LE LACTATE : PRÉSENT SUR LE LIEU DU CRIME ET COUPABLE ?**

CRIME = ARRÊT DE L'EXERCICE

GLYCOLYSE (ANAÉROBIE OU AÉROBIE) → PYRUVATE

Dégradation du glucose ou du glycogène en pyruvate

FORMULE DE GLUCOSE : $C_6H_{12}O_6$ FORMULE DU PYRUVATE : $C_3H_4O_3^-$ $NAD^+ : NADH + H^+$

Comment du glucose j'obtiens du pyruvate

$C_6H_{12}O_6 + 2 NAD^+ + 2 ADP + 2 P_i \rightarrow 2 C_3H_4O_3^- + 2 NADH + 4 H^+ + 2 ATP$

Que devient le pyruvate ?

→ Rentre dans la mitochondrie pour ensuite fournir Devenir de l'Acétylco-A (Cycle de Krebs)

→ Production de lactate

29

RECHERCHE ATHLÈ **Le lactate : Coupable ou Témoin?**

Pyruvate : $C_3H_4O_3^-$ Lactate : $C_3H_5O_3^-$

À partir de LDH (enzyme lactate déshydrogénase)

$C_3H_4O_3^- + H^+ + NADH \rightarrow C_3H_5O_3^- + NAD^+$ **D'où vient l'acidose :** $H^+ + HCO_3^- \rightarrow H_2O + CO_2$

Recyclage du lactate par les MCT (Monocarboxylate)

MCT

Lactates H^+

En résumé ce n'est pas par ce que la Police est systématiquement présents sur le lieu du crime qu'elle en est responsable

Thomas et Hanson

30

RECHERCHE ATHLÈ **QUE DOIS-JE COMPRENDRE : LA LACTATÉMIE DANS L'ENTRAÎNEMENT POUR QUOI ?**

Quel est mon objectif ?

Quels mécanismes (**causes**) induisant quels effets (**conséquences**) je veux mettre en jeu pour obtenir quelles adaptations ?

Est-ce que je comprends bien les mécanismes sous-jacents ?

Qu'est-ce que et comment j'aménage l'environnement ?

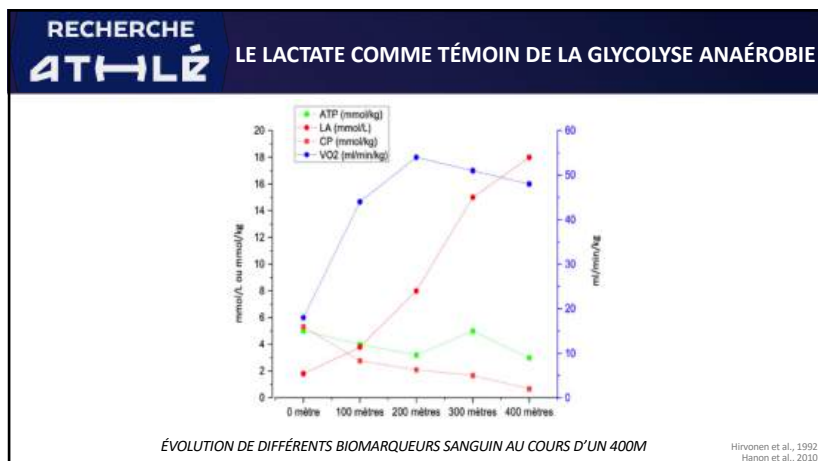
Hanson

31

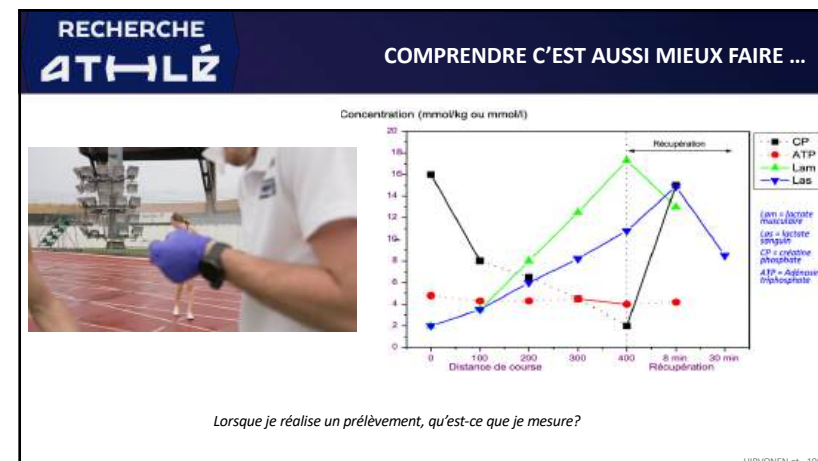
CE QU'IL FAUT RETENIR :

- Le lactate comme témoin de l'implication de la filière glycolyse anaérobie
- Produire du lactate est déterminant pour le coureur de ½ fond
- L'acide lactique n'existe pas, c'est les ions H^+ qui sont responsables de l'acidose métabolique

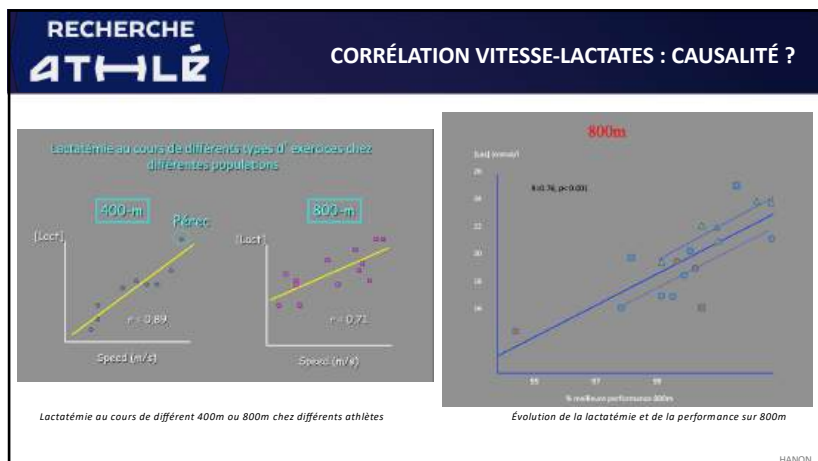
32



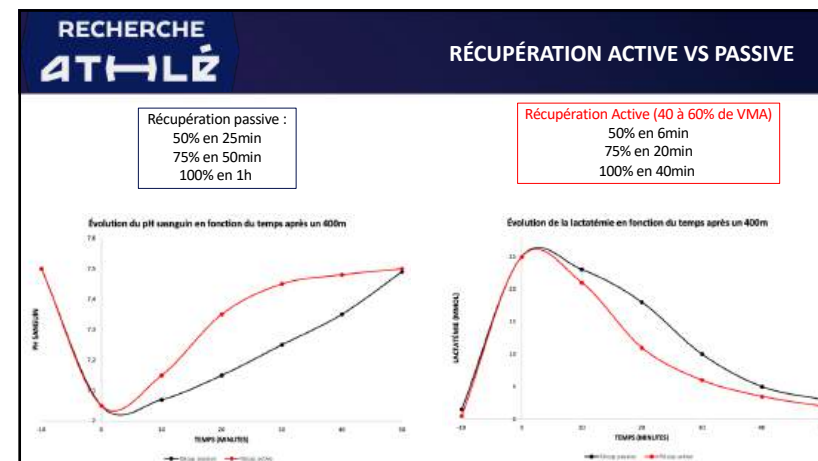
33



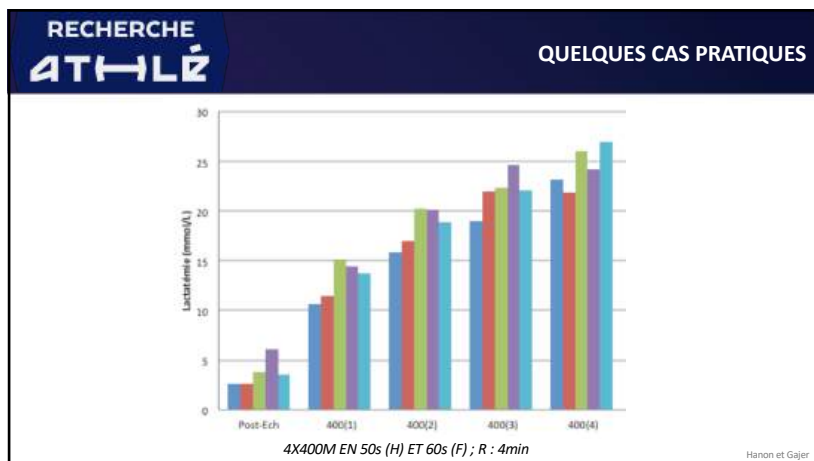
34



35



36



37

CE QU'IL FAUT RETENIR :

- Plus je vais vite, plus je produis de lactates
- La lactatémie dépend d'un grand nombre de facteurs
- Comprendre ce que je mesure c'est comprendre les effets de mon entraînement

38

RECHERCHE ATHLÈ **À VOUS DE JOUER**

AVANT DE SE LANCER, QUELLES QUESTIONS DOIS-JE ME POSER ?

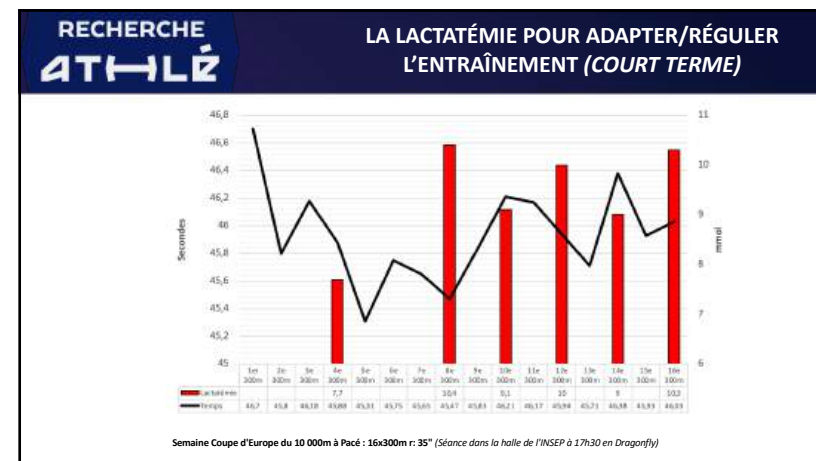
Quelle est la séance ?
→ Objectif, intensité, volume, récup...

Quelles spécificités ont les athlètes ?
→ Sexe, niveau, morphologie, âge...

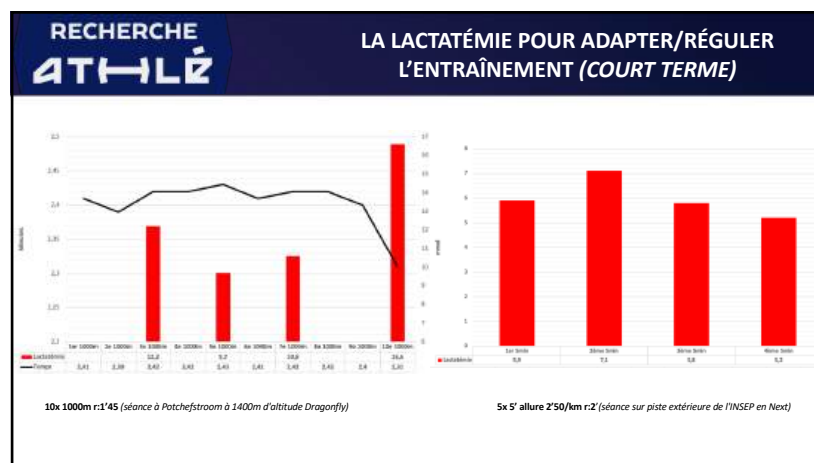
Quel est mon environnement ?
→ Indoor, outdoor, vent, équipement...

Quels autres paramètres pouvant influencer ma mesure et nuancer mes observations ?
→ Heure du dernier repas, équipement (chaussure, piste), vélo, période de la saison...

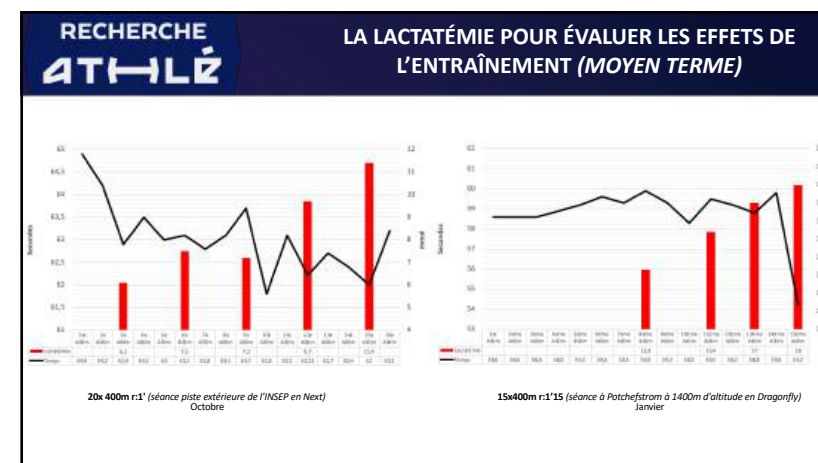
39



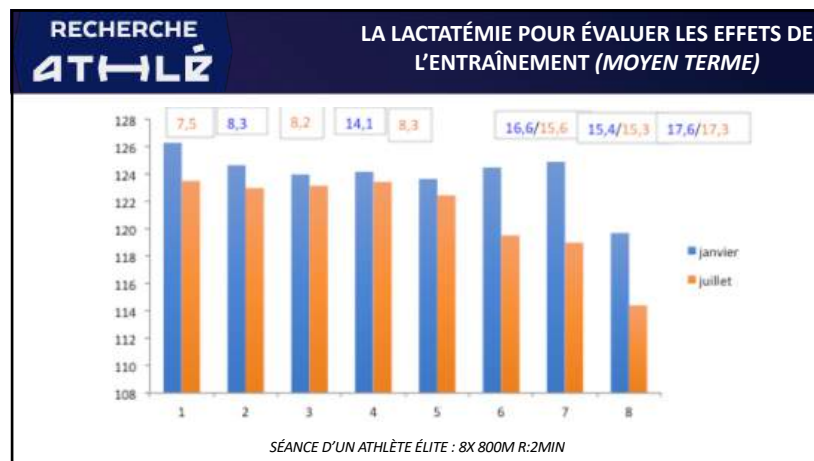
40



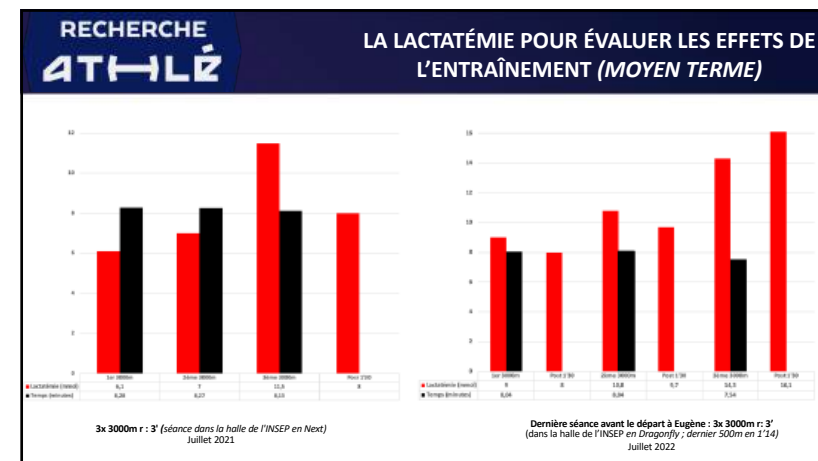
41



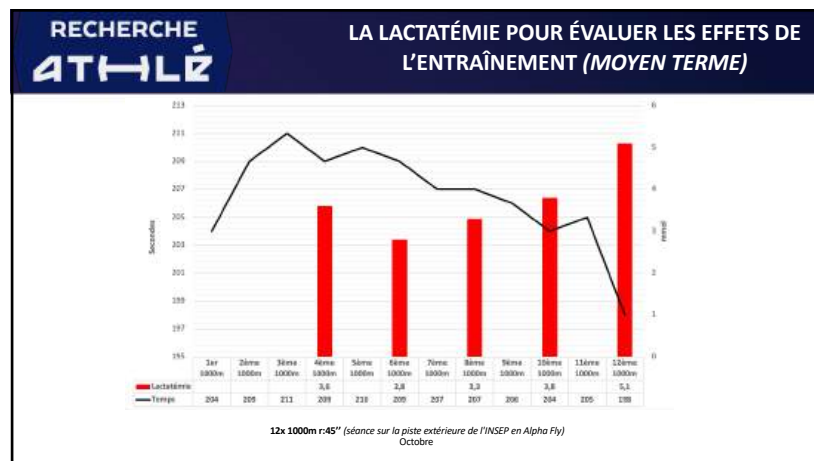
42



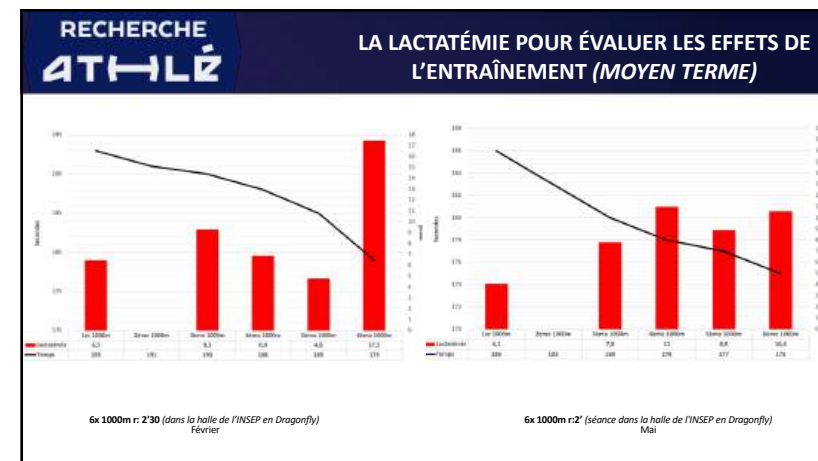
43



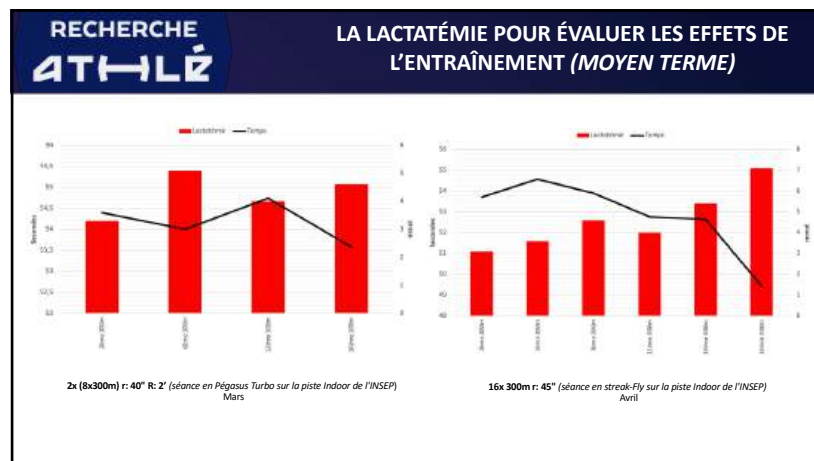
44



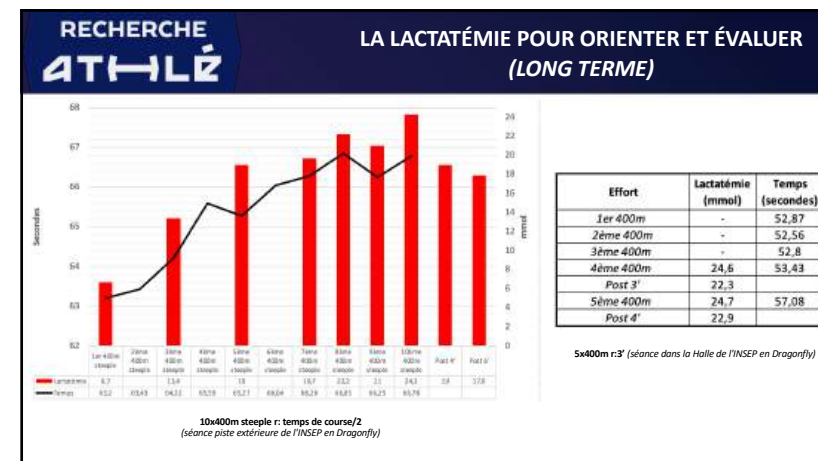
45



46



47



48

RECHERCHE ATHLÉT							LA LACTATÉMIE POUR ORIENTER ET ÉVALUER (LONG TERME)						
n°	Course	Série/Finale	Prélèvement	Lactatémie	Chrono	Place	n°	Course	Série/Finale	Prélèvement	Lactatémie	Chrono	Place
0001	400m	Série	Post 1°	24,5	13'00"	2ème	0007	800m	Série	Post 3°	20,3	1'48'29"	1er
0001	400m	Série	Post 6°	22,2			0007	800m	Série	Post 6°	19,5		
0001	400m	Série	Post 11°	5,7	13'30"	4ème	0007	800m	Finale	Post 3°	21,3	1'48'09"	2ème
0001	400m	Finale	Post 3°	23,8			0007	800m	Finale	Post 6°	19,6		
0001	400m	Finale	Post 6°	HI	13'43"	3ème	0008	800m	Série	Post 1°	20	1'48'28"	1er
0002	400m	Série	Post 2°	HI			0008	800m	Série	Post 2°	19,9		
0002	400m	Série	Post 6°	HI	14'22"	4ème	0008	800m	Finale	Post 3°	20,7	1'48'36"	1er
0002	400m	Série	Post 30°	18,5			0008	800m	Finale	Post 6°	19,7		
0002	400m	Série	Post 3°	23,5	2'05'35"	3ème	0010	800m	Série	Post 1°	21,8	1'49'43"	4ème
0002	400m	Finale	Post 6°	HI			0010	800m	Série	Post 6°	19,3		
0004	800m	Série	Post 3°	18,2	12'12"	1ère	0012	400m	Série	Post 1°30"	22,8	46'50"	1er
0004	800m	Série	Post 6°	21			0012	400m	Série	Post 6°	23,3		
0005	400m	Série	Post 2°	HI	13'02"	1ère	0012	400m	Finale	Post 1°	HI	45'71"	1er
0005	400m	Série	Post 6°	24,8			0012	400m	Finale	Post 6°	24,7		
0005	400m	Finale	Post 3°	23,5	13'02"	1ère	0015	400m	Série	Post 3°	21,8	15'06"	3ème
0005	400m	Finale	Post 6°	HI			0015	400m	Série	Post 6°	22,2		
0006	400m	Finale	Post 6°	24,8	48'53"	1er	0015	400m	Finale	Post 3°	HI	52'87"	3ème
0006	400m	Finale	Post 3°30"	22,3			0015	400m	Finale	Post 3°30"	22,4		

49

RECHERCHE ATHLÈTE

ALORS, QUE COMPRENEZ VOUS ?

Temps (s)

Distance	Temps (s)
100m	17.74
200m	17.35
400m	17.83
800m	17.89
1600m	17.6

ATHLÈTE 1

Temps (s)

Distance	Temps (s)
100m	17.6
200m	17.68
400m	17.82
800m	17.98
1600m	18.13

ATHLÈTE 2

1^{ère} séance de puissance lactique en côte

Lactacisme (mmol/L)

Phase	Lactacisme (mmol/L)
Pré	0.4
1er	5.7
3ème	10.5
5ème	11.6
7ème	14.2
9ème	13.4
11ème	12.5

ATHLÈTE 1

Lactacisme (mmol/L)

Phase	Lactacisme (mmol/L)
Pré	2.5
1er	8.4
3ème	13.2
5ème	15.4
7ème	16.2
9ème	15.8
11ème	15.6

ATHLÈTE 2

	Athlète 1	Athlète 2
VO2max (ml/min/kg)	59,2	62,1
Masse (kg)	52	58
Taille (cm)	167	172
Âge (ans)	18	25

Vitesse moyenne sur les 120m (m/sec)

6,76 6,73

Vitesse moyenne sur les 120m (km/h)

24,35 24,24

Vitesse moyenne sur les 120m en % de VMA

124,87 121,20

50

RECHERCHE ATHLÈ

POUR ALLER PLUS LOIN ... MAIS SURTOUT PLUS VITE !

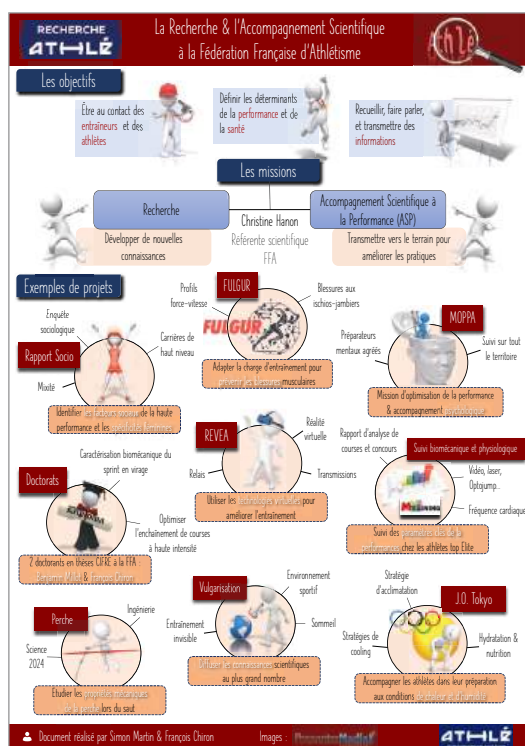
51

RECHERCHE ATHLÉT	ÉVALUATION
	1- Qu'est-ce que j'ai retenu et appris ? 2- Qu'est-ce que j'ai retenu et appris ? 3- Qu'est-ce que j'ai retenu et appris ? 4- Qu'est-ce que j'ai retenu et appris ? 5- Qu'est-ce que j'ai retenu et appris ? 6- Qu'est-ce que j'ai retenu et appris ?

52

ANNEXE n° 8

Quand la science s'invite sur les pistes d'athlétisme regards croisés sur les actions de la nouvelle équipe "Recherche Athlé"



Exemples de projets de recherche et d'AS menés à la FFA, dont la plupart bénéficient du renfort de l'équipe "Recherche Athlé".

LA RECHERCHE ET L'ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE À LA FÉDÉRATION FRANÇAISE D'ATHLÉTISME

Pour la première fois de son histoire, la FFA a créé en 2017 un poste de cadre technique consacré à la recherche. Destinée exclusivement à la haute-performance, la mission de ce cadre technique est centrée sur le développement des projets de recherche, d'accompagnement scientifique et de formation continue des entraîneurs. Les ambitions et les initiatives se multipliant, il est rapidement apparu qu'une seule personne –pour initier, organiser, financer et suivre les différents dossiers pour toutes les spécialités et pour tous les champs scientifiques– était un

défi difficile à soutenir. La création début 2021 d'un groupe "Recherche Athlé" –sans aucune existence institutionnelle–, a permis de regrouper deux cadres techniques (Christine Hanon et Guillaume Guiloineau) ainsi que cinq étudiants (François Chiron, Jérémie Jusseaume, Vincent Guyot, Benjamin Millot et Simon Martin) compétents, passionnés et déjà engagés sur des projets de recherche centrés sur l'athlétisme. Ce groupe doté d'une forte vitalité a notamment favorisé l'extension de l'offre d'accompagnement scientifique et la réalisation de documents de diffusion des connaissances à destination des entraîneurs ou des athlètes. Si deux de ces actions seront développées dans cet article, il en existe bien d'autres, comme l'illustre le visuel ci-contre.

ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE OU RECHERCHE

On distingue l'Accompagnement Scientifique (AS) de la Recherche selon 3 critères principaux : le but, le spectre et le temps :

- Le but de la recherche est d'apporter une pièce nouvelle dans le puzzle des connaissances déjà acquises alors que l'AS viserait davantage à mettre en pratique une méthode, un concept déjà connu.
- Ainsi, la recherche implique de travailler le plus souvent avec un groupe expérimental et dans des conditions standardisées, puis à généraliser ces résultats, alors que l'AS vise davantage à apporter une réponse individuelle.
- De ce fait, la recherche induit un temps long entre la question posée et la réponse proposée (mois voire années). Autant que faire se peut, l'AS réduit au maximum le délai de réponse (jours, heures). Il est primordial de noter que les deux actions se nourrissent mutuellement,

que l'une comme l'autre ont en commun la rigueur dans le recueil des données comme dans le traitement des résultats et qu'AS comme recherche doivent répondre à un besoin émergent du "terrain" le plus souvent, à l'image des deux actions d'AS détaillées dans les lignes qui suivent.

SILENCE, ÇA TOURNE ! QUAND L'ATHLÉ FAIT SON CINÉMA...

Aujourd'hui, toutes les compétitions de haut-niveau sont filmées, que ce soit à l'échelle nationale ou internationale. Si certaines ne bénéficient pas de retransmission télévisée, nombreuses sont les personnes munies de téléphone dont la qualité de l'objectif ferait rougir les meilleures technologies d'il y a 20 ans. À l'image des chronophotographies pionnières d'Etienne-Jules Marey et de Georges Dumeny à la fin du XIX^e siècle, du diplôme de l'INSEP obtenu en 1976 par Jacques Piasenta sur le thème "spécificité de l'image graphique animée", ou encore des outils et méthodes d'analyse développés plus récemment par Bruno Gajer ou Gilles Follereau notamment en grands championnats, l'analyse d'images accompagne le développement du sport moderne depuis sa genèse en permettant d'offrir un retour d'informations précieux aux athlètes et entraîneurs, à l'entraînement comme en compétition. Aujourd'hui, la vidéo s'est imposée comme un outil incontournable permettant de revoir un geste, une action, et en guidant les entraîneurs dans leurs choix de travail techniques ou tactiques, notamment dans les sports collectifs.

Cependant, en dépit de sa plus-value certaine pour l'entraînement, l'analyse vidéo présente un certain nombre de limites auxquelles ses utilisateurs doivent faire face dans leur quotidien. En



Chronophotographie d'un coureur (Demeny, 1902)

athlétisme, l'entraîneur est souvent seul à l'entraînement ou en compétition et il n'est pas toujours aisé de se fier à son "œil de maquignon" en observation directe (voir à ce sujet la revue AEFA n°220, 4^e trimestre 2015, spécial observation) tout en filmant la course, le saut ou le lancer de son athlète. En effet, ces deux modes d'observation apparaissent complémentaires et ne sont donc pas interchangeables. Par ailleurs, les vidéos prises ne sont pas toujours exploitables pour une analyse fine, notamment en raison de l'éloignement des prises de vue. Enfin, et nous y reviendrons plus tard, ce type d'analyse est extrêmement chronophage... Ainsi, si la plupart des entraîneurs d'athlétisme exploitent la vidéo et ses logiciels d'analyse associés (Kinovéa, Dartfish, MySprint, etc.), ces limites ne permettent souvent pas d'en faire une utilisation optimale.

Forte de ce constat, l'équipe Recherche Athlé, bien aiguillée par son maître en la matière Vincent Guyot, a cherché à exploiter cette brèche pour répondre à des besoins d'entraîneurs. Ce travail d'analyse

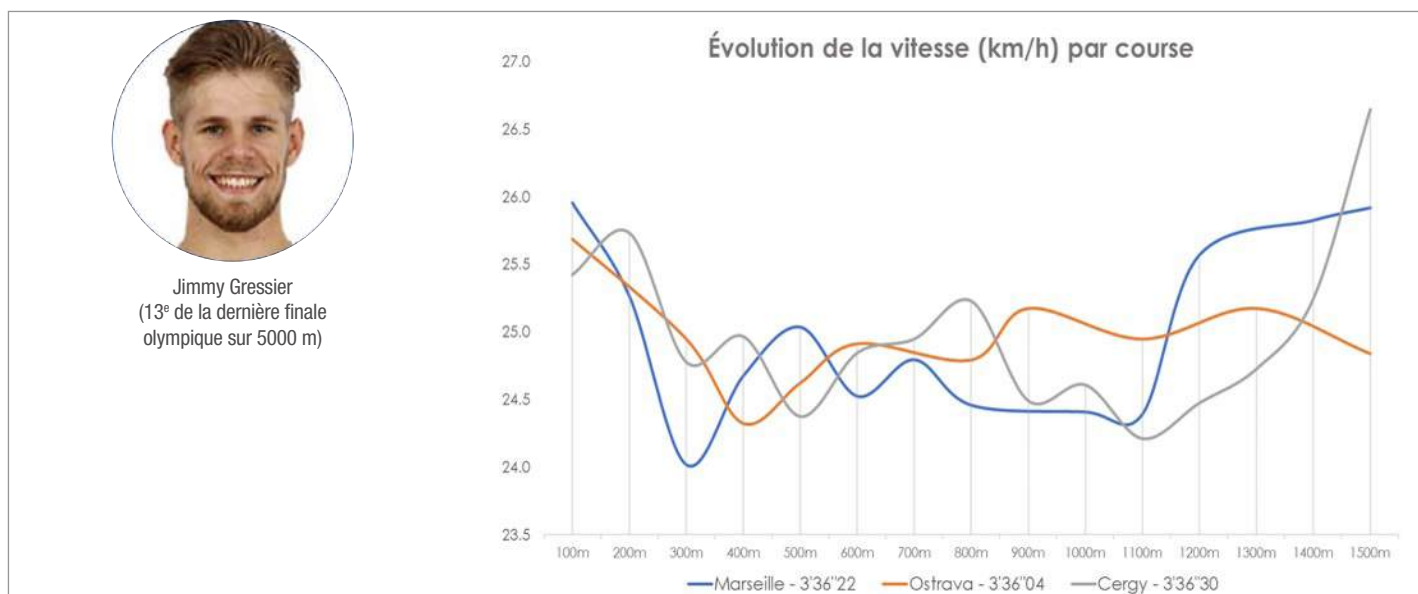
vidéo, réalisé à l'entraînement et en compétition, se structure progressivement depuis près d'un an maintenant, avec la course bien évidemment, mais également dans les lancers et dans les sauts. Un accompagnement régulier est d'ailleurs mis en place avec des athlètes comme Mélina Robert-Michon (disque), Kevin Mayer (sur le disque et le poids, bientôt peut-être sur le javelot) et Rose Loga (marteau). Concernant la course, les analyses se font principalement en compétition et concernent toutes les disciplines sur piste, en sprint comme en demi-fond.

Chaque spécialité a ses propres critères d'observation et d'analyse, ce à quoi se rajoutent les paramètres d'intérêt définis par chaque entraîneur. Notre équipe œuvre donc de concert à la construction de rapports personnalisés dépendant de la discipline et tenant compte des demandes spécifiques de chaque entraîneur, l'objectif étant d'offrir un retour d'informations utile pour les entraîneurs et athlètes concernés. Parmi les variables étudiées, on retrouve par exemple les temps de passage tous les

200 m lors d'un 5 000 m, le temps passé dans l'intervalle inter-obstacle sur un 110 m haies, le nombre d'appuis dans l'intervalle inter-obstacle et la jambe d'attaque sur un 400 m haies ou encore l'amplitude et la fréquence moyennes de la foulée pendant un 400 m. Ce genre de rapport permet la mise en lumière de données objectives, sur des paramètres précis, ainsi qu'un retour d'informations détaillé concernant le déroulé de la course. En cet été 2021 qui correspondait pour certains à une phase de chasse aux minimas olympiques ou de préparation en vue des Jeux, ces analyses de course ont été plutôt appréciées par les entraîneurs demandeurs, comme illustré par le témoignage de certains d'entre eux :

Adrien Taouji (entraîneur demi-fond INSEP) :
« Les rapports détaillés et découpages des courses de meetings et/ou championnats m'ont été d'une grande aide pour :

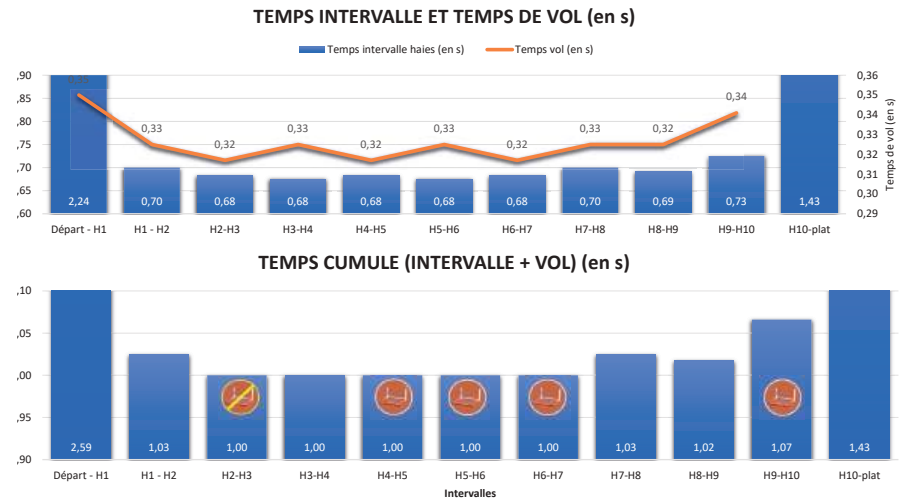
- Le briefing/debriefing avec mes athlètes avant ou après une compétition. Apporter un autre regard sur la performance et sa construction.



Comparaison de trois 1500m de Jimmy Gressier en 2021 (exemple de rapport d'analyse proposé à son entraîneur Adrien Taouji)



Wilhem Belocian
(athlète olympique
sur 110m haies)



Benjamin MILLOT - Vincent GUYOT - Jérémy JUSSEAUME - Simon MARTIN - François CHIRON

Analyse de la finale du 110m haies des championnats de France Elites 2021 (Angers - 13¹⁵ - RP) proposée à son entraîneure Ketty Cham

- *Mon analyse personnelle sur la performance de mon athlète au regard de sa stratégie de course.*
- *L'évolution de mes contenus d'entraînement (ex : mettre davantage l'accent sur la préparation de la vitesse terminale dans mes séances). Être en phase avec les évolutions chronométriques et stratégies de course en lien avec les évolutions technologiques matérielles de ces 2 dernières années ».*

Ketty Cham (entraîneure sprint-haies) :
« Les analyses des données de compétitions m'ont beaucoup aidé. L'analyse était fine et rapide grâce aux outils utilisés par les étudiants. Les analyses ont même pu être réalisées sur les compétitions où je n'étais pas présente. C'était un vrai plus, un gain de temps pour moi au vu du nombre d'athlètes que j'avais d'engagés sur la saison estivale. Le format du compte rendu était bien, ils ont tenu compte de mes demandes et eux-même ont été forces de proposition. C'est quelque chose que je souhaiterais réitérer pour la saison hivernale, si possible ».

Richard Cursaz (entraîneur sprint-haies) :
« L'utilité de cette analyse est qu'elle demande du temps, cela nous en libère. L'analyse peut être comparative avec les autres athlètes entre eux car elle respecte le même protocole d'analyse, ce qui n'est pas toujours le cas entre l'analyse des différents entraîneurs, entre le protocole ou les outils d'analyse (Dartfish, Ximage) selon le support de capture vidéo... ».

Dans son témoignage, Richard Cursaz met en évidence deux des limites du travail

d'analyse vidéo : son côté chronophage d'une part, avec un traitement vidéo difficilement automatisable pour l'heure. D'autre part, son côté "opérateur-dépendant". Un important travail d'équipe sur l'harmonisation du traitement des données ainsi que sur les rapports envoyés aux entraîneurs a été mené, pour que ceux-ci soient réalisés de la même façon, quel que soit l'opérateur.

Mais alors, comment procédons-nous ? Lorsque cela est possible, nous nous rendons sur les lieux de compétition munis de plusieurs caméras que nous disposons à des endroits stratégiques pour avoir les images les plus précises possibles. Le dispositif est généralement constitué de 3 ou 4 caméras, dont nous ajustons les fréquences d'image en fonction de la spécialité (fréquence plus importante sur 100 m haies que sur un 1 500 m par exemple). Néanmoins, notre rôle et la nécessité de nous positionner en des emplacements précis n'est pas toujours bien compris de la part des organisateurs des compétitions. Parmi les autres obstacles que nous pouvons régulièrement rencontrer, nous mentionnerons le passage de spectateurs juste devant nos objectifs, ou encore la difficulté à saisir avec nos caméras la lumière du pistolet électronique des starters (indispensable pour identifier le moment du départ dans nos analyses), comme ce fût le cas lors des derniers championnats de France Elite à Angers. Dans ce dernier cas de figure, notre équipe doit faire preuve d'ingéniosité et de patience... Par exemple, il est possible d'analyser la course en partant de l'image

finale avec une caméra positionnée dans l'axe de la ligne d'arrivée pour remonter au départ via la performance réalisée par l'athlète. Avec un peu d'acrobatie, nous pouvons également synchroniser la base temporelle de deux vidéos qui ont deux points de vue différents, en identifiant deux images communes sur ces deux vidéos distinctes.

Nous utilisons également d'autres outils d'analyse de courses. Exemple lors du dernier meeting de Montreuil avec l'utilisation du laser nécessitant un positionnement dans l'axe de déplacement de l'athlète.

Néanmoins, il n'est pas toujours possible d'être présents sur les courses (problématiques budgétaires, moyens humains, etc.). Pas de panique, nous pouvons toujours récupérer les rushes des diffuseurs télé. En revanche, la précision est généralement moins importante, avec une fréquence d'images dépassant rarement 50 images par seconde (sauf sur certains ralentis de bonne qualité), et pouvant même descendre jusqu'à 30 Hz : cela dégrade malheureusement la qualité des analyses car le risque d'erreur devient trop important au regard de la durée du paramètre mesuré (ex : temps de vol sur la haie nécessitant une précision au centième).

Nous travaillons actuellement à l'idée que les entraîneurs puissent filmer avec leur propre téléphone ou tablette les courses de leurs athlètes lorsque nous ne pouvons pas être présents, afin de récupérer des vidéos avec des fréquences



Nous utilisons également d'autres outils d'analyse de courses. Exemple lors du dernier meeting de Montreuil avec l'utilisation du laser nécessitant un positionnement dans l'axe de déplacement de l'athlète.

d'image autour de 120 Hz. En effet, certains entraîneurs et athlètes souhaiteraient pérenniser ce travail d'analyse vidéo lors des futures saisons, ce qui souligne l'intérêt du travail réalisé sur cette première saison. La perspective d'agrandir notre équipe pour répondre à ces attentes paraît donc indispensable. Ainsi, un partenariat pourrait être noué avec l'Ecole Normale Supérieure de Rennes où Erwan Delhaye propose déjà un outil d'analyse complémentaire de la vidéo en l'objet de la capture de mouvement qui offre grâce à des caméras opto-électroniques et des marqueurs rétro-réfléchissants positionnés sur l'athlète et sur son engin de lancer un degré de précision inégalable par les meilleurs caméscopes, notamment dans les lancers. Dans un futur proche, un module de formation visant à exposer ces principes d'analyse auprès des entraîneurs intéressés pourrait aussi voir le jour. Nous œuvrons également à améliorer notre

visibilité et à clarifier notre rôle auprès des organisateurs d'événements pour travailler conjointement avec les diffuseurs en vue d'objectifs différents : capturer l'instant chez les uns, décortiquer la performance pour mieux la servir chez les autres. Enfin, à l'image de ce qui se fait déjà dans certains pays nordiques, un meeting spécial permettant l'acquisition de données pourrait être créé.

QUAND L'ÉQUIPE "RECHERCHE ATHLÉ" S'INVITE AUX CHAMPIONNATS DE FRANCE CADETS-JUNIORS

Si les actions présentées jusqu'à présent semblent satisfaire les entraîneurs concernés, il ne vous aura pas échappé que celles-ci s'adressent essentiellement à la minorité que représente notre élite athlétique. Fort de ce constat, notre équipe a pris ce « problème » à deux mains en se posant une question de première importance : « Comment rendre ce genre d'actions utiles au plus grand nombre ? ». Si certains d'entre nous contribuent déjà à diffuser certaines informations scientifiques à plus large échelle par le biais de la revue de l'AEFA, la perspective d'un événement in-situ est très vite apparue comme une évidence. Il nous fallait donc choisir un moment clé nous permettant de mettre en pratique nos idées. Et quand on y pense, quoi de mieux que des championnats de France Jeunes (Cadets/Juniors) pour toucher un public nombreux à un âge propice à l'acquisition des "bonnes pratiques" qui contribuent à la performance ? Nous savions en effet que seraient présents de jeunes athlètes prometteurs, leurs entraîneurs ainsi que des parents venus soutenir leurs graines de champions... L'équipe "Recherche Athlé" au grand complet s'est donc attelée à

préparer cet événement, tout en sachant que tous ses membres ne pourraient pas être présents le Jour-J. C'est ainsi que Simon, François et Jérémy se sont rendus au stade Robert Bobin (Evry-Bondoufle) les 9, 10 et 11 juillet derniers.

Pour nous, il s'agissait d'une première, et le moins que l'on puisse dire, c'est que nous n'avons pas été déçus ! Trois jours durant nous avons redoublé d'interactions au grès du passage incessant en un lieu stratégique de l'enceinte essonnienne. Si nous devions à l'origine être placés en dehors du stade, l'envie de pouvoir rencontrer le plus de personnes possibles nous a poussés à nous installer à un endroit où notre visibilité serait maximale : en face de la buvette. Ce stand avait pour objectifs de présenter les différentes actions de recherche menées à la FFA, de sensibiliser les entraîneurs, athlètes et autres acteurs de l'athlétisme à ce qu'est l'accompagnement scientifique à la performance, mais aussi de partager concrètement des connaissances sur des sujets précis. Afin de rendre plus visuelle cette diffusion d'informations, notre équipe avait pris le temps de confectionner de grands posters présentant ces différents projets. L'un des posters a d'ailleurs été fourni par les chercheurs de l'INSEP investis dans le projet FULGUR, un projet de recherche mené en collaboration avec la FFA ayant pour objectif de mieux comprendre les facteurs de survenue des blessures aux ischio-jambiers, une problématique très importante en athlétisme. Nous tenions donc à les remercier. Réalisé par Simon, François et Vincent, un autre poster avait pour objectif de sensibiliser les jeunes athlètes aux pratiques permettant d'améliorer la qualité de leur sommeil, facteur essentiel de la récupération, et donc de la performance en athlétisme. Ce poster, qui vous est présenté en version détachable à la suite de cet article, a



Capture de mouvement du lanceur de disque Tom Reux (champion de France Elite 2021) réalisée par Erwan Delhaye et Charles Pontonnier au Campus Sport Bretagne de Dinard (source : Ouest France)



Des laboratoires de recherche à la piste d'athlétisme, il n'y a qu'un pas !

d'ailleurs été décliné en une centaine de flyers qui avaient pour vocation d'être distribués aux personnes intéressées.

Très vite, les gens ont commencé à s'arrêter, intrigués par ces grandes illustrations. Nombreux sont ceux à avoir été surpris de voir autant d'actions menées de front simultanément, sans que cela ne fasse trop de bruit au sein de la fédération. Pour ceux qui le souhaitent, nous avons pris le temps d'échanger autour de ces questions. Nous avons été particulièrement heureux de constater autant de réceptivité chez les personnes intéressées, et avons trouvé cet exercice à la fois enrichissant et formateur pour nous-mêmes : on n'apprend jamais autant qu'au contact de son public. Les flyers concernant le sommeil se sont d'ailleurs distribués comme des petits pains, si bien que nous avons rapidement décidé de mettre en place un système de QR code sur chaque poster, permettant ainsi de récupérer le document directement sur son téléphone. Nous saurons pour la prochaine fois que ce type de flyers peut intéresser un grand nombre de personnes, de quoi s'organiser et se préparer en conséquence.

A l'image des retours des entraîneurs concernant l'utilité des analyses de courses présentés plus haut, nous avons recueilli quelques témoignages de personnes ayant pris le temps d'échanger avec nous pendant ces trois jours, parmi lesquels celui de Pierre Irle, entraîneur au DUC Draguignan : « *Je remercie l'équipe Recherche Athlé pour leur écoute le jour des championnats de France Jeunes à Bondoufle pour le jeune cadet Ayoub El Amani qui a fini 5^e aux France sur 2000 m steeple en 5"59'... En effet, il avait*

des problèmes de sommeil, impossible pour lui de se coucher tôt depuis le confinement et cette situation s'est vite dégradée. Souvent il s'endormait entre 2h et 4h du matin avec un réveil à 12h... L'équipe lui a bien fait comprendre l'importance d'avoir un endormissement en respectant le réseau horaire normal pour avoir un sommeil profond, lui permettant ainsi de mieux récupérer... Moi en tant que coach, je lui disais, mais venant de personnes comme eux, qui nous ont écoutés pendant plus d'une heure avec des échanges super intéressants, le message est mieux passé. Depuis la rentrée scolaire Ayoub a enfin trouvé le déclic et dort 8 heures par jour de 23h à 7h du matin... Il a pris conscience de l'importance du sommeil, surtout en junior avec le volume d'entraînement qui est plus important.... Je remercie particulièrement Jérémy qui nous a suivi durant cet été et jusqu'à ce jour pour savoir si Ayoub prenait de bonnes habitudes... ».

Ce genre de retours nous motive encore un peu plus à poursuivre dans cette direction, et ce malgré les obstacles rencontrés, parmi lesquels la difficulté à concilier cette entreprise avec le rôle d'entraîneur endossé en parallèle par certains d'entre nous sur ce type de compétitions. Nous espérons également, à l'avenir, travailler plus étroitement avec les organisateurs d'événements afin de disposer d'un espace encore plus favorable aux interactions sur les stades. En effet, nous aimerions pouvoir réitérer ce genre d'action sur les futurs championnats nationaux, en commençant pourquoi pas dès cet hiver. Notre but est de continuer à rapprocher la recherche et le terrain et d'œuvrer au service de la performance et de la santé des athlètes.

CONCLUSION

L'accompagnement scientifique à la performance, sous toutes ses formes, occupe une place de plus en plus importante dans la sphère sportive, quels que soient l'âge et le niveau de pratique. Nombreuses sont les fédérations olympiques et clubs professionnels travaillant à mettre les dernières avancées scientifiques au service de la performance de leurs sportifs. A l'aube de l'olympiade qui nous mènera aux Jeux de Paris 2024, l'équipe "Recherche Athlé" se propose, tout comme le fait l'AEFA depuis de nombreuses années, de contribuer à développer cette culture scientifique en athlétisme.

Jérémy JUSSEAUME

Diplômé du Master Sport Expertise et Performance de Haut-Niveau de l'INSEP Investi auprès de la Fédération Française d'Athlétisme depuis 2019 sur des missions de recherche et d'accompagnement scientifique à la performance. Interventions aux pôles France de l'INSEP et de Fontainebleau.

François CHIRON

Doctorant pour la Fédération Française d'Athlétisme en collaboration avec l'Université d'Évry (laboratoire LBEPS) Adjoint d'Adrien Taouji et Accompagnateur Scientifique, Pôle demi-fond de l'INSEP Entraîneur de demi-fond.

Vincent GUYOT

Doctorant à l'INSEP sous contrat avec l'Université de Paris (Ecole doctorale Sciences du Sport, de la Motricité et du Mouvement Humain).

Benjamin MILLOT

Doctorant pour la Fédération Française d'Athlétisme sur l'analyse mécanique et musculaire de la course de sprint en virage Pôle National de Préparation Olympique de l'INSEP Décathlonien.

Christine HANON

Référente scientifique FFA Pôle Formation FFA, Innovation, Recherche.

Simon MARTIN

Enseignant-chercheur (A.T.E.R.) à l'ENS Rennes (département 2SEP) Entraîneur au Stade Rennais Athlétisme Doctorant STAPS Diffusion de l'information scientifique, Fédération Française d'Athlétisme.

Recherche

Optimisation de la performance : recherche sur l'optimisation de l'enchaînement d'exercices à haute intensité (400 et 800m)

par François CHIRON

François Chiron, doctorant en physiologie du sport, au pôle Recherche et Accompagnement Scientifique pour la Performance de la FFA et entraîneur adjoint au Pôle ½ fond de l'Insep

AEIFA : Bonjour François et tout d'abord merci pour cet entretien

Nous te présentons comme étudiant-chercheur et entraîneur dans le cadre d'une étude dont tu vas nous partager objectifs et contenus. Peux-tu nous en dire davantage sur cette étude, sa genèse et sa finalité ?

François Chiron : Bonjour, oui en effet je suis à la fois entraîneur et doctorant. En d'autres termes je fais ma thèse avec l'Université d'Évry et conjointement pour le compte de la FFA sous la responsabilité de Christine Hanon. J'ai également la chance de participer à l'accompagnement scientifique et la vie d'entraînement du groupe d'Adrien Taouji à l'INSEP et de fait ai beaucoup d'intérêts et d'adhérences avec la recherche scientifique appliquée en course : c'est-à-dire l'accompagnement scientifique.

La genèse de ce projet de recherche est venue de Christine Hanon (responsable scientifique de la FFA), de ses multiples expériences et de ses échanges avec des entraîneurs qui exprimaient certaines difficultés rencontrées, concernant notamment l'enchaînement des performances des coureurs et coureuses de 400m en grand championnats. Pour certaines, la participation à une échéance internationale, comprenant les courses individuelles et les relais, équivaut parfois à 5 courses à haute intensité sur une semaine de compétition. Sans avoir de certitudes a priori sur les solutions à apporter, ni avoir trouvé une littérature technique et scientifique abondante produites à ce sujet, l'aspect optimisation de la pré-gestion et de la récupération de ces courses est apparue comme une évidence à explorer dans le cadre d'une démarche scientifique.

AEIFA : Tu as donc décidé de solliciter des athlètes de profil 400-800 pour réaliser cette étude . Peux tu nous la décrire dans ces grandes lignes ?

FC : Oui c'est directement auprès des athlètes de ce système majoritairement lactique (mais si je devrais plutôt parler de glycolyse anaérobie) que nous avons choisi de mener cette étude. D'une part pour rester au plus près de la spécificité du sujet, d'autre part pour avoir des athlètes à compétence significative afin de produire des efforts à haute intensité dans ce type d'effort.

Le protocole, s'il devait se résumer en quelques mots, consiste à soumettre ces athlètes à une séquence de mesures plus ou moins invasives allant de la perception de la fatigue ressentie, des micro-prélèvements sanguins comme lactatémie, de marqueurs de performance, aux recueils salivaires et urinaire, le tout durant une période de 8 jours (même si toutes les mesures ne sont pas quotidiennes) au cours de laquelle ils devront produire un 400m à intensité maximale, et ce 3 jours de suite. Ces différents athlètes sont également sollicités pour avoir une alimentation et une hydratation particulière (appelée à tendance alcalinisante) durant toute la période de tests ainsi que des protocoles de récupération, sommeil et de relaxation : chaque athlète n'ayant pas les mêmes consignes pour singulariser ces paramètres.

AEIFA : Un dispositif assez contraignant d'une certaine manière . Quand et comment as tu pu pratiquer cette étude ?

FC : En effet contraignant car non neutre pour l'athlète (et son entraîneur) et en ce sens nous avons choisi 3 périodes distinctes présentant l'avantage de pouvoir s'insérer éventuellement dans la planification des athlètes tout en « disposant » d'eux à des périodes significatives en termes de capacité à produire et réitérer des intensités proches de celle des compétitions.

Et donc ces 3 périodes, l'une courant mai, avant les grandes échéances de juin juillet (fin de préparation spécifique avant les compétitions) pour les athlètes concernés, l'autre fin juillet (en fin de saison), juste après les Open de France, et enfin une 3e session qui aura lieu juste après la coupe de France des relais en octobre 2022 et pour laquelle j'en profite pour passer une petite annonce via vos colonnes.

AEIFA : Sur ces éléments de recherche, nous avons pu assister à une journée de test et observer un protocole serré bien que très proche du terrain, toutes les mesures effectuées ayant été faites directement sur la piste couverte de la Halle Maigrot à l'INSEP. En quelques mots toujours, peux-tu nous décrire ces axes de recherches et protocoles terrain ?

FC : En fait tout s'articule autour du test sur 400m fait chaque jour. Les athlètes arrivent 1h30 avant et nous produisent des échantillons salivaires et urinaires. Une première mesure de leur lactatémie et des gaz du sang avant effort est réalisée alors, ainsi que des tests en production de force (squat jumps et force de préhension) et un questionnaire d'anxiété pré-compétitive.

Puis les athlètes s'échauffent selon leurs propres routines et s'élancent pour le 400m (départ en start comme en condition compétitive). Après leur 400m, ils ont alors les différentes mesures à refaire à des temps différents et très précis pour évaluer leur fatigue ainsi que leur cinétique de récupération.

AEIFA : Et ce 3 jours consécutifs donc ?

FC : Oui trois jours pour simuler une série, demi et finale ; ce bloc étant précédé d'une première période où il leur est demandé de suivre un régime alimentaire et hydrique précis car là aussi nous pensons que l'optimisation de la performance peut être améliorée et avons souhaité introduire cette variable dans l'étude.

AEIFA : Ces axes ont-ils été déterminés par hasard, sur la base de tes connaissances scientifiques universitaires et autres littératures sur le sujet ?

FC : Bien évidemment ce n'est pas du hasard. On s'appuie d'abord sur les connaissances scientifiques dont nous disposons ou des pistes de réflexions déjà en cours mais nous priorisons surtout le versant pragmatique et terrain de ce projet. En ce sens, c'est notamment lors d'échanges avec de nombreux entraîneurs et cadres référents nationaux ou en observant les méthodes déjà appliquées que nous avons déterminé ce protocole.

Ainsi même si les mesures en laboratoire présentent de nombreux avantages organisationnels, nous ne voulions pas tester des athlètes coupés de leur écologie naturelle (la piste, la course en couloir à haute intensité). Notre étude devait aussi nous permettre d'intéresser des athlètes en nous permettant de leur faire un retour personnalisé sur leurs propres résultats et pratiques périphériques, et ce tout en considérant que le technique et le sportif doivent rester à l'athlète et à son entraîneur (pas d'ingérence sur leurs routines d'entraînement par exemple) et sans oublier la remise d'un bon d'achat d'une valeur de 200€.

AEIFA : Quelles sont à ce jour les principales observations faites sur ces 2 premières sessions du coup ?

FC : Nous avons déjà pu constater que les chiffres produits différaient selon les athlètes, preuve s'il en est que la récupération métabolique théorique estimée à 2h pour ce type d'effort, varie selon ce que

l'athlète avait dû et pu suivre du protocole sans oublier que la fatigue est systémique et qu'elle ne peut se suffire à une course de haute-intensité.

L'estimation du facteur stress/anxiété par exemple a montré que l'impact sur la fatigue réelle et cumulée pouvait être atténuée par une meilleure gestion du stress et des protocoles précis comme des méthodes de relaxation (cohérence cardiaque par exemple) optimisant notamment le sommeil qui est la principale méthode de récupération à privilégier.

Une autre observation tend à montrer qu'une alimentation trop acidifiante (trop protéinée par exemple) peut induire un déséquilibre dans l'organisme de l'athlète et de fait peut nuire à la performance sur une séquence de courses enchaînées comme en championnats ou lorsque l'athlète enchaîne des compétitions, a la poursuite de minimas ou de RP sur sa période de forme le tout augmentant le risque de blessure.

Enfin l'apport en bicarbonate de soude (HCO_3^- pour les spécialistes) limite l'effet d'acidose métabolique et en ce sens offre un autre axe d'optimisation de la performance globale de l'athlète sur effort de 400-800.

En première conclusion plus générale, si ces éléments peuvent être supposés scientifiquement par analyse des process physiologiques connus, les quantifier pour les constater est un objectif déjà atteint, en attendant la prochaine session d'automne qui nous permettra aussi d'affiner ces observations et de les profiler davantage avec un nombre supérieur d'athlètes.

AEIFA : En effet. Plus généralement la recherche en Athlé pour toi c'est un travail, une passion, une nécessité, un manque à combler ?

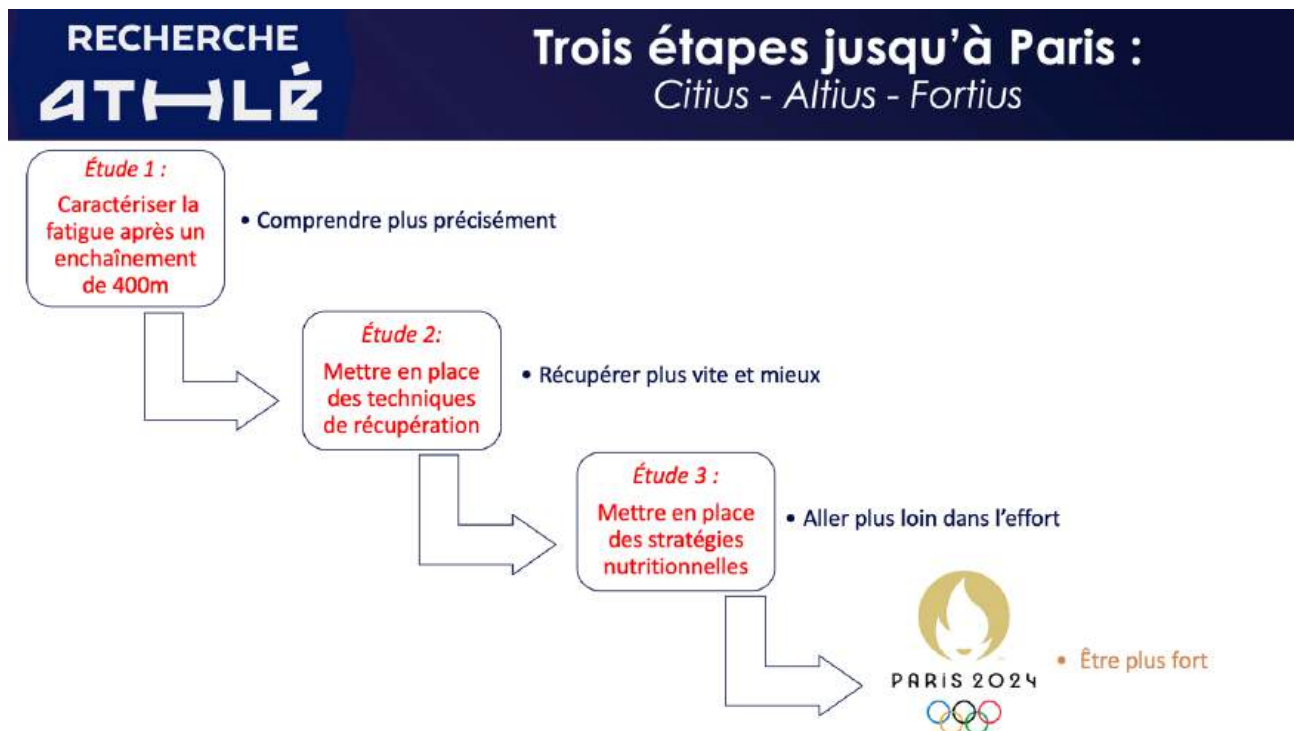
FC : Un peu de tout ça mais ce qui est sûr, c'est que c'est avant tout par passion. Du fait de mon profil et par les observations faites sur le terrain, forcé de constater que nous savons déjà beaucoup de choses (physiologie, biomécanique, psychologie, sociologie...) mais que peut être on a du mal à les mettre en pratique en raison de la complexité du sport de haut-niveau, de son caractère systémique et des multiples freins rencontrés.

AEIFA : Faute peut être à un décalage de méthodologie partagée ou un trop grand écart entre chercheurs et experts terrain ?

FC : Oui, c'est certain, mais pas que ... Sûrement, et sans donner de leçon à quiconque, c'est tout l'intérêt et ma motivation personnelle à faire de la recherche appliquée même si elle demande beaucoup de temps, de professionnalisation (scientifique et technique ici) et un coût financier non négligeable par ailleurs . A titre d'exemple, pour cette étude, en seul coût de matériel nécessaire aux mesures faites c'est un budget de 58 500€ qui a été mobilisé. Il faut trouver ces budgets, les objectiver aussi mais de mon point de vue c'est tout un secteur d'aide à l'entraînement qui est ainsi en jeu, d'aide à la décision aussi, à la singularisation (hommes/femmes par exemple), à la planification voire même à l'orientation des athlètes, avec des constats parfois surprenants ou contre-intuitifs.

AEIFA : Oui, et tout un jargon à découvrir et partager parfois aussi, en te remerciant de t'être rendu disponible et accessible pour cet entretien et les quelques documents que tu nous partages en complément

Une recherche en trois temps



Des solutions et objectifs



RECHERCHE ATHLÉT

Projet de thèse RECOV

1. Comprendre les mécanismes de la fatigue:

Une approche globale (*via des biomarqueurs innovants*) permettra de mieux comprendre l'influence d'un enchaînement de courses de 400-800m mètres sur la fatigue.

2. Améliorer la récupération

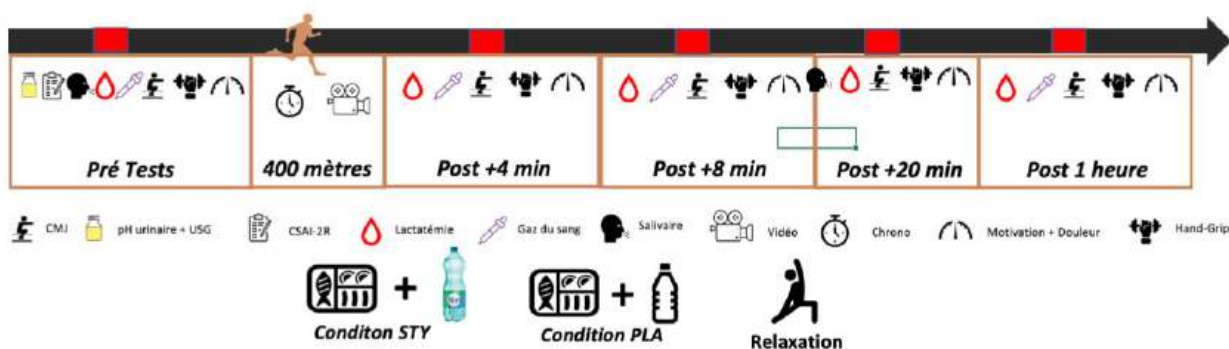
L'identification de stratégies de récupération innovantes devrait optimiser le sommeil des athlètes.

3. Optimiser la performance :

La mise en place d'une stratégie hydrique associée à une stratégie nutritionnelle permettra de limiter les effets de l'acidose.



Des tests et leur mise en œuvre



Période	Familiarisation	Pré-Test			Test			Post-Test	
Jours	Inclusion	1	2	3	4	5	6	7	8
Course de 400 mètres									
Mesures au laboratoire									
Mesures hors laboratoire									
Conditions expérimentales									

Légende



Extraits de consignes et préconisations à l'attention des athlètes testés

Consignes et recommandations nutritionnelles

Dans le cadre du protocole dans lequel vous vous engagez, voici les recommandations nutritionnelles induisant une alimentation à tendance alcalinisante.

- **Aliments à privilégier** : Végétaux, yaourt, fromage blanc, petits suisses, lait, pomme de terre, haricots secs, lentilles, pois, tofu, maïs, tous types de légumes (carottes, courgettes, épinards, poireaux...), tous types de fruits (pomme, raisin, banane, orange...), fruits secs, noixettes
- **Aliments tolérés mais à limiter** : canard, charcuterie, merguez, œufs, pâtes complètes, riz complet, pain de seigle, quinoa, semoule, amande, noix, cacahuète, pistache
- **Aliments à éviter au maximum** : crevette, hareng, saumon, truite, sole, viandes rouges, viandes blanches, fromages (toléré en très petite quantité), pain blanc, cornflakes, riz, pâtes, avoine.

Nous précisons que ces recommandations sont à suivre dans la mesure du possible et que des écarts, rares et en quantité limitée, sont bien évidemment tolérés.

Nous vous demanderons de nous envoyer sur la conversation WhatsApp, une photo de chacun de vos repas ou de vos collations. Ce suivi servira simplement à associer votre nutrition (vos repas) avec les différentes mesures de votre équilibre acido-basique (sanguin et urinaire).

Alimentation :

- Pensez à envoyer les photos de tous les repas durant les 6 jours d'expérimentations
- ⇒ Favoriser une alimentation très similaire sur les 3 jours de tests
- Pas trop de fibre le jour de la course
- ⇒ *SE PESER TOUS LES MATINS SI POSSIBLE*

Hydratation :

- 3 à 4 bouteilles (= 1,5 à 2L/jour) sur la période pré-test
- 3 bouteilles pendant la période de test
- ⇒ 1 bouteille le matin
- ⇒ 1 bouteille dans l'après-midi
- ⇒ 1 bouteille dans l'heure qui précède les 400m

Consignes relatives à la technique de respiration

Cohérence cardiaque : application RespiRelax

La cohérence cardiaque est une méthode douce de relaxation. Basée sur la respiration, elle permet de réduire le stress en régulant la fréquence cardiaque.

Elle répond à la règle du 365 :

- *3 fois par jour*
- *6 respirations par minute*
- *Pendant 5 minutes",*

La respiration se fera assis, le dos bien droit, les pieds posés par terre et les jambes décroisées pour libérer l'abdomen, l'inspiration doit être profonde, régulière et descendre jusque dans le ventre. Chaque inspiration et chaque expiration doivent durer environ cinq secondes chacune, à raison de six cycles respiratoires par minute. En cas de difficultés à observer le rythme de respiration au début, ne pas hésiter à commencer par des périodes plus courtes et plus adaptées.

L'exercice sera à réaliser fois par jour :

- Le matin après le réveil
- En fin d'après-midi (juste après la course de 400m ou après le travail)
- Juste avant de se coucher

Vous utiliserez l'application RespiRelax qui vous permettra de réguler votre respiration (inspiration et expiration) durant les 5 minutes d'exercices. Vous aurez une session de familiarisation avec les expérimentateurs lors de votre première visite.

Consignes relatives aux micro-prélèvements sanguin (gaz du sang et lactatémie)

Ces mesures seront réalisées uniquement en présence des expérimentateurs lors de la session de familiarisation et durant les 3 journées de tests.

Cinq micro-prélèvements sanguins seront effectués en amont (pré-échauffement), 4 minutes, 8 minutes et 20 minutes après la course de 400 mètres (en post) et un dernier après la récupération active.

Ces micro-prélèvements seront réalisés à partir de votre index correspondant à votre main non-dominante.

Les expérimentateurs sont habitués à ce type de prélèvements et seront équipés de lingettes désinfectantes, de compresses, de pansements et de gants.



I-stat (mesures des gaz du sang)



Lactate Pro II (mesure de la lactatémie)

Consignes relatives aux mesures de la force neuro-musculaire

Ces mesures seront réalisées uniquement en présence des expérimentateurs lors de la session de familiarisation et durant les 3 journées de tests.

A. Détente verticale (CMJ : hauteur de saut)

Ce test consiste en un saut de détente vertical. Les expérimentateurs mesureront à l'aide de barres d'Opto-Jump la hauteur de saut durant un Contre Mouvement Jump.

Le CMJ sera effectué les mains fixées aux hanches, pieds espacés largeurs d'épaules et flexion à 90°C. Vous devrez sauter le plus haut possible. Nous retiendrons votre meilleur saut à l'issue des trois essais.

B. Force de préhension (Hand-Grip)

Ce test mesure votre force de préhension à l'aide d'un dynamomètre. Vous devrez serrez la poignée le plus fort et vite possible durant 3 secondes. Votre bras sera tendu décollé du buste. Nous retiendrons votre meilleur saut à l'issue des trois essais.



Contre Mouvement Jump avec Opto-Jump



Test de Hand-Grip (force de préhension)

Questionnaire subjectif (Anxiété : CSAI-2R ; Motivation ; Satisfaction)

Ces mesures seront réalisées uniquement en présence des expérimentateurs lors de la session de familiarisation et durant les 3 journées de tests.

Le question CSAI-2R a été conçu spécifiquement pour mesurer l'anxiété précompétitive des sportifs. Ce questionnaire comportant 16 items et sera à remplir une première fois lors de la session de familiarisation ainsi que durant chaque jour de test (jour des 400m) avant de partir à l'échauffement.

L'échelle de Hooper (allant de 1 à 7) permettra de mesurer votre motivation au regard de la course de 400 mètres que vous avez à réaliser (juste avant l'échauffement) et votre satisfaction (après votre course de 400m).

Numéro du sujet : Session : Nom de l'expérimentateur : Date du test :

CONTEXTE : Un certain nombre d'affirmations que des sportifs ont utilisées pour décrire leur état d'esprit avant une compétition sont rapportées ci-dessous.

INSTRUCTIONS : Lisez chaque affirmation puis entourez le numéro approprié situé à droite de celle-ci pour indiquer ce que vous jugez vrai en ce moment. N'entourez qu'un seul numéro par phrase. Il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses. Ne passez pas trop de temps sur une des affirmations, mais choisissez la réponse qui décrit le mieux vos sentiments actuels (de "Pas du tout" à "Beaucoup").

Vous devrez évaluer ensuite le degré de chaque item en indiquant si celui-ci est facilitant pour la performance ou handicapant (de -3 -2 -1 négatif, très handicapant ; 0 pas important ; +1 +2 +3 positif, très facilitant).

Enfin, vous évaluerez sur une échelle de 1 ("Jamais") à 7 ("Tout le temps") le degré de fréquence du symptôme dans les pensées, pour chaque item, au cours de la journée.

En ce moment	Pas du tout	Un peu	Moyen	Beaucoup	Note de l'item								Fréquence						
					Très handicapant				Très facilitant				Jamais			Tout le temps			
1 J'ai peur de ne pas exploiter pleinement mes capacités lors de cette compétition.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
2 Je suis sûr(e) de moi.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
3 Je me sens tendu(e).	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
4 J'ai peur d'échouer.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
5 Je sens mon estomac se nouer.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
6 Je suis sûr de pouvoir relever le défi.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
7 J'ai peur d'échouer à cause de la pression.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
8 Je sens mon cœur battre plus vite.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
9 Je suis sûr(e) de réussir.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
10 J'ai peur d'être peu performant(e).	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
11 Je sens mon estomac défaillir	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
12 J'ai confiance car je me vois en train d'atteindre mon but.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
13 J'ai peur de décevoir par un mauvais résultat.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
14 Mes mains sont moites.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
15 Je suis sûr (e) de pouvoir réussir malgré la pression.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	
16 Je sens que mon corps est tendu.	1	2	3	4	-3	-2	-1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	



La passion d'entraîner...

www.aeifa.com



L'accompagnement scientifique à la performance en athlétisme

Depuis quelques années, cela commence à devenir une habitude, on voit de plus en plus d'athlètes Élite se faire une petite piqûre à l'index, dans le but de mesurer leur taux de lactate dans le sang. Popularisé par le succès des frères Ingebrigtsen, qui analysent leur taux de lactate sur nombreuses de leurs séances d'intervalles (cf : la web série Team Ingebrigtsen) pour vérifier qu'ils travaillent sur les bonnes allures, ce protocole est aujourd'hui répété dans de nombreux groupes d'entraînement. Mais au-delà de cette simple

articles

TOUS LES
ARTICLES >

ANALYSE / CONSEIL /
ÉQUIPEMENT

18/12/2024
**RUNNING
SHOES
AWARDS
2024 : ÉLISEZ
LES
CHAUSSURES
DE L'ANNÉE !**

> Lire plus

ANALYSE /
ÉQUIPEMENT / TEST

11/12/2024
**Test et avis
de la Hoka
Clifton 9**

> Lire plus

mesure du lactate, c'est toute une batterie de tests et d'outils d'analyse qui sont utilisés par les athlètes de haut niveau de nos jours : cardio-fréquencemètre, analyse posturale... etc. Ces différents protocoles, méthodes et outils peuvent être recoupés sous le nom « d'accompagnement scientifique à la performance » et c'est aujourd'hui un élément clé de la progression et de la réussite des athlètes. Pour en savoir plus sur ce sujet méconnu du grand public, nous avons posé quelques questions à François Chiron, doctorant à la Fédération Française d'Athlétisme et accompagnant privilégié du pôle demi-fond de l'INSEP, groupe d'entraînement dans lequel on retrouve des champions comme Claire Palou, Aude Clavier, Jimmy Gressier ou encore Mehdi Belhadj et Mohamed-Amine « Momo » El Bouajaji.

TRC : Salut François, comment vas-tu ?

François Chiron : Salut l'équipe TRC !
Comment ça pourrait ne pas aller après 10 jours de soleil à la Réunion et le lancement de la saison hivernale !

TRC : Peux-tu nous expliquer le sujet de tes études à l'INSEP ?

CONSEIL

10/12/2024

Noël : 22 idées de cadeaux pour les coureurs !

[> Lire plus](#)

CONSEIL /
ÉQUIPEMENT / TEST

10/12/2024

Top 10 des meilleures chaussures de running pour coureurs lourds en 2025

[> Lire plus](#)



FC : Tout d'abord, je suis doctorant en contrat CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) à la Fédération Française d'Athlétisme (FFA) et le laboratoire LBEPS (Laboratoire de Biologie de l'Exercice pour la Performance et la Santé) d'Évry. Mon sujet de thèse porte sur l'optimisation de l'enchaînement des courses de 400 mètres à Haut-Niveau. Pour faire simple, j'ai 70% de mon temps de travail qui est dédié à mon projet de recherche ; puis j'ai également 30% de mon temps consacré à ce qu'on appelle de l'Accompagnement Scientifique à la Performance (ASP). L'ASP peut prendre diverses formes comme on le voit souvent à travers l'évaluation et l'analyse de plusieurs déterminants de la performance (physiologiques, mécaniques ou psychologiques) mais également des temps de formations/sensibilisations auprès des entraîneurs et athlètes. C'est dans ce cadre-là que j'interviens régulièrement à l'Institut National du Sport et de la Performance (INSEP).

Retrouvez les meilleurs accessoires de running sur TRC





Photo : @wk.vision

Je dis souvent que
l'accompagnement
scientifique est une aide à la
prise de décisions pour
l'entraîneur

**TRC : On t'a vu réaliser plusieurs tests avec
des athlètes français, notamment avec le
Pôle France ½ fond de l'INSEP : quelle est la
nature de ces tests et à quoi servent-ils**

pour l'athlète ?

FC : Étant domicilié à Paris, c'est vrai que j'interviens la majeure partie de mon temps à l'INSEP auprès du Pôle France Athlétisme, et notamment auprès d'Adrien Taouji avec qui je travaille durant mon temps libre depuis 4ans en tant qu'adjoint. Mais je peux également être amené à me déplacer sur tout le territoire, voire parfois en stage comme, Font-Romeu, en Afrique du Sud ou plus récemment à la Réunion. Les actions d'accompagnement scientifique à la performance (ASP) sont très variées : cela peut être la réalisation d'évaluations ponctuelles (énergétique, musculaire, sommeil...) en collaboration avec le laboratoire SEP de l'INSEP ; un accompagnement plus régulier durant les sessions d'entraînement avec notamment les fameuses « prises de lactates », le monitoring de la fréquence cardiaque ou encore de l'analyse vidéo ; un suivi longitudinal avec la variabilité de la fréquence cardiaque et la conception de fiches destinées aux athlètes pour optimiser leur nutrition et leur récupération ; mais aussi un autre type d'accompagnement qui

consiste en ce qu'on peut appeler de la « veille scientifique » (vulgarisation et résumé d'un ou plusieurs articles sur un sujet précis pour l'entraîneur). Voilà rapidement un bref catalogue des actions que peut mener un accompagnateur scientifique.

Je dis souvent que l'ASP est une aide à la prise de décisions pour l'entraîneur ! Ces diverses actions d'accompagnement sont donc destinées directement à l'entraîneur, au travers de feedbacks, qui lui permettent d'avoir d'autres informations qu'il n'a pas toujours le temps de récolter. Ces informations lui permettent à terme d'optimiser l'entraînement et la performance des athlètes.

Donc l'ASP sert bien évidemment à optimiser la performance de l'athlète, mais surtout à **accompagner les entraîneurs** en leur communiquant des informations pertinentes au regard de leurs besoins pour qu'ensuite ils puissent prendre les meilleures décisions.

TRC : On sait que dans d'autres pays, notamment les USA, l'accompagnement

scientifique à la performance existe depuis des années (notamment avec le controversé Alberto Salazar), pourquoi en France on a l'impression que ce n'est pas vraiment le cas ou du moins seulement depuis peu ? Est-ce une idée fausse ?

FC : Tout d'abord, il est très compliqué de comparer les USA ou même le modèle anglo-saxon avec la France. Dans leurs systèmes, le sport de Haut-Niveau est privé alors qu'en France, les fédérations sportives et les clubs sont tutelles du Ministère chargée des Sports et par extension de l'État : c'est du domaine public même si l'ANS (Agence Nationale du Sport) change légèrement la donne.

Par ailleurs, c'est une fausse idée car l'ASP existe déjà en France depuis longtemps (sous diverses formes) dont notamment à l'INSEP depuis le début des années 1990 et officiellement à la FFA avec la création de la cellule "Recherche" créée en 2017 par Christine Hanon (Cadre Technique à la FFA et anciennement directrice du laboratoire à l'INSEP en 1992). Puis en 2021, Christine a été rejoint par Guillaume Guiloineau (autre

Cadre Technique de la FFA) ainsi que 5 étudiants (Jérémy Jusseaume, Vincent Guyot, Benjamin Millot, Simon Martin et moi-même). De ce fait, les actions d'ASP sont certes différentes des actions conduites dans les groupes privés comme aux USA, mais très diversifiées ! Pour prendre quelques exemples, Christine a mené plusieurs dossiers afin d'avoir des financements pour des projets de recherches ; le travail de Vincent et de son analyse de courses n'est plus à présenter ; l'analyse et l'évaluation, par Benjamin ou Jérémy, des déterminants mécaniques du sprint en compétition comme dernièrement au championnat de France Élite ou au meeting de Lyon sont régulièrement réalisées ; la conception d'un protocole très précis réalisé par Simon et Christine pour l'acclimatation à la chaleur lors des J.O de Tokyo ou encore la présence de Benjamin ou de moi-même lors de stages Équipe de France pour effectuer de multiples évaluations.

En résumé, il y a beaucoup d'actions d'ASP conduites à la FFA mais c'est un travail qui est très souvent réalisé en sous-marin. Après, on ne va pas se le cacher, d'autres

fédérations, dont notamment dans les sports collectifs, ont davantage de moyens ce qui leur permet d'être peut-être encore



THE RUNNING COLLECTIVE

LE COMPAREUR DE CHAUSSURES ET D'EQUIPEMENTS DE RUNNING

ACTUALITÉ

ÉQUIPEMENT

ITW

CON

TRC : En demi-fond plus particulièrement, on s'intéresse beaucoup depuis quelques années à la fameuse « méthode Ingebrigtsen » dont on sait qu'elle est basée sur la mesure, la mesure du taux de lactates... Est-ce que suivre cette méthode d'entraînement à la lettre c'est la panacée pour performer ?

FC : Déjà qu'est-ce que signifie "mesurer le taux de lactates" ? Car **en fonction de la méthode de prélèvement, du type de séance, voire de ce que tu as mangé, la lactatémie peut totalement changer !** Je grossis volontairement le trait, mais c'est simplement pour dire que **je ne suis pas sûr qu'il soit pertinent de vouloir suivre la méthode Ingebrigsten, surtout quand on connaît un peu leur histoire.** Le père a 3 fils qui font tous du très Haut-Niveau. Ça fait des années qu'il recueille, avec l'aide de scientifiques, de nombreuses informations sur ses fils dont notamment leur différentes

valeur/seuil de lactates à des intensités relatives.

On entend beaucoup d'entraîneurs ou d'athlètes parler de valeurs de lactatémie dont notamment les fameux seuils de 2 et 4mmol à ne pas dépasser. Je pense qu'il y a beaucoup de fantasmes, de spéculations et d'erreurs autour de ces mesures. En effet, la valeur de la lactatémie ne signifie pas grand-chose quand elle est sortie de son contexte. Il est également primordial de savoir pourquoi on la mesure, car entre une séance VMA, un seuil, un footing en endurance fondamentale ou une spé 800 mètres, ce n'est pas du tout la même utilité et par conséquent la même utilisation. En résumé, la réponse à la question : est-ce que suivre la méthode Ingebrigsten à la lettre est pertinent ; je pense que non. Est-ce mesurer la lactatémie, au même titre que d'autres paramètres de l'entraînement tels que de la FC le chrono ou l'allure : bien sûr !

TRC : Qu'est-ce qui va être mis en place en termes d'accompagnement scientifique pour les athlètes français jusqu'aux JO ?
As-tu le droit de nous donner quelques

infos ?

FC : Ce n'est pas au futur, il y a déjà eu des actions concrètes pour les J.O précédents, il y a déjà des actions qui sont menées et bien évidemment, il y en aura encore d'autres.

Très concrètement et sur un plan longitudinal, il existe entre autres des projets de recherche qui s'intéressent à la prévention des blessures des muscles des ischiojambiers (projet FULGUR) ainsi qu'un projet qui utilise la réalité virtuelle pour optimiser la transmission du témoin lors des relais (projet REVEA). On peut également citer des projets conçus pour 2024, avec par exemple le projet à destination des perchistes avec Sciences 2024, le projet VERTUO qui s'intéresse à l'alimentation et à la prévention des troubles du comportement alimentaires, ou encore un projet spécifiquement consacré aux meilleurs athlètes jeunes de lancers. On retrouve aussi les thèses initiées par la FFA dont celle de Benjamin qui s'intéresse aux déterminants mécaniques de la performance lors de la course en virage et la mienne sur l'optimisation de l'enchaînement des courses

de 400 mètres à Haut-Niveau, pour qu'à terme nous puissions aider à faire évoluer les pratiques. À côté de ça, il existe encore de nombreuses actions dont celles déjà évoquées précédemment comme la création de rapports de courses détaillés à la suite de compétitions, de la veille scientifique avec la création de fiches "pédagogiques", ou lors de séances comme le fait régulièrement Benjamin avec le sprint, le lancer ou les épreuves combinées et moi avec le demi-fond et le fond.

TRC : On a parlé jusqu'ici de pays où la science tenait une place importante dans l'entraînement. Pourtant il existe aussi des pays, on pense notamment en Afrique de l'Est ou cet accompagnement scientifique paraît mineur, voire inexistant (bien sûr, par manque de moyens). Pourtant les performances sont tout de même au rendez-vous. Qu'en penses-tu ?

FC : Sincèrement, je crois qu'il est très compliqué de comparer les pays d'Afrique de l'Est comme le Kenya ou l'Éthiopie avec les autres. Du fait de leurs histoires et de leurs cultures, les motivations ne sont pas du tout

les mêmes et par extension, les enjeux sont également différents. Sans être dans la caricature ou les clichés, courir est avant tout, dans ces pays-là, un métier et un gagne-pain non négligeable pour vivre. Alors qu'en France par exemple, le sport est tout d'abord une pratique récréative, du fait de son origine associative, qui peut ensuite devenir un métier. Par ailleurs, la dimension « vitale » de la course à pied n'est pas très représentative de la culture occidentale même s'il est vrai qu'un grand nombre d'athlètes français vivent dans une situation de précarité...

Toutefois, l'ASP est bien présent pour certains athlètes issus de ces pays. Il suffit de regarder le projet Breaking2 de Nike et toutes les actions d'ASP qu'ont nécessité ce projet avec le lancement des nouvelles chaussures, la création d'une nutrition optimisée pour marathonien, la mise en place d'un pacing (lièvres) parfait en V... Encore une fois, tout dépend de ce qu'on appelle accompagnement scientifique mais je pense qu'à très Haut-Niveau, la majorité des athlètes en bénéficient d'un.

TRC : Comment un athlète amateur, qui ne bénéficie pas d'une structure d'entraînement comme l'INSEP peut-il intégrer un accompagnement scientifique dans son entraînement ?

C'est vrai que lorsqu'on parle d'ASP, on pense tout de suite à des techniques d'optimisation de l'entraînement très sophistiquées.

Pourtant, lorsqu'on utilise son cardiofréquence mètre, sa montre GPS ou la dernière boisson isotonique pour son marathon, c'est déjà de l'ASP. Je pense que chaque athlète désireux de progresser peut à son échelle bénéficier d'un accompagnement scientifique. Cependant, il faut être vigilant aux nombreuses sociétés qui vendent monts et merveilles ! Pour ceux qui s'intéressent à la question de l'ASP, je les invite à lire la Revue AEFA (dont le dernier numéro trimestriel présenté notre cellule Recherche et la question de l'ASP à la FFA), à assister à différents colloques ou formations organisés par la FFA qui traitent de la question et tout simplement à échanger avec nous quand l'occasion se présente autour des stades.



es

[Genopolitains](#)[Temps forts](#)Innover à nos
côtés

FR ▾

[Accueil](#) • [Temps forts](#) • [Actualités](#)

ACTUALITÉS

LBEPS : La performance sportive se forge aussi au laboratoire

Trois publications révèlent comment l'approche scientifique de l'exercice physique menée au LBEPS, peut optimiser performance sportive et santé.

#Biologie de l'exercice #Performance sportive

#Accompagnement scientifique de l'entraînement



Avec 64 médailles aux jeux olympiques et 75 aux jeux paralympiques, les JO Paris 2024 ont tenu leurs promesses ! Un palmarès exceptionnel, qui place la France dans le top 10 mondial des 206 pays participants. Si la ferveur du public a porté les sportifs français pendant tout le temps des jeux, c'est bien sûr l'entraînement qui est à l'origine de leurs performances.

Dans ce domaine, la science a son rôle à jouer.

A Genopole, le [LBEPS](#) développe une approche scientifique de l'exercice physique, pour l'homme sain ou malade, et de l'entraînement intensif des sportifs et des militaires. Les

derniers travaux du laboratoire illustrent comment un accompagnement scientifique peut optimiser la préparation des sportifs.

Le [Laboratoire de Biologie de l'Exercice pour la Performance et la Santé](#) (LBEPS, sous tutelle [Université d'Évry Paris-Saclay](#) / [Service de Santé des Armées](#)) étudie la physiologie de l'exercice physique jusqu'au niveau moléculaire afin de proposer des programmes d'entraînement personnalisés.

Le but est bien sûr d'optimiser les performances mais aussi de préserver la santé des athlètes.

Le laboratoire mène également **des recherches sur des pathologies métaboliques comme le diabète et sur des maladies musculaires** pour lesquelles l'exercice physique, adapté à chaque patient sur des bases scientifiques, peut apporter un effet thérapeutique complémentaire aux traitements conventionnels.

Dans deux publications du laboratoire parues cet été, les chercheurs, en collaboration avec l'[INSEP](#) et les fédérations d'athlétisme ([FFA](#)) et de rugby ([FFR](#)), démontrent pour la première fois qu'un régime nutritionnel naturel alcalin à base de glucides et végétaux, associé à une consommation d'eau minérale riche en bicarbonate, permet de réguler les perturbations métaboliques qui peuvent nuire à la performance lors d'un exercice à haute intensité.

Réguler l'acidose, préjudiciable à l'activité musculaire

La production d'énergie pendant l'exercice génère une acidose musculaire qui peut être suivie d'une acidose sanguine. Ces perturbations affectent les activités enzymatiques et l'expression de protéines impliquées dans des processus clés de l'activité du muscle comme l'utilisation du lactate ou la phosphorylation oxydative.

De nombreuses études réalisées à partir de supplémentation de gélules de bicarbonate de sodium ont montré des effets bénéfiques sur la régulation des perturbations métaboliques au décours d'exercices de haute intensité ainsi que sur l'apparition de la fatigue. Cependant, un régime nutritionnel alcalin pourrait constituer une autre approche naturelle pour influencer l'équilibre acido-basique, sans prendre de compléments alimentaires artificiels, qui sont généralement administrés sous forme de gélules et peuvent provoquer des troubles gastro-intestinaux.

Ainsi, dans une première étude publiée dans [Journal of Human Kinetics en mai 2024](#) dans le cadre du travail de thèse de **François Chiron** en partenariat avec la Fédération Française d'Athlétisme (Chiron et coll. 2024a), les athlètes ont été soumis à 4 semaines d'un régime alimentaire alcalinisant (en privilégiant l'apport en glucides et végétaux) ou acidifiant (en privilégiant l'apport en glucides et viandes/fromages), et à une semaine d'hydratation par une eau minérale riche en ions bicarbonate ou par une eau placebo. Au terme de ce régime, ils ont réalisé un test dit « *de Wingate* » d'exercice à haute intensité pendant une minute (photo ci-dessus). A partir de la mesure du pH dans le sang et les urines, de la concentration en ion bicarbonate et du taux de lactate, **les scientifiques montrent que la consommation d'eau minérale riche en bicarbonate potentialise les effets bénéfiques d'un régime alcalinisant sur l'équilibre acido-basique, et réduit la charge acide induite par un régime acidifiant.**

Optimiser la performance

Dans une seconde étude parue dans [Nutrients en juin 2024](#) (Chiron et coll. 2024b), vingt-deux athlètes ont reçu un régime alcalinisant et de l'eau, soit placebo, soit riche en bicarbonate, puis ont effectué une course de 400 m pendant trois jours consécutifs. **L'étude simule les compétitions internationales comme les jeux olympiques ou les championnats du monde, pendant lesquelles des**

courses à haute intensité se succèdent, parfois dans la même journée. Maintenir un haut niveau de performance sur l'ensemble des courses nécessite de conserver la capacité à stimuler efficacement la glycolyse anaérobie et le métabolisme aérobie à chaque course, et de réguler les perturbations métaboliques musculaires et sanguines.

A partir de mesures de performance, d'analyse de l'équilibre acido-basique et de marqueurs indirects de la fatigue neuro-musculaire, les chercheurs démontrent la capacité des athlètes à produire des performances à des niveaux maximaux pendant trois jours consécutifs : une performance maximale et des perturbations métaboliques extrêmes aux premières courses ne compromettent pas les courses suivantes. Ils établissent également qu'un régime alcalin combiné à la consommation de 1,5 à 2 litres d'une **eau riche en bicarbonate pendant les 3 à 5 jours précédant l'événement, améliore les performances lors d'une compétition avec courses répétées**. Fait intéressant ressortant aussi de cette étude : le régime alcalin bénéfique peut être naturel, fourni par des aliments comme les légumes et les légumineuses, en limitant les produits d'origine animale, ce qui évite les troubles digestifs occasionnés par les compléments alimentaires artificiels sous forme de gélules de bicarbonate.

Mieux planifier l'entraînement pré-olympique

Dans un 3e article publié dans International [Journal of Disabilities Sports and Health Sciences](#), en janvier 2024 (Chiron et coll. 2024c), les chercheurs du laboratoire, en collaboration avec l'[Université de Liverpool](#), la FFA et l'[Institut national du sommeil et de la vigilance](#), se sont intéressés au problème complexe de la planification de l'entraînement pré-olympique, qui doit allier entraînement soutenu et préservation de la santé physique et psychique du sportif.

Ils ont suivi une athlète féminine d'élite pendant 291 jours de la phase préparatoire aux JO de Tokyo.

Les mesures ont porté sur le **système nerveux**

parasymphathique, ou « système vagal », impliqué dans le retour à la normale de la fréquence cardiaque et de la respiration après un exercice ou un stress.

L'étude indique que la variabilité de la fréquence cardiaque en position debout, combinée à des marqueurs subjectifs décrits par l'athlète (perception de l'effort, sommeil, douleurs musculaires, fatigue et stress), constitue un outil de surveillance pertinent pour adapter l'entraînement. Il s'agit notamment d'ajuster la fréquence des périodes et le contenu de chacune, et en particulier d'affiner le programme à l'approche de la compétition afin de réguler les effets psychophysiologiques du stress tout au long d'une saison olympique.



Claire Thomas-Junius, ancienne athlète de demi-fond, directrice du LBEPS : *« Les Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024 ne sont pas seulement un triomphe sportif, mais aussi une belle démonstration de la manière dont la science et l'innovation ouvrent des horizons nouveaux pour le sport et la santé. En optimisant les performances et en préservant la santé des athlètes, nous découvrons un futur où l'exercice physique devient un allié puissant tant pour les champions que pour ceux qui luttent contre des pathologies. »*

Le Laboratoire de Biologie de l'Exercice pour la Performance et la Santé apporte une expertise scientifique novatrice, au bénéfice du sport mais aussi de la santé. Sur le biocluster Genopole, ces compétences sont très complémentaires de celles d'acteurs comme le Ceritd (Centre d'Étude

et de Recherche sur l'Intensification du
Traitement du Diabète) ou le laboratoire
Généthon, avec lesquels le LBEPS collabore.

RÉFÉRENCES

Influence of chronic consumption of bicarbonate-rich water combined with an alkalizing or acidizing diet on acid-base balance and anaerobic performance.

Chiron F, Thomas C, Bardin J, Mullie F, Chéradame J, Caliz L, Hanon C, Tiollier E.

Human Kinetics, May 2024

<https://doi.org/10.5114/jhk/182986>

Exploring the influence of acid-base status on athletic performance during three consecutive daily 400-m race of simulated competition.

Chiron F, Erblang M, Guloren B, Bredariol F, Hamri, I, Léger D, Hanon C, Tiollier E, Thomas C.

Nutrients Jun 2024

<https://doi.org/10.3390/nu16131987>

Application of Vagal-mediated heart rate variability and subjective markers to optimize training prescription: An Olympic Athlete Case Report.

Chiron F, Bennett S, Thomas C, Léger D, Hanon C, Lopes P.

Int J Dis Sports, Health Sci, Jan 2024.

<https://doi.org/10.33438/ijdshts.1342537>



[PRÉSENTATION DU LABORATOIRE LBEPS](#) →

[VIDÉO : CLAIRE THOMAS-JUNIUS –
TABLE RONDE « BIOLOGIE DE LA
PERFORMANCE SPORTIVE – LES JEUX AU
COLLÈGE DE FRANCE »](#) →

[ENTRETIEN AVEC CLAIRE THOMAS-JUNIUS
DANS LE HORS-SÉRIE « SCIENCE ET
SPORT » DE POUR LA SCIENCE \(JUILLET
2024\)](#) →

[VIDÉO : PERSONNALISER LES
ENTRAÎNEMENTS DES JEUNES](#) →

[VIDÉO : SPORT ET DIABÈTE](#) →

PARTAGER



AVEC LE SOUTIEN DE





**Rester informé des
événements et
actualités de Genopole**

Votre email

Je m'abonne →



Campus
Offres
Temps forts
Genopolitains

Innover à nos
côtés →

[MENTIONS LÉGALES](#) - [PRESSE](#) - [ANNUAIRES](#) - [PLAN D'ACCÈS](#) - [LEXIQUE](#)