

Université de Paris

École doctorale : Sciences du Sport, de la Motricité et du Mouvement
Humain (SSMMH)

Laboratoire Sport, Expertise et Performance - EA 7370

Thèse de doctorat en Sciences du Sport et du Mouvement Humain

Le sommeil du sportif de haut niveau : du stress de l'exercice à l'optimisation des stratégies de récupération

Présentée et soutenue publiquement par

Anis Aloulou

le 14 Septembre 2020

Devant le jury composé de

Mr Guillaume MILLET	PU	Université Jean Monnet	Rapporteur
Mr Nicola MAFFIULETTI	HDR	Schulthess Clinic	Rapporteur
Mr Laurent BOSQUET	PU	Université de Poitiers	Examineur
Mme Shona HALSON	Associate Professor	Australian Catholic University	Examinatrice
Mr Mathieu NEDELEC	MCU	INSEP	Co-encadrant
Mr François DUFOREZ	PH	Hôpital Hôtel-Dieu	Co-encadrant
Mme Claire THOMAS-JUNIUS	PU	Université d'Evry-Paris Saclay	Directrice de thèse

AVANT-PROPOS

COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

Publications dans des revues scientifiques internationales

Nédélec, M., Aloulou, A., Duforez, F., Meyer, T., & Dupont, G. (2018). The variability of sleep among elite athletes. *Sports medicine-open*, 4(1), 34.

Aloulou, A., Duforez, F., Bieuzen, F., & Nédélec, M. (2019). The effect of night-time exercise on sleep architecture among well-trained male endurance runners. *Journal of Sleep Research*, e12964.

Aloulou, A., Leduc, C., Duforez, F., Piscione, J., Cheradame, J., Bieuzen, F., Thomas, C., Chennaoui, M., Van Beers P., & Nédélec, M. (2020). Effect of an innovative mattress and cryotherapy on sleep after an elite rugby match. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Published Ahead of Print.

Aloulou, A., Duforez, F., Léger, D., De Larochelambert, Q. & Nédélec, M. (2020). The relationships between training load, type of sport and sleep among high-level, adolescent athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance* (en revision)

Communications dans des congrès internationaux

Aloulou, A., Duforez, F., Bieuzen, F., & Nédélec, M. (2018). The effect of night-time exercise on sleep architecture among well-trained male endurance runners. *23rd congress of the European college of sport science*. Dublin, Ireland.

Aloulou, A., Leduc, C., Duforez, F., Piscione, J., Cheradame, J., Bieuzen, F., Thomas, C., Chennaoui, M., Van Beers P., & Nédélec, M. (2019). Effect of an innovative mattress and cryotherapy on sleep after an elite rugby match 2019. *9th World Congress of Science and Football*. Melbourne, Australia.

Aloulou, A., Duforez, F., Bieuzen, F., & Nédélec, M (2019). Exercice en soirée et sommeil. *Le congrès du sommeil*. Lille, France.

Communications dans des congrès et séminaires nationaux

Aloulou, A., & Nédélec, M. (2018). La variabilité de Sommeil des sportifs de haut niveau. *Séminaire A la Recherche de la Performance*. INSEP, Paris, France

Aloulou, A., Leduc, C., Duforez, F., Piscione, J., Cheradame, J., Bieuzen, F., Thomas, C., Chennaoui, M., Van Beers P., & Nédélec, M. (2019). Effet de la cryothérapie corps entier et d'une literie innovante sur le sommeil post-match. *Séminaire sciences et rugby*. FFR, Paris, France

Aloulou, A., Duforez, F., & Nédélec, M. (2020). Le sommeil du sportif de haut niveau : du stress de l'exercice à l'optimisation des stratégies de récupération. *Séminaire A la Recherche de la Performance*. INSEP, Paris, France.

Autres publications

Chauvineau, M., Aloulou, A., Nédélec, M. (2020) - Effect of whole- vs. partial-body cold water immersion on sleep and recovery among well-trained male endurance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise* (**soumis**)

Leduc, C., Weaving, D., Owen, C., Ramirez-Lopez C., Chantler S., Aloulou A., Tee, J.C., Jones, B. (2020) - The effect of acute sleep extension vs. active recovery on post exercise recovery kinetics in rugby players. *Science and Medicine in Football* (**soumis**)

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1. Le sommeil : régulation et importantes fonctions	6
1.1 La régulation du sommeil.....	6
1.1.1 Les stades de sommeil	6
1.1.2 Thermorégulation et régulation autonome pendant le sommeil	9
1.2 L'évaluation du sommeil	12
1.2.1 Polysomnographie	12
1.2.2 Actimétrie.....	13
1.2.3 Mesures subjectives du sommeil.....	15
1.3 Rôle du sommeil dans la récupération post-exercice	18
1.3.1 Influence du manque de sommeil sur la récupération physique	18
1.3.2 Influence du manque de sommeil sur la récupération cognitive	21
1.3.3 L'extension de sommeil.....	22
2. Le sommeil du sportif de haut niveau.....	24
2.1. Influence du stress de l'exercice sur le sommeil du sportif	30
2.1.1. Fatigue et sommeil.....	30
2.1.1.1. La fatigue périphérique.....	31
2.1.1.1.1. Les dommages musculaires	32
2.1.1.1.2. Relation entre charge de travail et fatigue périphérique	34
2.1.1.2. La fatigue mentale	35
2.1.1.3. Les paramètres subjectifs de la fatigue	36
2.1.2. Discipline sportive et sommeil.....	36
2.1.3. Charge d'entraînement et sommeil	38
2.1.4. Horaire de l'exercice et sommeil.....	39
2.1.5. Le sommeil en période compétitive	46
3. Stratégies d'amélioration de la qualité de sommeil	48
3.1.1. La cryothérapie corps entier	48
3.1.2. La literie à haute conductivité thermique	52
OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES	55
CONTRIBUTION SCIENTIFIQUE	57
ÉTUDE 1 : LA RELATION ENTRE LA DISCIPLINE PRATIQUEE, LA CHARGE DE L'ENTRAÎNEMENT ET LE SOMMEIL CHEZ DES SPORTIFS DE HAUT NIVEAU ADOLESCENTS	58
Synthèse de l'étude 1.....	73
ÉTUDE 2 : EFFET DE L'EXERCICE A HAUTE INTENSITE REALISE EN SOIREE SUR LE SOMMEIL DES COUREURS A PIED ENTRAÎNES	75
Synthèse de l'étude 2.....	94
ÉTUDE 3 : EFFET DE LA CRYOTHERAPIE CORPS ENTIER ET D'UN MATELAS A HAUTE CONDUCTIVITE THERMIQUE SUR LE SOMMEIL A LA SUITE D'UN MATCH OFFICIEL DE RUGBY.....	96
Synthèse de l'étude 3.....	116

DISCUSSION GÉNÉRALE	118
1. Le sommeil des sportifs de haut niveau adolescents	119
2. Influence de la charge et des horaires de l'exercice sur le sommeil.....	120
3. Améliorer la qualité du sommeil en optimisant la régulation thermique et autonome .	125
4. Les nouvelles technologies au service du suivi quotidien de l'architecture du sommeil	129
APPLICATIONS PRATIQUES	131
CONCLUSION & PERSPECTIVES.....	134
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	137

LISTE DES ABRÉVIATIONS

PSG	Polysomnographie	N1	Sommeil lent léger 1
NREM	Non-Rapid Eye Movement sleep – Sommeil lent	N2	Sommeil lent léger 2
REM	Rapid Eye Movement sleep – Sommeil paradoxal	FC / HR	Fréquence Cardiaque
N3 / SWS	Slow Wave Sleep – Sommeil lent profond	SNA	Système Nerveux Autonome
VFC / HRV	Variabilité de la Fréquence Cardiaque	SNS	Système Nerveux Sympathique
SNP	Système Nerveux Parasympathique	RRI	Intervalle R-R
HF	La bande des Hautes Fréquences	CMJ	Counter Movement Jump
LF	La bande des Basses Fréquences	VMA	Vitesse Maximale Aérobie
RMSSD	Root Mean Square of Successive Differences	TIB	Temps passé au lit
[CK]	Concentration sanguine en Créatine Kinase	TST	Temps Total de Sommeil
DOMS	Douleurs Musculaires à Début Différé	SOL	Latence d'endormissement
RPE-S	Rating of Perceived Exertion of the Session	WASO	Durée d'éveil intrasommeil
VO_{2max}	Consommation maximale d'oxygène	SE	Efficacité de Sommeil
MVC	Contraction Maximale Volontaire isométrique	FI	Indice de Fragmentation
TQR	Total Quality of Recovery (TQR) scale	SJL	Jet Lag Social
PSQI	Pittsburg Sleep Quality Index	ES	taille de l'effet
FIRST	Ford Insomnia Response to Stress Test	ANOVA	Analyse de Variance
MEQ	The Morningness-Eveningness Questionnaire	CV	Coefficient de Variation
CCE / WBC	Cryothérapie Corps Entier	CI	Intervalle de Confiance
ICC	Coefficient de Corrélation Intra-classe	SD	Ecart-type
		GPS	Global Positioning System
		ISI	Insomnia Sleep Index
		ESS	Epworth Sleep Scale
		SSI	Spiegel Sleep Inventory

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Hypnogramme d'une nuit de sommeil classique d'un bon dormeur. La première partie de la nuit est caractérisée par la prévalence du sommeil lent profond (SWS), alors que le sommeil paradoxal (REM) prédomine en deuxième partie de nuit (Ackermann & Rasch, 2014)

Figure 2: Activité EEG lors de chaque stade de sommeil (Bear et al., 2016)

Figure 3 : Représentation graphique de la régulation du sommeil à travers le "two process model" lors d'une nuit classique et suite à une veille prolongée. Le schéma du dessus présente l'évolution du sommeil lent profond (premier cycle = 100%) lors d'une nuit classique (trait continu) et après une privation de sommeil (trait discontinu). Le schéma du dessous représente l'évolution au cours du temps des processus S et C (Borbély, 1982)

Figure 4 : Evolution simultanée du rythme de la température centrale et de la sécrétion de la mélatonine au cours de la nuit (Wehr et al., 2001)

Figure 5: Sujet équipé par le dispositif portable d'évaluation du sommeil par polysomnographie (Nox A1, Resmed, USA)

Figure 6 : Méthode de calcul de la quantité de mouvement (nombre de counts) avec l'actimétrie

Figure 7 : Évolution du nombre de publications et citations sur le sommeil des sportifs (1966-2019)

Figure 8 : Durée de sommeil recommandée par la National Sleep Foundation en fonction de la catégorie d'âge. Modifié de Hirshkowitz et al. (2015)

Figure 9: les mécanismes physiologiques de la fatigue sont classés en deux niveaux ; ceux qui altèrent l'activation musculaire (niveau central) et ceux qui influencent la fonction contractile (niveau périphérique). Modifié de Enoka et Duchateau (2016)

Figure 10: Concentration plasmatique en CK après un match de rugby professionnel (figure à gauche) et sa corrélation (H24) avec le nombre de plaquages offensifs/défensifs (figure à droite). Modifié de Takarada (2003).

Figure 11 : Effet de la modification de la température ambiante (26 vs 32°C) et du niveau d'humidité (60 vs 80%) en première (expérimentation 2) et deuxième (expérimentation 1) partie de la nuit sur la température centrale, cutanée et celle du microclimat (Okamoto-Mizuno et al., 2005)

Figure 12: Study 1 timeline

Figure 13: Between-sports comparison for mean training load, perceived muscle soreness and perceived general fatigue. Significantly different from archery: ψ $p < .05$; $\psi\psi$ $p < .01$; $\psi\psi\psi$ $p < .001$. Significantly different from swimming: $\dagger$ $p < .05$; $\dagger\dagger$ $p < .01$; $\dagger\dagger\dagger$ $p < .001$. S

Figure 14: Experimental design (study 2)

Figure 15: Schematic representation of the simulated trail protocol (total duration = 48 minutes)

Figure 16: Changes in nocturnal heart rate over the first 5.5 h of sleep after TRAIL and REST conditions. All data are presented as mean $\pm$ SD. Significant difference from REST: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

Figure 17 : Changes in core body temperature (CBT) after TRAIL and REST conditions. All data are presented as mean $\pm$ SD. Significant difference from REST: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

Figure 18: Change from PRE in MVC (a), CK levels (b), DOMS (c) and general fatigue perception (d) immediately after (POST), 24 (H24) and 48 (H48) hours for REST and TRAIL conditions (n=11). All data are presented as mean $\pm$ SD. Significant difference from REST: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

Figure 19: Experimental design (study 3)

Figure 20: Figure that illustrates the bedding conditions: (a) CONT and WBC; (b) MAT

Figure 21: Changes in mattress surface temperature over 7 hours after bed time for CONT, MAT and WBC conditions (N=10). All data are presented as mean $\pm$ SD. Significantly different from CONT: * $p < 0.05$

Figure 22: Réponses cardiaques et suivi de la perception de la fatigue au cours de la simulation de TRAIL

Figure 23: Régression linéaire entre la variation de la perception des douleurs musculaires de PRE à H24 et la proportion de REM (a) et la qualité de sommeil perçue (b)

Figure 24: Régression linéaire entre la durée d'éveil intrasommeil et la fréquence cardiaque et la température centrale moyenne lors des 180 premières minutes du sommeil

LISTE DES TABLES

Table 1 : Quantité et qualité de sommeil des sportifs élités évaluées par polysomnographie, actimétrie et par questionnaires. Moyenne $\pm$ écart-type.

Table 2 : Études portant sur l'évaluation du sommeil à la suite de la réalisation d'un exercice en soirée pour des sujets sains.

Table 3: Participant characteristics and general sleep measures in relation to the practiced sport. Data are reported as mean (SD).

Table 4: Overview of the objective (actigraphy) and subjective (SSI) sleep variables in relation to the practiced sport. Data are reported as mean (SD)

Table 5: Linear mixed-effects models outputs for objective and subjective sleep variables with the subject as a random effect and the sport, daily training load, sex and age as fixed effects

Table 6: Polysomnography, mean nocturnal heart rate and core body temperature during the whole night after resting (REST) and trail running (TRAIL) (n=11). T value was presented for t-test and z value for non-parametric Wilcoxon test, depending on the normality of data distribution.

Table 7 : Polysomnography, mean nocturnal heart rate and core body temperature during the first 180min after sleep start for resting (REST) and trail running (TRAIL) (n=11). T value was presented for t-test and z value for non-parametric Wilcoxon test, depending on the normality of data distribution.

Table 8 : Actigraphy and Spiegel sleep inventory data recorded during REST, TRAIL and prior to the study (BASELINE) (n = 10). T value was presented for t-test and z value for non-parametric Wilcoxon test, depending on the normality of data distribution.

Table 9: Outline of models' details (the random and fixed effects) used for each dependent variable depending on the research question.

Table 10: Table that illustrates the internal and external match load variation from CONT (reference) for WBC and MAT

Table 11: Linear mixed-effects models evaluating the effect whole body cryotherapy (WBC) and high heat capacity mattress (MAT) on sleep quality, assessed using polysomnography, compared with CONT condition (reference).

Table 12: Linear mixed-effects models evaluating the effect of whole body cryotherapy (WBC) and high heat capacity mattress (MAT) on sleep architecture compared with a CONT condition (reference)

Table 13: Linear mixed-effects models evaluating the effect of whole body cryotherapy (WBC) and high heat capacity mattress (MAT) on mean core body temperature (CBT) and mattress temperature compared with CONT condition (reference).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La pratique d'une activité physique régulière contribue à être en bonne santé (Lang et al., 2016; Paffenbarger & Lee Jr, 1998). Les effets bénéfiques sont assurés à travers des adaptations cardiorespiratoires, métaboliques et neuromusculaires induites par l'exercice. À cet effet, l'organisation mondiale de la santé a inscrit la sensibilisation à la pratique sportive régulière au cœur de ses enjeux (OMS, 2010). Dans le cadre du sport de haut niveau, la problématique est différente. Les charges d'entraînement très élevées imposées aux sportifs, couplées à d'autres facteurs contextuels, sont à l'origine d'importants niveaux de fatigue physique et mentale. Dans ce contexte très particulier, la récupération prend une place primordiale afin de préserver l'intégrité physique et mentale du sportif. Elle est considérée aujourd'hui comme faisant partie intégrante du processus d'entraînement (Mujika et al., 2018; Nédélec et al., 2013; Skorski et al., 2019). Plus on se rapproche du niveau élite, plus la place accordée par le sportif à l'optimisation de son processus de récupération, donc à sa gestion du temps passé en dehors des entraînements, va avoir un impact sur son niveau dans la hiérarchie (Chennaoui et al., 2016; Juliff et al., 2018a). Le sommeil est considéré comme l'une des composantes les plus importantes du processus de récupération du sportif (Halsen, 2008). Depuis quelques années, un intérêt particulier a été accordé par la communauté scientifique à l'exploration du sommeil du sportif (Biggins et al., 2019; Knufinke et al., 2018a; Swinbourne et al., 2016), à son rôle dans l'optimisation de la performance (Davenne, 2009; Edwards & Waterhouse, 2009; Fullagar et al., 2015; Souissi et al., 2013) ainsi qu'à l'évaluation de différentes stratégies permettant de l'améliorer (Caia et al., 2018; Douzi et al., 2018; Douzi et al., 2019; Driller et al., 2019; Robey et al., 2013). Les sportifs et leurs encadrements commencent également à prendre conscience de l'importance du sommeil dans le processus d'entraînement (Nédélec et al., 2013; Venter, 2014). Cependant, les premiers travaux rapportent un sommeil de moindre qualité et quantité des sportifs comparativement à une population de non-sportifs (Leeder et al., 2012). Dans une large cohorte de 132 sportifs préparant les Jeux olympiques de Rio en 2016, 49% d'entre eux ont été classés comme de « mauvais dormeurs » (Drew et al., 2018). Dans une population similaire de sportifs élités australiens, 64% déclarent présenter des symptômes d'insomnie à un moment de la saison (Juliff et al., 2014). De plus, au sein d'un club de rugby de haut niveau, 24% des joueurs ont été diagnostiqués avec une apnée obstructive du sommeil (Dunican et al., 2019). Ces résultats soulignent l'importance d'évaluer le sommeil afin de préserver la santé des sportifs. Par ailleurs, la plupart des études précédemment évoquées s'accordent sur le fait que les normes de la *National Sleep Foundation* pour une bonne quantité et qualité de sommeil ne sont souvent pas atteintes par beaucoup de sportifs (Hirshkowitz et al., 2015; Ohayon et al., 2017). De plus, le sommeil des sportifs est caractérisé par une importante variabilité intra et interindividuelle (Caia et al., 2017a; Leeder et al., 2012; Nédélec et al., 2018).

De récents travaux ont passé en revue les différents facteurs de stress inhérents au contexte du sport de haut niveau pouvant impacter le sommeil du sportif (Gupta et al., 2016; Halson & Juliff, 2017; Nédélec et al., 2018). Parmi ces facteurs nous retrouvons le sport pratiqué (Gudmundsdottir, 2020; Lastella et al., 2014c; Suppiah et al., 2015; Suppiah et al., 2016), l'anxiété précompétitive, les voyages (Fowler et al., 2014; Fullagar et al., 2016a), l'utilisation des nouvelles technologies (Knufinke et al., 2018a) ainsi que la charge et les horaires des entraînements et des compétitions (Hauswirth et al., 2014; Roberts et al., 2019b). En effet, certaines études ont mis en évidence une différence des habitudes de sommeil entre les sports individuels et les sports collectifs (Lastella et al., 2014c). Il a été également rapporté que les sports esthétiques avaient une plus grande prévalence de troubles de sommeil, alors que ces derniers étaient particulièrement réduits dans les sports à risque (Schaal et al., 2011). De plus, des résultats contradictoires ont été retrouvés lors de la comparaison du sommeil entre un sport de haute intensité (*i.e.* le sprint) comparativement à un sport de faible intensité (*i.e.* le tir) (Suppiah et al., 2015; Suppiah et al., 2016). Par ailleurs, le calendrier chargé des sportifs peut influencer leur sommeil. En effet, l'importance accordée au double projet (académique et sportif) peut nécessiter la planification de séances d'entraînement très tôt le matin ou tard le soir (Fox et al., 2020; Nédélec et al., 2018; Sargent et al., 2014a; Taylor et al., 2016). Pour les sportifs professionnels, les contraintes économiques relatives aux retransmissions à la télévision impliquent des horaires de compétitions très tardifs afin d'atteindre des taux d'audience plus élevés. Il est aujourd'hui bien admis que cela impacte négativement la quantité et la qualité de sommeil mesurés subjectivement et par actimétrie (Fullagar et al., 2016b; Nédélec et al., 2019). En revanche, étant donné la complexité d'évaluer le sommeil par polysomnographie avec des sportifs, très peu d'études se sont intéressées à l'effet d'un exercice à haute intensité sur l'architecture du sommeil, ainsi que les mécanismes impliqués dans la modification du sommeil au sein de cette population.

En plus des horaires, la charge d'entraînement imposée ainsi que le calendrier compétitif de plusieurs disciplines posent un vrai défi au sommeil et à la récupération du sportif (Gupta et al., 2016; Hauswirth et al., 2014; Roberts et al., 2019b). Si l'on prend l'exemple du rugby, qui est un sport de très haute intensité caractérisé par la présence de phases de combat (Duthie et al., 2003), les matchs sont planifiés chaque semaine. Suite à un match, les indicateurs perceptifs et de fatigue neuromusculaire nécessitent quatre jours et 48h, respectivement, pour retrouver des valeurs de repos (Tavares et al., 2017). De nombreux travaux ont caractérisé les cinétiques de récupération à la suite d'un match de rugby, mais en les mettant rarement en lien avec la quantité et la qualité de sommeil après-match. Pourtant, le sommeil est très souvent perturbé à la suite d'un match comparativement à une nuit suivant une journée d'entraînement (Eagles et al., 2014; Roberts et al., 2019b; Shearer et al., 2015). Dans ces conditions, il devient primordial de mettre en place des stratégies permettant

d'améliorer le sommeil, surtout la nuit qui suit le match, afin d'assurer une meilleure récupération post-match (Roberts et al., 2019b). Récemment, quelques études ont exploré l'efficacité de certaines stratégies dans l'amélioration du sommeil du sportif (Caia et al., 2018; Douzi et al., 2018; Douzi et al., 2019; Driller et al., 2019; Lastella et al., 2019; Roberts et al., 2019a; Robey et al., 2013; Tavares et al., 2019). La mise en place de thérapies cognitives et comportementales, ainsi que l'extension du temps de sommeil semblent être des stratégies efficaces pour améliorer le sommeil à travers l'adoption de meilleures habitudes (Caia et al., 2018; Driller et al., 2019; Roberts et al., 2014). Par ailleurs, étant donné que le cycle veille-sommeil et la régulation circadienne de la température centrale sont étroitement liés (Kräuchi & Deboer, 2010), certains travaux ont évalué des stratégies de manipulation de la température centrale sur la qualité de sommeil. Il semblerait que l'immersion en eau chaude, avant le coucher (Haghighat et al., 2019), soit plus efficace que celle en eau froide (Lastella et al., 2019; Robey et al., 2013; Tavares et al., 2019) pour améliorer le sommeil. Les premiers travaux portant sur l'effet de la cryothérapie corps entier et partiel (chambre à -110/-180°C) montrent des résultats prometteurs pour améliorer la qualité de sommeil (Douzi et al., 2018; Douzi et al., 2019). Son effet sur l'architecture du sommeil reste toutefois encore à explorer. En plus des interventions avant l'endormissement, l'équipe de Krauchi et al. (2018) a observé un sommeil de meilleure qualité (+ ~ 3,4% de sommeil lent profond) avec l'utilisation d'une literie permettant d'optimiser les échanges thermiques en continu au cours de la nuit. Cette étude étant réalisée avec une population de jeunes (25-30 ans) non sportifs, son efficacité à la suite d'un exercice à haute intensité reste à démontrer.

Ce travail de thèse a pour premier objectif **d'étudier l'impact de la discipline pratiquée, de la charge d'entraînement, du sexe et du chronotype sur le sommeil du sportif de haut niveau dans un contexte de contraintes académiques/d'entraînement contrôlé et avec une population d'âge homogène.**

Ce travail de thèse a également pour but **d'évaluer l'architecture du sommeil et de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans la perturbation du sommeil du sportif de haut niveau à la suite de la réalisation d'un exercice à haute intensité en soirée.**

Enfin, le dernier objectif de cette thèse est de **comprendre l'influence des variables de charge externe et interne d'un match de rugby officiel sur l'architecture du sommeil de la nuit suivante, et d'évaluer deux stratégies permettant de l'améliorer (literie à haute conductivité thermique, cryothérapie corps entier).**

Le présent manuscrit est donc composé de trois parties.

La première partie présentera une revue de la littérature des différentes études qui ont porté sur la compréhension du sommeil et son importance dans la récupération post-exercice du sportif de haut niveau. Nous aborderons également dans cette partie les différents types et niveaux de fatigue induits par l'exercice et la place du suivi et de l'optimisation du processus de récupération.

La deuxième partie sera constituée des trois études expérimentales.

Enfin, la troisième et dernière partie sera réservée à une discussion générale aboutissant aux perspectives de ce travail.

REVUE DE LA LITTÉRATURE

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1. Le sommeil : régulation et importantes fonctions

Le sommeil et le rêve sont des phénomènes mystérieux, tellement mystérieux qu'ils sont devenus parmi les sujets favoris de la littérature, la philosophie et la science (Bear et al., 2016). Nous passons environ un tiers de notre vie à dormir. Le sommeil est reconnu aujourd'hui comme un besoin vital au même niveau que l'alimentation et la respiration. À ce jour, nous savons que le sommeil impacte directement le niveau de somnolence diurne (Bear et al., 2016). Cependant, beaucoup d'autres fonctions demeurent incomprises. Dans ce premier chapitre, nous allons définir le sommeil, ses fonctions physiologiques, ainsi que son importance pour la récupération et la performance du sportif.

1.1 La régulation du sommeil

1.1.1 *Les stades de sommeil*

Le sommeil est défini comme un état inconscient indispensable à la vie pendant lequel d'importants changements métaboliques et neurobiologiques ont lieu. Il est caractérisé par une réduction, réversible, des interactions avec l'environnement et se distingue de l'inconscience (ou du coma) par une absence d'abolition des réflexes (Le Meur et al., 2013). Durant une période de 24 heures, l'organisme alterne des phases de veille et de sommeil. La période de sommeil permet de récupérer de l'état de veille précédant et d'être en bonne forme et vigilant pour le prochain (Davenne, 2009; Halson & Juliff, 2017). Elle est caractérisée par deux principales phases : le sommeil lent (*non-rapid eye movement – NREM sleep*) et le sommeil paradoxal (*rapid eye movement – REM sleep*). Une bonne nuit de sommeil pour une personne saine est constituée d'environ 75% de sommeil lent et 25% de sommeil paradoxal, avec une périodicité cyclique entre ces états durant la nuit (Ackermann & Rasch, 2014). Chaque cycle de sommeil dure environ 90 minutes, débute généralement par du sommeil lent et fini par du sommeil paradoxal. La composition et la durée de chaque cycle évoluent au cours de la nuit avec des proportions de sommeil paradoxal plus importantes en fin de nuit (Figure 1) (Davenne, 2009; Halson & Juliff, 2017). Le sommeil lent est constitué de trois stades : le sommeil lent léger 1 (N1), le sommeil lent léger 2 (N2) et le sommeil lent profond (N3). La détection de ces stades est possible grâce à l'analyse des variations de l'activité cérébrale. Plus précisément, la fréquence et l'amplitude des signaux d'électroencéphalographie (EEG), couplés à l'électro-oculogramme (EOG) et l'électromyogramme

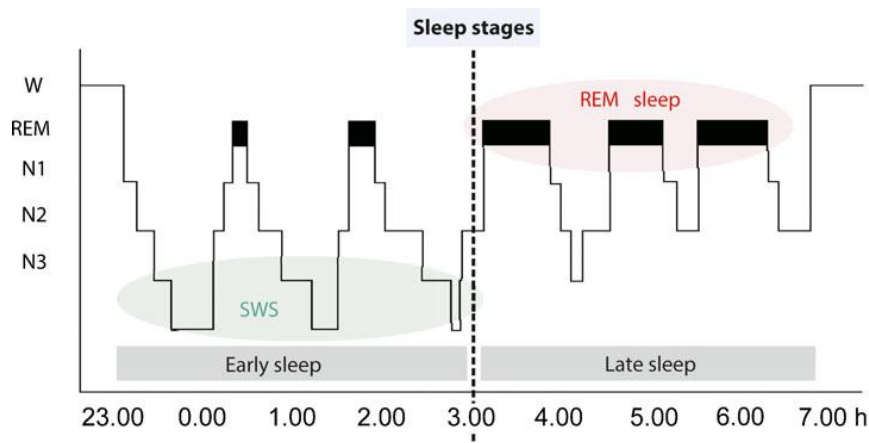


Figure 1: Hypnogramme d'une nuit de sommeil classique d'un bon dormeur. La première partie de la nuit est caractérisée par la prévalence du sommeil lent profond (SWS), alors que le sommeil paradoxal (REM) prédomine en deuxième partie de nuit (Ackermann & Rasch, 2014)

(EMG) recueillis lors d'un examen de polysomnographie, permettent de distinguer les stades de sommeil. Le N1 est le stade de transition entre l'état de veille et le sommeil pendant lequel le signal EEG est de faible amplitude et de fréquence mixte majoritairement composé d'onde thêta (Figure 2) (début de disparition du rythme alpha qui caractérise la veille calme). Le N1 est caractérisé par l'apparition de pointes vertex prédominantes en régions centrales et occipitales et par des mouvements oculaires lents. Le N1 dure souvent seulement quelques minutes pendant lesquelles la personne peut être réveillée facilement. C'est le stade de sommeil le plus léger (Bear et al., 2016). Lors du N2, le sommeil est un peu plus profond, mais la personne peut encore être réveillée par du bruit extérieur. Le signal EEG est similaire à celui du N1, mais caractérisé par l'apparition de grapho-éléments spécifiques (Figure 2) : les fuseaux (*spindles*) qui consistent en des oscillations occasionnelles à 8-14 Hz ainsi que les complexes K représentés par des ondes à haute amplitude (Ackermann & Rasch, 2014; Halson & Juliff, 2017). L'activité oculaire est similaire au stade N1.

Le troisième stade de sommeil est le sommeil lent profond (N3), ou *slow wave sleep* (SWS). Cela fait référence à l'activité EEG caractérisée par des ondes lentes delta (0.5-2Hz) ayant une grande amplitude (supérieure à 75 microvolts) (Figure 2). L'activité oculaire est proche de celle de l'EEG. Pendant le N3, l'activité métabolique du cerveau est très réduite et l'activité neuronale est synchronisée (Davenne, 2009). Durant le sommeil paradoxal, l'activité cérébrale est intense, similaire à l'état de veille, tandis que le tonus

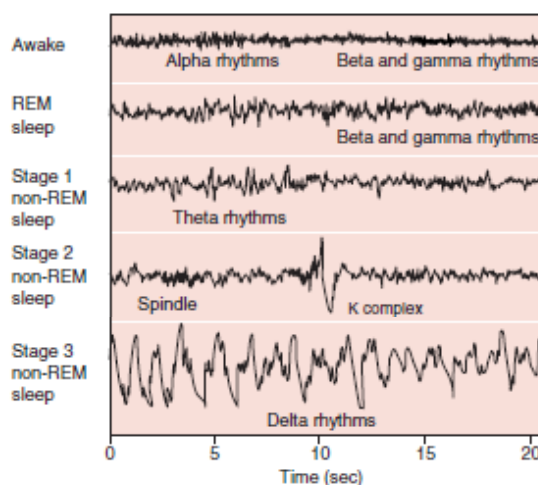


Figure 2: Activité EEG lors de chaque stade de sommeil (Bear et al., 2016)

musculaire est réduit. L'EEG est caractérisé par un rythme bêta ou gamma avec des ondes appelées « en dent de scie » (Figure 2). Le sommeil paradoxal est nommé REM (Rapid eye movement), en référence aux mouvements oculaires rapides qui le caractérisent.

Depuis les années 1950, la recherche scientifique a fait de grands progrès dans la compréhension des mécanismes neurobiologiques et régulateurs du sommeil des mammifères (Frank, 2006). Cependant, il n'existe toujours pas de réponse claire à la question « pourquoi dormons-nous ? ». Plusieurs théories ont été toutefois proposées (Shapiro & Flanigan, 1993). Les plus répandues sont la théorie restauratrice somatique et celle basée sur l'approche cognitive. La première considère que l'état de veille induit un coût nerveux et métabolique, qui est remboursé lors de la nuit de sommeil suivante (Frank, 2006). La deuxième suggère que le sommeil permet au cerveau de récupérer plus que le corps. La fonction restauratrice du sommeil serait donc d'ordre central plutôt que général (Shapiro & Flanigan, 1993). Certains auteurs ont proposé des modèles théoriques de la régulation du sommeil. Le plus reconnu à ce jour est le « two process model », développé par Alexander Borbély (1982). Le « two process model » repose sur l'interaction entre un processus homéostatique (processus S), qui dépend de la durée de veille et de la dépense énergétique au cours de la journée précédente, et un processus contrôlé par l'horloge biologique qui détermine les aspects circadiens de la régulation de sommeil (processus C). Le « processus S » représenterait une substance qui s'accumule dans le cerveau au fur et à mesure que la durée de veille se prolonge et

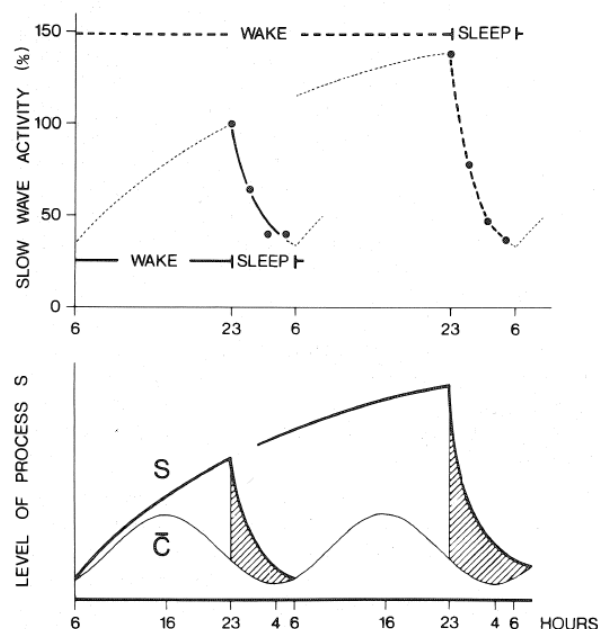


Figure 3 : Représentation graphique de la régulation du sommeil à travers le "two process model" lors d'une nuit classique et suite à une veille prolongée. Le schéma du dessus présente l'évolution du sommeil lent profond (premier cycle = 100%) lors d'une nuit classique (trait continu) et après une privation de sommeil (trait discontinu). Le schéma du dessous représente l'évolution au cours du temps des processus S et C (Borbély, 1982)

que le coût énergétique augmente (Shapiro & Flanigan, 1993). Cette substance diminuerait d'une façon exponentielle lors du sommeil (Figure 3). Le principal marqueur du « processus S » est la proportion du sommeil lent profond (N3). En effet, la proportion de N3 augmente suite à la réalisation d'une activité physique (Chennaoui et al., 2015), et pendant la nuit de récupération consécutive à une privation de sommeil (Figure 3) (Borbély, 1982). Le N3 est donc le marqueur de référence de la dette de sommeil. Par ailleurs, le « processus C », étroitement lié au « processus S », serait un témoin de la régulation circadienne. Le marqueur principal du « processus C » est le rythme de la température centrale (Borbély et al., 2016).

1.1.2 Thermorégulation et régulation autonome pendant le sommeil

Le cycle veille-sommeil est régulé sur une durée d'environ 24 heures. Il est considéré comme la fonction circadienne humaine la plus visible, l'activité étant associée aux heures de lumière du jour et le sommeil aux heures d'obscurité. Chez l'homme, les rythmes circadiens sont gouvernés par l'horloge biologique située au niveau des noyaux suprachiasmatiques (NSC) de l'hypothalamus. Ces noyaux sont directement connectés aux cellules ganglionnaires contenant de la mélanopsine, situées au niveau de la rétine, par le tractus rétinohypothalamique (Bear et al., 2016). Au crépuscule, l'horloge biologique stimule la sécrétion de la mélatonine par la glande pinéale et l'inhibe lors d'une exposition à la lumière du matin (Claustrat, 2009). La sécrétion nocturne de la mélatonine est également accompagnée d'une diminution concomitante de la température centrale (Figure 4) (Wehr et al., 2001). La relation entre le cycle veille-sommeil et l'activité thermorégulatrice joue un rôle important dans l'initiation et le maintien du sommeil (Aschoff, 1983; Kräuchi & Deboer, 2010; Okamoto-Mizuno & Mizuno, 2012; Szymusiak, 2018). Du point de vue de la thermo physiologie, le corps humain se compose de deux parties : la première partie centrale est « homéotherme » et productrice de chaleur, alors que la deuxième partie périphérique, qui enveloppe notre organisme (la peau), est « poïkilotherme ». Cette dernière est responsable de la dissipation de la chaleur à travers les échanges thermiques avec le milieu ambiant (Kräuchi & Deboer, 2010; Okamoto-Mizuno & Mizuno, 2012). La première étape du processus de thermorégulation est la détection de la variation de température (cutanée et/ou sanguine et centrale profonde) par les récepteurs centraux et périphériques.

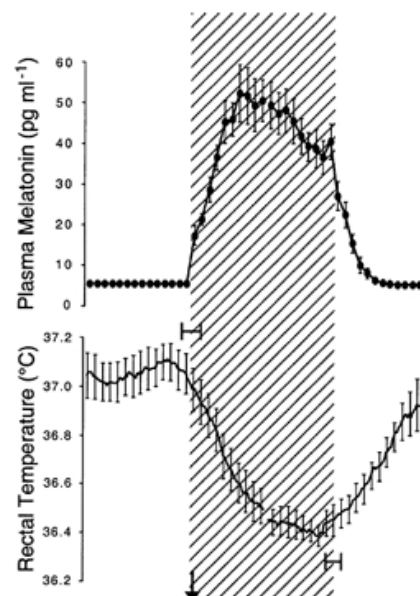


Figure 4 : Evolution simultanée du rythme de la température centrale et de la sécrétion de la mélatonine au cours de la nuit (Wehr et al., 2001)

L'information est ensuite transmise, sous forme d'influx nerveux, aux centres thermorégulateurs situés majoritairement au niveau de la région préoptique de l'hypothalamus (Romanovsky, 2018). Ces centres thermorégulateurs jouent un réel rôle de thermostat (Tan & Knight, 2018). Ils comparent l'information reçue à un seuil de référence. Étant donné que la température centrale suit des variations circadiennes au cours de la journée, le seuil est régulièrement adapté suivant le cycle veille-sommeil (Romanovsky, 2018). D'un point de vue chronobiologique, la valeur maximale de température centrale est observée en début de soirée vers 18:00 alors que la valeur minimale apparaît en fin de nuit vers 04:00 (Bear et al., 2016). La régulation circadienne du seuil de référence est assurée par la connexion entre le noyau supra chiasmatique et le noyau préoptique. D'un point de vue physiologique, la régulation de la température centrale est assurée par la modulation du flux sanguin cutané, à travers la vasoconstriction et la vasodilatation. Au cours de la nuit, la réponse thermorégulatrice engagée a pour objectif d'évacuer la chaleur afin de diminuer la température centrale. À cet effet, la sécrétion de la mélatonine au coucher s'accompagne d'une vasodilatation cutanée, plus marquée dans la région distale, qui accélère l'initiation du sommeil (Kräuchi et al., 2000; Kräuchi et al., 1998; Raymann et al., 2005). Après l'endormissement, il a été rapporté qu'une diminution plus importante de la température centrale au cours de la nuit permettait d'augmenter la proportion de sommeil lent profond et de diminuer les éveils intrasommeil (Togo et al., 2007).

Dans le cadre du sport de haut niveau, l'augmentation de la température centrale pendant la nuit est l'un des mécanismes qui pourraient expliquer la perturbation du sommeil dans certains contextes particuliers tels que la réalisation d'une compétition et/ou un entraînement en soirée (Nédélec et al., 2015a; Roberts et al., 2019b). Il paraît donc important d'optimiser l'environnement de sommeil du sportif, en assurant une meilleure dissipation de la chaleur corporelle au cours de la nuit, dans le but d'obtenir une bonne qualité de sommeil.

En plus du lien avec les mécanismes de thermorégulation, il existe également une interaction entre le sommeil et la régulation du système nerveux autonome (SNA) (Burgess et al., 2001; Uchida et al., 2012; Versace et al., 2003). Le SNA est la partie du système nerveux responsable des fonctions automatiques et vitales. Son rôle principal est donc de maintenir l'équilibre intérieur, où l'homéostasie. Le SNA innerve le coeur à travers deux branches ; la branche sympathique (SNS), dite « cardioaccélétratrice », associée à la mobilisation de l'énergie et la branche parasympathique (SNP), dite « cardiodécélétratrice », associée à la restauration de l'énergie (Thayer & Sternberg, 2006). Les deux branches sont actives simultanément en permanence, mais la dominance de l'une ou l'autre implique une régulation différente de la fréquence cardiaque. L'activité des deux branches est assurée par l'intermédiaire de neuromédiateurs adrénergiques et cholinergiques. Afin d'investiguer l'impact du SNA sur la fonction cardiovasculaire, l'analyse de variabilité de la

fréquence cardiaque (VFC) apparaît aujourd'hui comme un outil intéressant, valide et largement utilisé dans la littérature scientifique. Par définition, cette méthode se base sur l'analyse de l'intervalle de temps qui sépare deux battements de cœur consécutifs (intervalle RR). Plus précisément, l'analyse de la VFC a pour but d'investiguer des variations dans la temporalité du signal cardiaque et de les attribuer à l'une des deux branches du SNA. Le principe de base repose donc sur la différence dans le délai de réponse des voies efférentes entre le SNS et le SNP. En effet, l'effet cardiodécélérateur du SNP est efficace rapidement, en un battement, alors que le délai de réponse du SNS est de l'ordre d'une dizaine de battements (Cassirame, 2015). Il existe différentes méthodes mathématiques pour analyser la VFC à savoir l'analyse temporelle, l'analyse spectrale et l'analyse de Poincaré. Par souci de simplification, nous nous focaliserons dans nos travaux sur les deux premières méthodologies. L'analyse temporelle, définie comme l'analyse statistique de la suite temporelle des intervalles RRI, permet de calculer plusieurs paramètres dont le plus utilisé dans la littérature le Root Mean Square of Successive Differences (RMSSD). La RMSSD correspond à la racine carrée de la moyenne des différences au carré des intervalles RR successifs au sein de l'échantillon de 5min analysé. Plus simplement, c'est la moyenne des différences entre les RR adjacents. La RMSSD évalue les variations d'un intervalle RR par rapport à son suivant. Il s'agit donc de la régulation à court terme qui reflète l'activité du SNP. D'autre part, les paramètres de la VFC peuvent être également mesurés à travers une analyse spectrale, qui consiste à décomposer le périodogramme en somme de fréquences que l'on peut présenter sur un spectre de fréquences. Le spectre de fréquences est ensuite décomposé en plusieurs bandes. Les hautes fréquences (HF) correspondent à la plage de 0,15 à 0,40 Hz qui reflète des boucles de régulation à très court terme. Cette bande de fréquence correspond donc exclusivement à l'activité du SNP. Les basses fréquences (LF) représentent la plage de 0,04 à 0,15 Hz et reflètent principalement l'activité du SNS, mais également une partie de celle du SNP (Task Force, 1996)

En étudiant la relation entre le SNA et les rythmes veille-sommeil, il a été rapporté que le SNP serait influencé par l'horloge biologique étant donné que son activité augmente avant l'endormissement (Burgess et al., 2001). Le SNS, quant à lui, semble influencé par l'entrée dans le sommeil, indépendamment de l'heure de coucher, étant donné que son activité diminue seulement après l'endormissement. Durant la nuit, la régulation du SNA est différente entre les stades de sommeil. En effet, une activation plus importante du SNP est associée à un sommeil plus profond alors qu'une activation du SNS est rapportée pendant les phases d'éveils (Bonnet & Arand, 1997; Viola et al., 2004). Le sommeil paradoxal est caractérisé par des variations de la balance sympatho-vagale (Fonseca et al., 2020). La fréquence cardiaque (FC) est plus élevée pendant le sommeil paradoxal comparativement au sommeil lent (Burgess et al., 2001). Par ailleurs, il est important de noter que les efférences du SNA diffèrent entre les cycles pour un même stade de sommeil (Versace

et al., 2003). Par exemple, la fréquence cardiaque (FC) durant le NREM est significativement réduite lors du dernier cycle de sommeil comparativement au premier (Versace et al., 2003). De ce fait, l'analyse de la VFC pendant le sommeil doit prendre en compte le stade et le cycle de sommeil dans lequel la mesure est réalisée. D'une façon intéressante, la connaissance de la régulation autonome au cours de la nuit a permis récemment le développement d'algorithmes de prédiction des stades de sommeil basés sur l'analyse de la VFC couplée avec le niveau d'activité motrice (Fonseca et al., 2020; Fonseca et al., 2017; Radha et al., 2019).

1.2 L'évaluation du sommeil

L'évaluation du sommeil est possible grâce à plusieurs méthodes objectives et subjectives. Dans cette partie, nous présenterons les différentes méthodologies existantes, leurs degrés de validité, les variables qu'elles mesurent ainsi que les limites et avantages de chacune d'entre elles.

1.2.1 *Polysomnographie*

La polysomnographie (PSG) est la méthode de référence, ou « le gold standard », pour l'évaluation du sommeil. L'examen de PSG comprend l'analyse de l'activité cérébrale (EEG), oculaire (EOG), musculaire (EMG), cardiaque (ECG), la respiration, la saturation sanguine en oxygène ainsi que les mouvements (figure 5). La PSG est à ce jour le seul outil permettant d'accéder directement à l'architecture du sommeil. À travers la différence entre les rythmes cérébraux (décrits dans la section 1.1) il est possible de connaître le stade de sommeil du dormeur. L'examen de PSG est nécessaire dans un cadre médical, pour diagnostiquer la sévérité de certaines pathologies du sommeil telle que le syndrome d'apnées du sommeil, et est particulièrement intéressant dans le cadre de protocoles expérimentaux afin d'explorer l'efficacité de certaines interventions sur l'architecture du sommeil (Halsen, 2019). Cependant, cette analyse nécessite l'intervention d'un expert afin d'installer l'équipement puis de traiter les données. De plus, l'appareil utilisé est extrêmement onéreux (~ 15k€), ce qui la rend difficilement accessible. Il convient également de noter que cet examen est assez intrusif pour les sujets. Certains auteurs ont décrit que la première nuit de PSG n'est pas représentative du sommeil habituel, à cause de la gêne occasionnée par l'appareillage ; ce phénomène est appelé « *the first night effect* ». Il est décrit par une augmentation de la durée d'éveil intra sommeil et de la latence d'apparition du N3 (Agnew et al., 1966), ainsi qu'une réduction de la densité de l'activité des ondes lentes (Tamaki et al., 2014). Ces modifications ne sont plus présentes à partir de la deuxième nuit (Agnew et al., 1966). À cet effet, dans les études 2 et 3 de cette thèse, une nuit d'habituation au port de l'appareil pendant la nuit a été réalisée avant de débiter la phase expérimentale.



Figure 5: *Sujet équipé par le dispositif portable d'évaluation du sommeil par polysomnographie (Nox A1, Resmed, USA)*

1.2.2 Actimétrie

L'actimétrie est une méthode d'évaluation du sommeil qui consiste à porter une montre à la main non dominante. Le port pendant plusieurs nuits permet de mieux évaluer les cycles veille-sommeil et de diagnostiquer une éventuelle désynchronisation de l'horloge biologique. Il est important de noter que l'actimétrie ne permet en aucun cas d'évaluer l'architecture du sommeil. Cette méthode se base principalement sur l'analyse de l'activité permettant de prédire si le sujet est réveillé ou bien s'il dort lors de chaque séquence, appelée époque, afin de renseigner le degré de continuité de son sommeil. Dans nos travaux, une époque d'une minute a été choisie (Sargent et al., 2016). L'actimètre comprend un accéléromètre qui permet de rapporter la quantité de mouvement en fonction du temps. Les données brutes sont traitées automatiquement, à travers des algorithmes spécifiques suivant 4 étapes : i) filtrage des données d'accélération obtenues sur l'axe perpendiculaire à la montre (bande passante 3-11Hz) ; ii) la valeur absolue de l'accélération maximale est retenue pour chaque seconde ; iii) elle est comparée à un seuil minimal (pas de mouvements) de 0.1g approximativement ; iv) enfin, la somme des valeurs de chaque seconde nous renseigne un nombre de counts dans l'époque choisie (figure 6). Cette quantité est ensuite comparée au seuil de sensibilité choisi au préalable afin de scorer l'époque en question en « éveil » ou « sommeil ». Le choix des seuils est donc d'une grande importance afin de permettre une mesure la plus valide possible. Il existe trois seuils de sensibilité (élevé, moyen et faible) selon la capacité à favoriser le sommeil. Par exemple, un seuil de sensibilité élevé (>80 counts/minute = éveil) exige plus de mouvements pour scorer l'époque en question en « éveil », il est donc plus favorable au sommeil. Les variables de sommeil suivantes sont ensuite calculées :

- Temps passé au lit (min) : le temps entre la prise de décision de dormir (éteinte de la lumière) et le réveil.
- Temps de sommeil (min) : le temps entre l'initiation de sommeil et le réveil.

- Temps total de sommeil (min) : la somme des époques scorées éveil.
- Durée d'éveil intrasommeil (min ou %) : la somme des époques d'éveil durant le temps de sommeil.
- La latence d'endormissement (min) : le temps entre la prise de décision de dormir et l'initiation de sommeil.
- L'efficacité de sommeil (%) : le temps total de sommeil exprimé en pourcentage du temps passé au lit.
- L'indice de fragmentation : la somme du pourcentage du temps passé en mobilité (>4 counts/min) par rapport au temps de sommeil, et du pourcentage des séquences d'immobilité inférieures ou égales à 1min par rapport au nombre total des séquences d'immobilité.

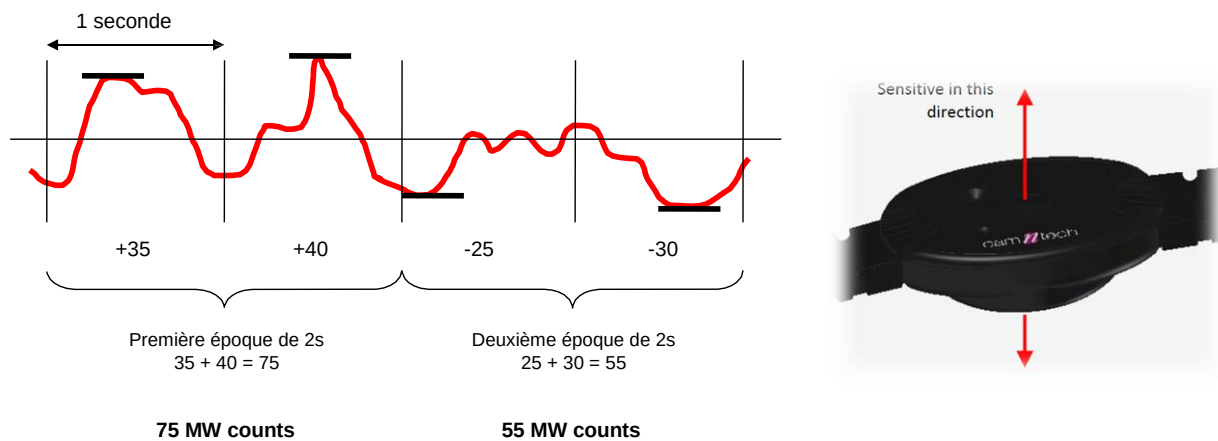


Figure 6 : *Méthode de calcul de la quantité de mouvement (nombre de counts) avec l'actimétrie*

L'actimétrie a été validée en comparaison avec la PSG dans une population de sportifs de haut niveau (Fuller et al., 2017; Sargent et al., 2016). Fuller et al. (2017) ont rapporté une meilleure précision avec le seuil moyen (>40 counts = éveil) pour des athlètes de sports collectifs. L'erreur moyenne était de 8,5 min pour le temps total de sommeil, 1,8% pour l'efficacité de sommeil et de -4,1 min pour la durée d'éveil intrasommeil. Par ailleurs, une deuxième étude a observé une meilleure concordance (90%) et sensibilité (92%) avec le seuil élevé pour des sportifs d'endurance. Par contre, ce seuil présente une moindre spécificité que les autres (faible = 82% ; moyen = 77% ; élevé = 67%). La concordance étant définie comme le pourcentage d'époques similaires entre les deux outils, la sensibilité est le pourcentage d'époques de sommeil correctement détectées (les vrais positifs) alors que la spécificité représente le pourcentage d'époques d'éveil correctement détectées (les vrais négatifs) en comparaison à la PSG. Il est donc tout à fait logique que le seuil le plus élevé de détection des éveils présente la moindre spécificité. Cette étude conclut cependant que ce seuil est le plus adapté à utiliser avec des sportifs d'endurance, au vu du niveau de concordance. Dans le cadre de nos travaux, un seuil élevé a été utilisé pour l'étude 2 et un seuil moyen pour les études 1

et 3. Nous avons fait le choix d'adopter un seuil moyen pour la première étude au vu du large spectre des sports évalués et de la nécessité de standardiser la mesure afin d'éviter un biais méthodologique lors des comparaisons entre les sports. Il est toutefois important d'être conscient que l'actimétrie sous-estime la durée de sommeil (18 à 90 min) et surestime la durée d'éveil (4 à 77min) à différents degrés selon le seuil choisi (Sargent et al., 2016). Hormis sa difficulté à détecter les périodes d'éveils, qui la rend moins efficace pour des personnes ayant un sommeil très fragmenté (Quante et al., 2015), l'actimétrie présente l'avantage d'être non-intrusive et pratique à utiliser au quotidien dans le cadre de suivi régulier des sportifs. Elle est également particulièrement intéressante pour des études de recherche ayant pour objectifs d'évaluer des variations inter et intra individuelles de la durée et la continuité de sommeil. De plus, son coût (800€ par montre) reste relativement accessible aux structures de recherche et d'accompagnement des sportifs élités. Il convient tout de même de préciser qu'une certaine expertise est nécessaire pour le traitement et l'exploitation des données (Halsen, 2019).

1.2.3 Mesures subjectives du sommeil

Les mesures subjectives du sommeil présentent l'avantage d'être facilement accessibles et peu onéreuses (Ibanez et al., 2018). Il existe plusieurs questionnaires valides dans la littérature scientifique qui permettent de renseigner différentes variables en lien avec le sommeil. En médecine du sommeil, les questionnaires sont généralement utilisés lors de la première étape de la prise en charge, afin de connaître le profil de dormeur du patient et son hygiène de sommeil. En recherche clinique, ils servent souvent comme base pour les critères d'inclusion/exclusion dans les protocoles afin de constituer une population homogène. Ils ont également une grande importance dans les études épidémiologiques lorsque l'échantillon est élevé et qu'il est plus compliqué d'intégrer des mesures objectives. La limite majeure de l'évaluation du sommeil par questionnaire est qu'elle ne permet d'accéder ni à l'architecture du sommeil ni à sa fragmentation. Étant donné que le sommeil est un processus inconscient, le sujet rapporte uniquement son ressenti lors des périodes d'éveil. Cependant, coupler des mesures subjectives et objectives permet d'avoir une réponse plus complète. Chaque questionnaire est conçu et validé pour mesurer une (des) variable(s) bien déterminée(s) en lien avec le sommeil.

The Pittsburg Sleep Quality Index (PSQI) est un questionnaire qui évalue la quantité et la qualité de sommeil lors du dernier mois (Buysse et al., 1989). Il contient 7 composantes : la qualité de sommeil, la latence d'endormissement, la durée de sommeil, l'efficacité de sommeil, l'utilisation des médicaments, et le dysfonctionnement diurne. Une note de 0 à 3 est accordée à chaque composante et leur addition renseigne un score global entre 0 et 21. Plus le score est élevé, plus mauvaise est la qualité de sommeil. Un score PSQI ≥ 5 est considéré comme un indicateur d'une

mauvaise qualité de sommeil (Drew et al., 2018; Samuels, 2008). Ce questionnaire a été utilisé dans nos trois études. Il convient toutefois de préciser que ce questionnaire est validé pour la population générale et il manque de spécificité pour le contexte sportif. Récemment, un questionnaire équivalent a été validé par une équipe canadienne pour des sportifs (Bender et al., 2018). Il s'agit du *Athlete Sleep Screening Questionnaire (ASSQ)*. Le but de ce questionnaire est de réaliser une évaluation globale du sommeil du sportif, avec un nombre réduit de questions, afin d'orienter vers une stratégie de suivi suivant les réponses à des items en particulier. Le questionnaire contient 16 items dont 5 permettent de calculer un score de difficulté de sommeil. Le score varie entre 0 et 17 et il est interprété de la manière suivante : 0-4 = pas de difficultés ; 5-7 = légères difficultés ; 8-10 = difficultés modérées ; 11-17; difficultés sévères. Le reste des items, non inclus dans le score précédemment décrit, concernent les voyages, le chronotype et les pathologies et l'hygiène du sommeil. L'utilisation de ce questionnaire n'était malheureusement pas possible dans le cadre de nos travaux étant donné que l'étude validation a été publiée après l'initiation de nos expérimentations et qu'il n'existe pas encore de validation d'une version en langue française.

The Spiegel Sleep Inventory (SSI) est un questionnaire administré au réveil permettant d'évaluer la perception de la qualité et la quantité de sommeil lors de la nuit, ou bien, au plus, les deux nuits précédentes. Le SSI est composé de 6 items scorés de 1 à 5. À l'inverse du PSQI, un score plus élevé indique une meilleure qualité et quantité de sommeil. Il n'existe à ce jour pas d'étude de validation du SSI. Cependant, il demeure un outil simple à mettre en place pour un suivi quotidien, et il est couramment utilisé dans les études scientifiques (Léger et al., 2006). Nous avons utilisé ce questionnaire lors des études 1 et 2. Lors de l'étude 3, l'évaluation subjective du sommeil au réveil s'est restreinte à l'item relatif au sommeil du questionnaire de Hooper (décrit dans les travaux expérimentaux). Nous avons fait ce choix dans le but de réduire le nombre de questionnaires à remplir par les sportifs et assurer une meilleure adhérence de ces derniers, dans des conditions écologiques de compétition.

The Ford Insomnia Response to Stress Test (FIRST) est un questionnaire permettant d'évaluer le sommeil en réponse à une situation stressante (Drake et al., 2004). Dans l'étude de Drake et al. (2004), il a été démontré que les sujets ayant des scores élevés dans le FIRST avaient un sommeil plus perturbé, lors d'une première nuit de polysomnographie au centre de sommeil. De plus, des temps d'endormissement plus long ont été rapportés lors des tests itératifs de latence d'endormissement (TILE), comparativement à des sujets ayant des scores bas. Les auteurs ont associé ces perturbations à un trait d'hyperactivité. Les sportifs expérimentent souvent des difficultés d'endormissement à l'approche ou à la suite d'une compétition importante (Erlacher et al., 2011; Juliff et al., 2014). À ce jour, il n'existe pas encore de questionnaire permettant d'identifier

spécifiquement les sportifs ayant un sommeil perturbé à l'approche d'une compétition importante, et indirectement présentant un trait d'hyperactivité. Malgré son manque de spécificité le FIRST semble encore à ce jour l'outil le plus adapté. Le FIRST contient 9 items, scorés chacun de 1 à 4. Le score global obtenu se situe entre 9 et 36, avec les scores plus élevés indiquant une plus grande vulnérabilité aux perturbations de sommeil en situation stressante. Ce questionnaire a été administré lors des trois études de cette thèse.

The insomnia sleep index (ISI) est un questionnaire permettant de quantifier la sévérité de l'insomnie perçue (Bastien et al., 2001). L'ISI consiste en sept questions, chacune notée de 0 à 4. Un score global entre 8 et 14 indique une insomnie légère et un score supérieur à 14 témoigne d'une insomnie modérée à sévère.

The Epworth sleep scale (ESS) permet d'apprécier le niveau de somnolence diurne, qui constitue un marqueur indirect des troubles de sommeil (Johns, 1991). L'ESS consiste en huit questions portant sur le risque de somnoler lors de tâches quotidiennes. Chaque question est notée de 0 à 3, parvenant à un score global allant de 0 à 24. Un score plus élevé reflète une somnolence diurne plus importante.

The Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ) permet d'évaluer subjectivement le chronotype des sujets, à travers 19 questions portant particulièrement sur le choix de réalisation d'activités bien déterminées le matin ou le soir (Horne & Ostberg, 1976). Le score obtenu permet la classification suivante : 16-41 = du soir ; 42-58 = intermédiaire ; 59-86 = du matin. Le chronotype est défini comme la rythmicité circadienne d'un individu, et peut être différent d'une personne à une autre (Vitale et al., 2015). Les individus du matin se couchent et se réveillent généralement très tôt et leur pic de performance se situe en première partie de la journée. Les individus du soir ont des horaires de coucher et de lever très tardifs et sont plus performants en deuxième partie de la journée (Horne et al., 1980). Dans des conditions neutres, les pics de température centrale et de sécrétion du cortisol sont observés environ deux heures (Baehr et al., 2000) et 55 minutes (Bailey & Heitkemper, 2001) plus tard, respectivement, pour les individus ayant un chronotype du matin comparativement à ceux du soir. D'autre part, un sommeil de moindre qualité a été rapporté pour les individus du matin suite à la réalisation d'un exercice à haute intensité en soirée comparativement aux individus du soir (Vitale et al., 2017). Il demeure donc d'une grande importance de prendre en compte le chronotype des sportifs dans la planification des entraînements et dans la gestion du processus de récupération.

The Karolinska Sleepiness Scale (KSS) est une échelle utilisée pour évaluer l'état de vigilance/somnolence à un instant donné. Le sujet répond à travers une note allant de 1 à 9

(“extrêmement vigilant” à “extrêmement somnolant et luttant contre le sommeil”) (Åkerstedt & Gillberg, 1990).

1.3 Rôle du sommeil dans la récupération post-exercice

La récupération est définie comme la cascade de processus permettant au sportif de renouveler sa capacité à réaliser, ou dépasser, le niveau de performance précédent (Skorski et al., 2019). D'autre part, la période de récupération réfère au temps nécessaire à différents paramètres physiologiques altéré par l'exercice pour retrouver les valeurs initiales (Hauswirth & Mujika, 2013). D'un point de vue temporel, il est possible de distinguer trois niveaux de récupération ; la récupération immédiate entre deux mouvements très rapprochés (*e.g.* deux foulées lors d'une course), la récupération à court terme (*e.g.* entre deux courses lors d'un travail intermittent), et la récupération à long terme entre deux séances d'entraînement (Bishop et al., 2008). Dans cette thèse, nous nous intéresserons à la récupération à long terme qui contient une (ou des) nuit(s) de sommeil dont la qualité et la quantité pourraient potentiellement influencer la période de récupération. Afin d'évaluer le rôle du sommeil dans la récupération post-exercice, différentes études ont utilisé des protocoles de privation, de restriction ou d'extension de sommeil. La privation totale de sommeil réfère à une période de veille supérieure à 24 heures alors que la restriction de sommeil suggère un temps de sommeil inférieur ou égal à 6 heures par nuit (Halsen & Juliff, 2017; Lastella et al., 2014a). L'extension de sommeil est caractérisée par une augmentation du temps passé au lit. Dans cette section, nous passerons en revue les études réalisées auprès d'une population active, et portant sur l'influence du sommeil sur la performance et les mécanismes physiologiques impliqués dans la récupération physique et cognitive.

1.3.1 Influence du manque de sommeil sur la récupération physique

De nombreuses études se sont intéressées à l'effet du manque de sommeil sur la performance, selon une grande diversité dans les protocoles ainsi qu'un large spectre de disciplines sportives et d'exercices réalisés. Nous distinguerons donc l'effet de la privation totale, de la restriction et de l'extension de sommeil sur la performance aérobie (efforts prolongés), anaérobie et la capacité de production de force (maximale et sous-maximale).

La majorité des travaux dans la littérature ont rapporté une moindre performance lors d'un effort prolongé (supérieur à 30 minutes) après une privation de sommeil de 30 à 50 heures (Azboy & Kaygisiz, 2009; Martin, 1981; Martin & Chen, 1984; Oliver et al., 2009; Temesi et al., 2013). Dans un contexte spécifique aux sports collectifs, une nuit de privation de sommeil a diminué la vitesse lors d'un exercice de répétition de sprints de 50 minutes impliquant une course maximale chaque minute (Skein et al., 2011), ainsi que lors de courses avec changements de direction (Pallesen et al., 2017). Concernant la performance anaérobie, des résultats contradictoires sont rapportés dans la

littérature. En effet, Souissi et al. (2003) ont rapporté une diminution de la puissance maximale et moyenne développée lors d'un test de Wingate après 36 heures de privation de sommeil alors qu'aucune modification de ces mêmes paramètres n'a été observée dans deux autres travaux (Symons et al., 1988; Taheri & Arabameri, 2012). Le constat est identique pour les exercices de force. Certaines études rapportent une diminution de la contraction maximale volontaire suite à une ou deux nuit(s) de privation de sommeil (Bulbulian et al., 1996; Skein et al., 2011; Takeuchi et al., 1985) alors que d'autres travaux rapportent un résultat opposé (Symons et al., 1988; Temesi et al., 2013). En conclusion, la performance lors d'exercices prolongés et de répétitions de sprints semble être affectée suite à une privation de sommeil alors que des études supplémentaires sont nécessaires pour évaluer le rôle du sommeil dans la récupération de la performance anaérobie et la capacité à produire une force maximale. Bien que l'intérêt de l'utilisation de protocole de privation totale de sommeil semble évident pour évaluer son rôle dans des conditions extrêmes, ce modèle reste éloigné d'un contexte sportif étant donné que les athlètes rencontrent très rarement des situations similaires (Kolling et al., 2019). L'utilisation de protocoles de restriction de sommeil se rapproche un peu plus de la réalité du sport de haut niveau et présente une meilleure alternative pour explorer le rôle du sommeil sur la récupération post-exercice (Knufinke et al., 2018c).

L'équipe de Mougin et al. (1991) a évalué l'effet d'une interruption du sommeil de trois heures au milieu de la nuit dans un groupe de cyclistes. Les résultats de cette étude ne montrent pas d'effet négatif sur la performance lors d'un exercice sur ergocycle de 20min à 70% de la VO_{2max} , suivi d'une augmentation de 10W/min jusqu'à épuisement. Plus récemment, la même conclusion a été rapportée pour des sportifs pratiquant du taekwondo lors d'un test d'évaluation de la performance aérobie après une restriction de sommeil en début (coucher tardif) et en fin de nuit (réveil précoce) comparé à une nuit contrôle (Mejri et al., 2014). D'autres études ont évalué l'effet de trois nuits de restriction de sommeil et ont obtenu des résultats contradictoires (Reilly & Deykin, 1983; Roberts et al., 2019a). Reilly et Deykin (1983) n'ont pas observé de diminution de performance lors d'un exercice de course à pied jusqu'à épuisement alors que Roberts et al. (2019a) ont rapporté un temps plus élevé en contre la montre après la deuxième et la troisième nuit comparativement à la condition contrôle et à la nuit de référence, respectivement. Il semblerait donc que la performance en endurance ne soit pas négativement impactée par une nuit de restriction de sommeil alors que l'effet chronique demeure encore à explorer. Par ailleurs, certaines études se sont intéressées à la performance lors d'un exercice à dominante anaérobie suite à une nuit de restriction de sommeil (Abdelmalek et al., 2013; Souissi et al., 2013; Souissi et al., 2008). La puissance maximale, et moyenne, lors d'un test de Wingate a diminué suite à une réduction du temps de sommeil à seulement quatre heures par nuit pour des étudiants en bonne santé (Souissi et al., 2008), des judokas (HajSalem et al., 2013; Souissi et al., 2013) et des footballeurs (Abdelmalek et al., 2013). D'autre

part, Reilly et Piercy (1994) ont évalué l'effet de trois nuits consécutives de restriction de sommeil (*i.e.* durée de sommeil égale à 3h par nuit) sur la capacité de production de force lors d'exercices de musculation. La force maximale en développé couché, presse à cuisse et soulevé de terre, mais pas en flexion des biceps, a diminué seulement après la deuxième nuit de restriction de sommeil. Le même résultat est observé pour la force sous-maximale, mais pour les quatre mouvements. Bien que cette altération de la performance sous-maximale pourrait être associée à une composante motivationnelle ou neurologique, les mécanismes de fatigue centrale et/ou périphérique impliqués demeurent encore inconnus. D'autres études ayant évalué la force de préhension n'ont toutefois pas observé de modification de performance suite à une nuit de restriction de sommeil (HajSalem et al., 2013; Reilly & Deykin, 1983). Plus globalement, les études précédemment décrites tendent à avancer l'hypothèse que la performance aérobie diminue après une nuit de privation totale mais ne semble pas affectée par une nuit de restriction de sommeil. Des études complémentaires sont nécessaires pour comprendre l'effet de plusieurs nuits de restriction de sommeil sur la performance aérobie. Par ailleurs, la performance anaérobie (*i.e.* puissance maximale) et la capacité de production de force sous-maximale seraient les premières à être affectées après seulement une nuit, alors que la production de force par des muscles volumineux (*e.g.* le bas du corps) diminue significativement après deux nuits de restriction de sommeil. Aucune diminution n'a été rapportée pour les petits groupes musculaires (*e.g.* force de préhension) qui nécessiteraient un temps de récupération plus court.

Du point de vue de la macroarchitecture du sommeil, il est suggéré que la phase de sommeil lent joue un rôle important dans la récupération métabolique et neuromusculaire (Dattilo et al., 2011; Skein et al., 2011). En effet, outre la réduction de l'activité métabolique qui permet une conservation des réserves énergétiques, le sommeil lent est caractérisé par l'augmentation de la sécrétion de l'hormone de croissance (Davenne, 2009; Gronfier et al., 1996; Takahashi et al., 1968). Plus précisément, le niveau de sécrétion de cette hormone est significativement corrélé à la quantité de sommeil lent profond (Gronfier et al., 1996). L'hormone de croissance est sécrétée par les glandes pituitaires situées au niveau de l'hypophyse. Comme son nom l'indique, elle est impliquée dans le processus de développement du corps humain et plus particulièrement dans la croissance et la cicatrisation du tissu musculaire (Dattilo et al., 2011). Son rôle est donc primordial pour la réparation des dommages structuraux induits par un entraînement musculaire à forte dominante excentrique ou en cas de blessure (Chennaoui et al., 2019). Les phases de NREM stimulent également la sécrétion d'hormones anaboliques, ce qui augmente la synthèse protéique et mobilise les réserves lipidiques comme source d'énergie (Obal & Krueger, 2004). Cela prévient l'instauration d'un état catabolique et permet par conséquent de maximiser les adaptations à l'entraînement et le processus de cicatrisation post-exercice (Dattilo et al., 2011; Sassin et al., 1969).

Dans une étude de Skein et al. (2013), la concentration de créatine kinase plasmatique (*i.e.* un marqueur indirect des dommages musculaires) à 16 heures après la fin d'un match de rugby était plus élevée suite une nuit blanche comparativement à une condition contrôle (~ 8h de sommeil). Une autre étude de la même équipe a rapporté une baisse des réserves de glycogène musculaire après une nuit de privation de sommeil (Skein et al., 2011). L'ensemble de ces travaux tend à expliquer qu'une seule nuit de privation de sommeil peut compromettre la récupération musculaire après l'exercice.

1.3.2 Influence du manque de sommeil sur la récupération cognitive

En plus de la composante physique, le manque de sommeil peut également avoir un effet sur les capacités cognitives et la gestion des émotions (Fullagar et al., 2015). En effet, la restriction et la privation de sommeil induisent un allongement des temps de réaction (Axelsson et al., 2008; Belenky et al., 2003; Bonnet, 1985; Jarraya et al., 2013; Roberts et al., 2019a; Taheri & Arabameri, 2012), une moindre précision dans des tâches tels que le jet de fléchettes et le service en tennis (Edwards & Waterhouse, 2009; Reyner & Horne, 2013), et une augmentation de la perception de la douleur (Haack & Mullington, 2005; Simpson et al., 2018). De plus, la plupart des études ont rapporté un niveau plus important de fatigue perçue et un sentiment de confusion accru qui coïncident avec une altération de l'humeur (Axelsson et al., 2008; Bonnet, 1985; Edwards & Waterhouse, 2009; Reilly & Piercy, 1994; Roberts et al., 2019a; Sinnerton & Reilly, 1992) suite à une ou plusieurs nuits de restriction ou de privation de sommeil. En résumé, la performance cognitive est majoritairement altérée suite à un manque de sommeil.

D'un point de vue neurobiologique, le sommeil paradoxal a été longuement décrit comme le stade de sommeil durant lequel ont lieu les rêves. Plus récemment, il a été rapporté que certains rêves peuvent avoir lieu pendant le sommeil lent, et que le sommeil paradoxal peut avoir d'autres fonctions, outre les rêves (Bear et al., 2016). La fonction la plus importante du sommeil paradoxal est la consolidation de la mémoire (Ackermann & Rasch, 2014). L'importante activité neuronale encéphalique serait à l'origine du renforcement des circuits neuronaux associés à l'apprentissage (Davenne, 2009). Certaines études se sont appuyées sur un modèle de privation du sommeil paradoxal en provoquant un réveil dès l'apparition de la première époque de ce stade. À travers ce paradigme, ils ont confirmé le rôle important du sommeil paradoxal dans la consolidation de la mémoire procédurale (Karni et al., 1994; Luo et al., 2013). Certains travaux ont également rapporté une augmentation de la proportion du sommeil paradoxal la nuit suivant un apprentissage d'exercices contenant une composante procédurale complexe (Ackermann & Rasch, 2014). L'implication de chaque stade de sommeil dans la mémorisation a été résumée dans la revue de Ackermann et Rasch (2014) à travers « *the dual process hypothesis* ». Cette hypothèse suggère un

effet positif du N3 sur la mémoire déclarative alors que le sommeil paradoxal a une importance particulière sur la mémoire non-déclarative ou procédurale. Le sommeil lent léger 2 aurait également un effet positif sur l'apprentissage d'exercices simples impliquant la mémoire procédurale (Smith & MacNeill, 1994). En plus de son effet sur la consolidation de la mémoire, le sommeil paradoxal aurait un effet sur la perception de la douleur (Moldofsky, 2001; Ohayon, 2009; Onen et al., 2001). Onen et al. (2001) ont comparé la réaction à différents signaux nociceptifs entre un groupe de rats ayant un sommeil normal et un deuxième groupe privé de sommeil paradoxal. Le groupe privé de sommeil paradoxal a montré une augmentation significative des réponses comportementales aux stimuli nociceptifs mécaniques, thermiques et électriques (Onen et al., 2001). À ce jour, les mécanismes neurophysiologiques expliquant ce lien ne sont pas encore identifiés. Cependant, le locus coeruleus et le raphé dorsal sont impliqués à la fois dans l'apparition du sommeil paradoxal et dans la diminution de la douleur (Ohayon, 2009). De plus, la privation du sommeil paradoxal induit des changements dans différents systèmes de neurotransmetteurs, dont le système sérotoninergique du raphé, impliqué dans le contrôle du sommeil et de la douleur (Ohayon, 2009). Les mécanismes impliqués dans la relation mutuelle entre la récupération musculaire (centrale et/ou périphérique), la douleur et l'architecture du sommeil (en particulier les proportions de sommeil paradoxal) restent encore à explorer.

1.3.3 *L'extension de sommeil*

Quelques travaux ont exploré la réponse de l'organisme à l'exercice suite à une extension (au lieu d'une réduction) du temps passé au lit. L'équipe de Mah (2008) a observé une amélioration de la performance en natation suite à 6-7 semaines d'extension du temps passé au lit à 10 heures, au lieu de 6-8 heures habituellement. Plus spécifiquement, le temps réalisé sur 15m a diminué de 0,51s, le temps de réaction lors du départ de 0,15s et le temps au virage de 0,10s. La même équipe a montré plus récemment une amélioration significative de la précision en tir, du sprint en navette sur 85m et du temps de réaction pour des basketteurs en utilisant le même protocole d'extension de sommeil (Mah et al., 2011). D'autre part, une amélioration de la performance lors d'un exercice prolongé sur ergocycle et une meilleure précision au service en tennis ont été rapportées suite à trois jours (Roberts et al., 2019a) et une semaine (Schwartz & Simon, 2015) d'extension de sommeil, respectivement. En plus de son effet sur la performance physique, l'extension de sommeil agit positivement sur les émotions à travers un meilleur état d'humeur et de vigueur ainsi qu'un moindre sentiment de tension et de confusion (Mah et al., 2011; Roberts et al., 2019a).

Au regard des résultats de ces études, l'extension de sommeil pourrait être une stratégie intéressante à mettre en place à l'approche d'une compétition importante. En revanche, étant donné le calendrier chargé du sportif de haut niveau évoqué auparavant, il serait difficile d'obtenir de telles quantités

de sommeil au quotidien. De plus, il n'est pas clair si les études évoquées évaluent une véritable extension de sommeil ou bien le remboursement d'une dette de sommeil existante (Nédélec et al., 2015b). À cet effet, il devient encore plus pertinent de mettre en place des stratégies permettant d'améliorer la qualité (en plus de la quantité) de sommeil dans le but d'optimiser le processus de récupération du sportif.

Dans ce premier chapitre, nous avons vu que la régulation du sommeil est assurée par l'interaction entre un processus homéostatique et un processus circadien, dont la température centrale représente le meilleur marqueur chronobiologique. Nous avons également pu constater le rôle du sommeil dans le processus de récupération physique et cognitive. En effet, le manque de sommeil génère une moindre récupération des marqueurs biochimiques des dommages musculaires et une baisse des réserves musculaires en glycogène. La puissance musculaire semble être impactée plus rapidement que la performance aérobie et la capacité de production de force maximale par un manque de sommeil. Le processus cognitif est également majoritairement altéré à travers un allongement du temps de réaction, une augmentation de la fatigue perçue et une perturbation de l'humeur. Cependant, malgré la nécessité d'utiliser un modèle de privation ou de restriction afin de comprendre le rôle du sommeil dans les processus physiologiques de la récupération, il est très rare que les sportifs se confrontent à ce type de situation extrême. Dans le chapitre suivant, nous aborderons la particularité du sommeil du sportif de haut niveau en réponse au stress physiologique et psychologique auquel cette population est confrontée et les différentes stratégies permettant de l'améliorer.

2. Le sommeil du sportif de haut niveau

Dans le premier chapitre de cette revue de la littérature, nous avons mis en avant l'importance du sommeil dans la performance et la récupération du sportif. Les études présentées ont porté principalement sur des sujets sains entraînés, mais très rarement sur des sportifs de haut-niveau. Cela s'explique principalement par la complexité d'exposer cette population à des protocoles de privation au risque de modifier leurs habitudes d'entraînement et/ou d'impacter négativement leur niveau de performance. La question à laquelle nous souhaitons répondre dans ce chapitre est : « *comment dorment les sportifs de haut niveau ?* ». Les travaux décrivant le sommeil de sportifs élités ont évolué d'une façon exponentielle lors de la dernière décennie (Figure 7) (Lastella et al., 2020a). Ceci témoigne de l'intérêt accru de la communauté scientifique à étendre les connaissances dans ce domaine. Dans une enquête réalisée par Venter (2014) auprès de 890 sportifs, il a été demandé de classer différentes stratégies de récupération par ordre de priorité. Les stratégies de récupération associées à des facteurs sociologiques, tels que la prière et les sorties entre amis, ont également été prises en compte lors de cette dernière étude. Le sommeil a été classé en premier, suivi des stratégies de régulation du flux sanguin et des activités sociales représentées par le temps passé avec les amis et la famille (Venter, 2014). Dans une deuxième enquête réalisée par Nédélec et al. (2013), l'objectif était d'évaluer les stratégies de récupération les plus utilisées par les staffs de clubs professionnels de football français. La nutrition/hydratation et le sommeil arrivent en tête et sont utilisées dans 97% et 95% des cas par les praticiens interrogés, respectivement (Nédélec et al., 2013). Ces deux enquêtes témoignent de l'importance accordée par les sportifs et leur encadrement au sommeil.

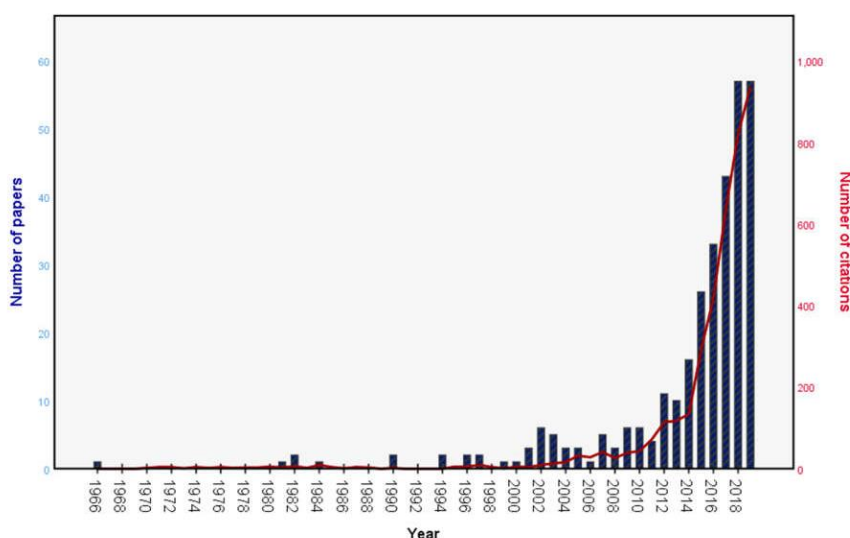


Figure 7 : Évolution du nombre de publications et citations sur le sommeil des sportifs (1966-2019)

La *National Sleep Foundation* a établi des recommandations pour la qualité (Ohayon et al., 2017) et la quantité (Hirshkowitz et al., 2015) de sommeil en fonction de l'âge. Une durée de 8 à 10 heures

de sommeil est recommandée pour les adolescents alors que 7 à 9 heures sont nécessaires aux adultes pour être en bonne santé (Figure 8). Cependant, il convient de noter que ces recommandations concernent la population générale et ne sont pas adaptées aux sportifs de haut-niveau pour les différentes catégories d'âge. En effet, au regard de l'importante activité métabolique associée aux entraînements et/ou compétitions, il semblerait qu'une durée de sommeil plus élevée soit nécessaire aux sportifs afin d'assurer une récupération plus complète (Davenne, 2009). Dans une étude de Leeder et al. (2012), le sommeil de 47 sportifs préparant les Jeux olympiques de Londres a été évalué par actimétrie. La qualité et la quantité de sommeil de ces sportifs issus de disciplines variées (canoë-kayak, plongeon, aviron, patinage de vitesse) ont été comparées à celles de 20 sujets sédentaires. Le temps passé au lit était similaire entre les deux groupes ($8:07 \pm 0:20$ vs $8:36 \pm 0:53$ h:min pour les sédentaires et les sportifs de haut-niveau, respectivement). Cependant, pour les autres variables étudiées (temps total de sommeil, latence d'endormissement, durée d'éveil intrasommeil, efficacité du sommeil), les sportifs de haut-niveau présentaient un sommeil altéré. Dans une autre étude, portant sur 107 hockeyeurs sur glace professionnels, un temps total de sommeil d'environ 7 heures a été rapporté (Tuomilehto et al., 2016). De plus, 36% des hockeyeurs interrogés ont déclaré avoir pris des médicaments pour faciliter leur endormissement au moins une fois par semaine au cours du dernier mois. Par ailleurs, dans une large cohorte de 132 sportifs préparant les Jeux olympiques de Rio en 2016, 49% d'entre eux ont été classés comme de « mauvais dormeurs », *i.e.* score ≥ 5 au questionnaire PSQI (Drew et al., 2018). Malgré la potentielle prise de conscience, rapportée par certaines enquêtes subjectives, de l'importance du rôle du sommeil dans leur récupération, les sportifs de haut niveau présentent une quantité de sommeil insuffisante par rapport aux recommandations et une qualité de sommeil altérée par rapport à la population générale. Pour les jeunes sportifs de haut-niveau, le contexte est différent de celui des adultes. L'importance d'assurer une réussite dans un double projet, *i.e.* académique et de performance, demeure un enjeu majeur. En effet, les jeunes sportifs résidants dans des centres d'excellence, tels que l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP) ou les Centres de Ressources, d'Expertise et de Performance Sportives (CREPS) en France, sont confrontés à un planning très chargé entre les séances d'entraînement, les contraintes académiques (cours et préparation des examens) ainsi que l'activité sociale (Bergeron et al., 2015). Dans une étude de Brand et al. (2010), les auteurs ont comparé le sommeil entre un groupe de jeunes footballeurs pratiquant régulièrement une activité physique intense (en moyenne 13 h d'activité physique intense par semaine) et un groupe contrôle de la même classe à l'école (en moyenne 2 h d'activité physique intense par semaine). L'analyse du sommeil par polysomnographie lors d'une seule nuit a montré un temps total de sommeil plus faible pour le groupe des footballeurs ($7:00 \pm 0:32$ vs $7:36 \pm 0:30$ h:min pour les footballeurs et le groupe contrôle, respectivement). Cependant, le groupe contrôle présentait un

temps d'éveil intrasommeil ($\sim +18\text{min}$; $p = .001$) et une latence d'endormissement ($\sim +19\text{min}$; $p = .003$) plus élevés. Malgré la meilleure continuité de sommeil rapportée dans cette étude pour le groupe de sportifs comparativement aux non-sportifs, la durée de sommeil est largement en dessous des recommandations de la National Sleep Foundation (Table 1). Ce même constat a été rapporté pour des jeunes nageurs (Gudmundsdottir, 2020), joueurs de rugby (Saidi et al., 2019), joueurs de badminton et de bowling (Suppiah et al., 2015) ainsi que des coureurs à pied et des tireurs (Suppiah et al., 2016). Dans l'une des rares études ayant obtenu plus de 8 heures de sommeil, les jeunes sportifs étaient des footballeurs en centre de formation qui n'ont pas de contraintes académiques (Whitworth-Turner et al., 2018). Dans cette dernière étude, l'heure de réveil était à $\sim 08:45$ et le début de la première séance d'entraînement était au plus tôt à 10:30.

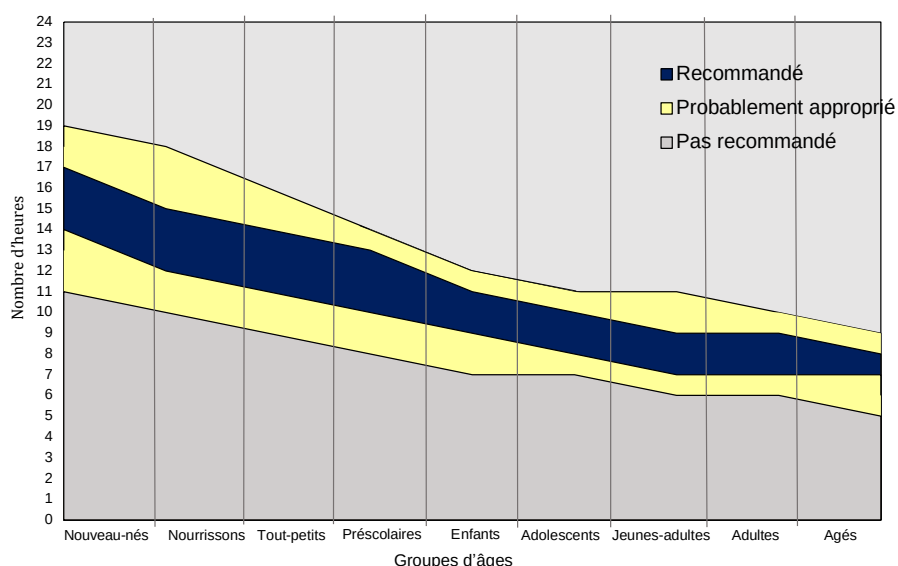


Figure 8 : *Durée de sommeil recommandée par la National Sleep Foundation en fonction de la catégorie d'âge. Modifié de Hirshkowitz et al. (2015)*

Les habitudes de sommeil peuvent également être différentes entre les hommes et les femmes. Par le moyen d'évaluations subjectives, les femmes rapportent un état d'anxiété général plus élevé et une plus grande difficulté à initier et à maintenir le sommeil (Schaal et al., 2011). Cependant, aucune différence n'a été observée entre les deux sexes lors d'une phase compétitive (Erlacher et al., 2011; Juliff et al., 2014). En utilisant l'actimétrie, Leeder et al. (2012) ont constaté que le temps passé au lit était supérieur pour les hommes alors que le sommeil des femmes était plus efficace et continu. Ces résultats contradictoires seraient principalement expliqués par la méthodologie d'évaluation (subjectif vs objectif) et la large variété des sportifs évalués dans ces études (jeunes vs élites).

En plus de sa quantité insuffisante, le sommeil des sportifs de haut-niveau se caractérise par une grande variabilité intra- (Caia et al., 2017a; Whitworth-Turner et al., 2018) et interindividuelle (Leeder et al., 2012) comparativement à un groupe de sujets sédentaires du même âge. Les stress

physiologique et/ou psychologique ont été décrits comme les principales causes de la variabilité observée dans la durée et la fragmentation du sommeil dans une population générale (Mezick et al., 2009). Des exigences physiques et cognitives souvent élevées et différentes selon le contexte dans lequel le sportif se présente (la discipline pratiquée, phase d'entraînement vs compétition, voyages) pourraient donc potentiellement contribuer à l'importante variabilité intra-individuelle constatée chez les sportifs de haut-niveau.

Table 1 : Quantité et qualité de sommeil des sportifs élités évaluées par polysomnographie, actimétrie et par questionnaires. Moyenne $\pm$ écart-type.

Étude	Sujets	Âge	Sport(s)	Temps passé au lit (h:mm)	Latence d'endormissement (min)	Temps total de sommeil (h:mm)	WASO (min)	Efficacité de sommeil (%)	Méthodologie
Fuller et al. (2017)	21 H	22.5 $\pm$ 2.7	Football Australien , rugby		16 $\pm$ 16	7:27 $\pm$ 0:46	41 $\pm$ 22	88.7 $\pm$ 4.9	Polysomnographie
Sargent et al. (2013)	10 H	15.6 $\pm$ 0.5	Football	9:18 $\pm$ 0:54	18 $\pm$ 8	8:00 $\pm$ 0:42	64 $\pm$ 39	86.0 $\pm$ 5.0	Polysomnographie
Taylor et al. (1997)	7 F	19 $\pm$ 2	Natation	7:50 $\pm$ 0:32	19 $\pm$ 4	7:31 $\pm$ 0:30	4 $\pm$ 6		Polysomnographie
Tuomilehto et al. (2016)*	23 H	25 (17-40)	Hockey sur glace	8:59	18	6:55	54		Polysomnographie
Dunican et al. (2019)	24 H	25 $\pm$ 4	Rugby	7:27 $\pm$ 0:30	13 $\pm$ 11	6:34 $\pm$ 0:32	39 $\pm$ 28	88.0 $\pm$ 6.0	Polysomnographie
Jones et al. (2019)	8F	18 $\pm$ 1	Netball	8:00 $\pm$ 0:04	25 $\pm$ 16	7:23 $\pm$ 0:22	11 $\pm$ 11	92.0 $\pm$ 5.0	Polysomnographie
Whitworth-Turner et al. (2018)	12 H	19 $\pm$ 1	Football	9:00	25 $\pm$ 9	8:06 $\pm$ 0:33	12 $\pm$ 18	93.0 $\pm$ 3.0	EEG system
Caia et al. (2017b)	7 H	24.3 $\pm$ 2.1	Rugby	8:00 $\pm$ 0:30	17 $\pm$ 8	6:54 $\pm$ 0:24		87.3 $\pm$ 3.0	Actimétrie
Caia et al. (2017a)	15 H	25.5 $\pm$ 3.7	Rugby	8:35 $\pm$ 1:02	16 $\pm$ 18	7:31 $\pm$ 0:55		87.8 $\pm$ 3.8	Actimétrie
Carriço et al. (2017)	25 H	26.3 $\pm$ 4.7	Football	7:40 $\pm$ 0:42	24 $\pm$ 9	6:36 $\pm$ 0:45	30 $\pm$ 16	85.0 $\pm$ 5.0	Actimétrie
Dunican et al. (2017)	9 H/F	18.9 $\pm$ 2.9	Judo		26 $\pm$ 36	7:25 $\pm$ 0:07	6 $\pm$ 4	89.0 $\pm$ 6.0	Actimétrie
Eagles et al. (2014)	10 H	24.3 $\pm$ 2.6	Rugby			7:41 $\pm$ 1:29		87.0 $\pm$ 2.0	Actimétrie
Gudmundsdottir (2020)	108 H/F	16.1 $\pm$ 2.6	Natation	7:38 $\pm$ 0:42		6:32 $\pm$ 0:39	64 $\pm$ 25	85.8 $\pm$ 5.0	Actimétrie
Knufinke et al. (2018b)	98 H/F	18.8 $\pm$ 3.0	Cyclisme sur route, Triathlon, VTT, Handball, Volley-ball et Football	8:32 $\pm$ 1:10	14 $\pm$ 16	7:50 $\pm$ 1:08	33 $\pm$ 17	88.5 $\pm$ 5.5	Actimétrie
Lastella et al. (2014c)	124 H/F	22.2 $\pm$ 3.0	Football Australien, Basketball, Cyclisme, Football, VTT, Marche, Rugby, Natation et Triathlon	8:24	19	6:48		86.2	Actimétrie
Lastella et al. (2014b)	21 H	19.9 $\pm$ 1.7	Cyclisme	9:12 $\pm$ 0:18	28 $\pm$ 14	7:24 $\pm$ 0:36		86.4 $\pm$ 0.4	Actimétrie
Leeder et al. (2012)	46 H/F		Canoe, Plongée, Aviron, Patinage sur piste	8:36 $\pm$ 0:53	18 $\pm$ 17	6:55 $\pm$ 0:43	77 $\pm$ 31	80.6 $\pm$ 6.4	Actimétrie
Mah et al. (2011)	11 H	19.4 $\pm$ 1.4	Basketball			6:41 $\pm$ 1:02			Actimétrie
O'Donnell et Driller (2017)	26 F	23 $\pm$ 6	Netball	9:05 $\pm$ 0:47	29 $\pm$ 16	7:16 $\pm$ 0:51		80.6 $\pm$ 6.5	Actimétrie

Pitchford et al. (2017)	19 H	22.1±3.5	Football Australien	8:17±0:32		6:59±0:26	69± 0	84.7±6.5	Actimétrie
Richmond et al. (2007)	19 H	23±2	Football Australien			8:51±0:06	42±6	92.5±1.3	Actimétrie
Robey et al. (2014)	12 H	18.5±1.4	Football		21±11	7:13±0:39	15±11	89.4±5.8	Actimétrie
Saidi et al. (2019)	20 H	15.7±1.1	Rugby	8:02±0:58	15±10	6:09±1:06	90±48	76±9	Actimétrie
Sargent et al. (2014a)**	7 H/F	22.5±1.7	Natation	7:42±0:54	41±43	5:24±1:18		70.7±15.1	Actimétrie
Sargent et al. (2014b)	70 H/F	20.3±2.9	Football Australien, Basketball, VTT, Marche, Cyclisme sur piste, Natation, Triathlon	8:18±1:18		6:30±1:24		85.6±7.2	Actimétrie
Schaal et al. (2014)	10 F	20.4±0.4	Natation synchronisée	8:32±0:13	17±2	7:13±0:11		84.7±1.3	Actimétrie
Shearer et al. (2015)	28 H	24.4±2.9	Rugby	8:49±0:49	34±40	7:04±1:01	65±39	79.0±9.2	Actimétrie
Suppiah et al. (2015)**	11 H	14.8±0.9	Bowling, Badminton	6:58	5±8	6:07±0:39	38±16		Actimétrie
Suppiah et al. (2016)**	29 H	14.7±1.3	Tir, Athlétisme (sprint)	6:45±0:29		5:28±0:33	75±23	80.9±8.6	Actimétrie
Surda et al. (2019)	20 H/F	20.7±3.4	Natation	7:18±1:18	18±13	6:36±0:12	13±12	91.0±9.2	Actimétrie
Thornton et al. (2017)	31 H	24.5±3.9	Rugby	8:16±01:13	21±19	7:17±01:07	42±17	88.1±4.2	Actimétrie
Thornton et al. (2018)	14 H	26.1±2.9	Rugby	7:29±1:21		6:55±1:14	35±16	92.3±3.0	Actimétrie
Van Ryswyk et al. (2017)	19 H	23.7±2.0	Football	8:35±0:48		7:07±0:55		82.3±6.5	Actimétrie
Miller et al. (2017)	16 H		Football Australien	8:29±1:19	18±22	6:49±1:13	70±33	85.5±5.7	Actimétrie
Miller et al. (2017)	7 H		Football	8:02±2:11	10±15	6:42±2:00	57±24	85.5±5.7	Actimétrie
Miller et al. (2017)	28 H		Rugby	8:25±1:41	9±11	7:10±1:34	56±23	88.5±4.2	Actimétrie
Dumortier et al. (2018)	26 F	15.4±3.7	Gymnastique artistique	9:44±0:42	28±12	9:03±0:46	5±5	93.0±3.7	Questionnaires
Fullagar et al. (2016a)	15 H	25.5±4.9	Football		20±17	8:32±1:11		91.6±3.7	Questionnaires
Fullagar et al. (2016b)**	16 H	25.9±7.5	Football		16±7	8:44±0:40	22±39		Questionnaires
Knufinke et al. (2018a)	98 H/F	18.8±3.0	Cyclisme sur route, Triathlon, VTT, Handball, Volley-ball, Football		20±14	8:11±0:44	13±19		Questionnaires

F: femme; M: homme; *: Pathologie du sommeil suspectée par questionnaire; **: Jours de la semaine ou jours d'entraînement

2.1. Influence du stress de l'exercice sur le sommeil du sportif

Le sommeil peut être influencé par différents facteurs, tels que le temps de veille du jour précédant, l'entraînement, la compétition, la régularité des cycles veille/sommeil, les voyages (surtout à partir de 3 fuseaux horaires traversés), l'exposition à la lumière, l'environnement de la chambre, ainsi que des facteurs comportementaux tels que l'utilisation des nouvelles technologies (Gupta et al., 2016; Halson & Juliff, 2017; Nédélec et al., 2018). Malgré la complexité de séparer l'influence des facteurs de stress liés au sport et les facteurs de stress sociaux, il est nécessaire de préciser que les deux peuvent avoir un impact sur le sommeil (Halson, 2016). Dans cette section, nous aborderons les différents facteurs de stress inhérents au contexte du sport de haut-niveau - *i.e.* la discipline pratiquée, les voyages, la charge d'entraînement et de compétition, les horaires d'entraînement - susceptibles d'expliquer le sommeil altéré et la grande variabilité intra- et interindividuelle du sommeil des sportifs.

2.1.1. Fatigue et sommeil

Dans le cadre des travaux de cette thèse, l'étude du sommeil en réponse à un stress physiologique, *i.e.* un entraînement à haute intensité ou une compétition, a impliqué d'évaluer la fatigue générée par l'exercice. Selon le type d'exercice, sa durée, son intensité et les conditions dans lesquelles il est réalisé, différents types et niveaux de fatigue peuvent être générés, et le sommeil peut être différemment influencé en conséquence (Chennaoui et al., 2004). La fatigue est en effet multifactorielle. Nous pouvons distinguer la fatigue musculaire et la fatigue cognitive qui reflètent, respectivement, un état physiologique et cognitif altéré comparativement à un état de repos. Plus globalement, la fatigue est définie comme un état résultant de contraintes physiologiques et psychologiques à l'origine d'un déclin de la performance physique et mentale (Chennaoui et al., 2004; Hausswirth & Mujika, 2013). Gandevia (2001) définit la fatigue comme « la diminution de la capacité à générer une force ou une puissance maximale suite à un exercice, et dont l'origine peut être périphérique et/ou centrale ». On distingue donc la fatigue centrale lorsque l'origine de la perte de force se situe en amont de la jonction neuromusculaire, et la fatigue périphérique lorsque l'altération se situe en aval de la jonction neuromusculaire (figure 9). Plus précisément, la fatigue périphérique témoigne d'une altération de la fonction contractile, alors que la fatigue centrale indique une diminution de la capacité du système nerveux au niveau spinal et supraspinal à assurer une commande nerveuse optimale (Enoka & Duchateau, 2016). Dans cette section, nous aborderons les différents types de fatigue, les méthodes permettant de les évaluer dans le sport de haut niveau et leur interaction avec le sommeil.

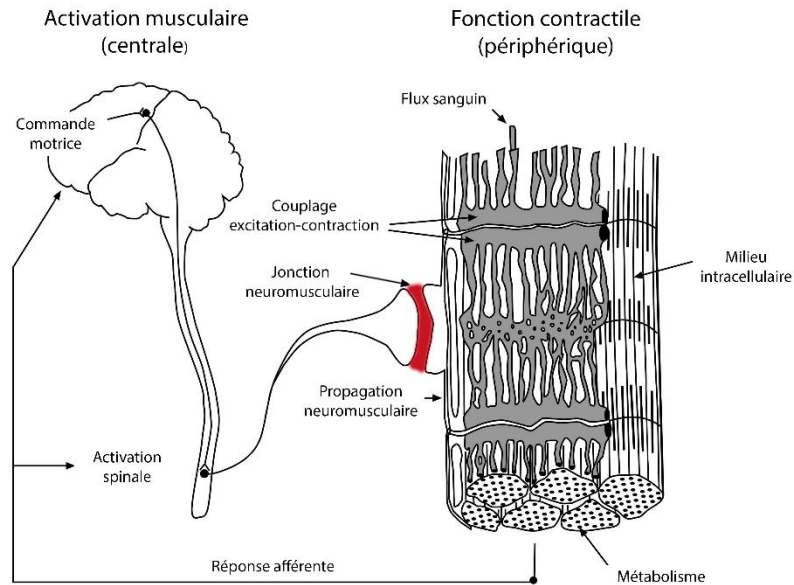


Figure 9: les mécanismes physiologiques de la fatigue sont classés en deux niveaux ; ceux qui altèrent l'activation musculaire (niveau central) et ceux qui influencent la fonction contractile (niveau périphérique). Modifié de Enoka et Duchateau (2016)

2.1.1.1. La fatigue périphérique

La fatigue périphérique se caractérise par des altérations de la mécanique du muscle, qui se manifestent au niveau de la cascade d'événements allant de la jonction neuromusculaire jusqu'à la formation des ponts actine-myosine (Allen et al., 2008). Son évaluation renseigne la défaillance de la fonction musculaire et des dommages subis par sa structure, en l'absence d'altération de la capacité du système nerveux à activer le muscle. Nous pouvons caractériser cette défaillance à trois niveaux ; i) l'excitabilité et la propagation du potentiel d'action au niveau du sarcolemme à travers la modification de l'activité des pompes Na^+/K^+ , ii) le couplage excitation-contraction à travers l'action du processus calcique au niveau des tubules transverses et iii) la fonction des ponts actine-myosine des myofibrilles (Allen et al., 2008). Ces altérations sont évaluées dans les travaux scientifiques avec l'étude des réponses mécaniques et électriques à des contractions stimulées et volontaires. Un intérêt particulier est adressé à l'évaluation de la fatigue périphérique dans cette section étant donné que les exercices réalisés dans nos travaux, *i.e.* une simulation de trail de 48min et un match de rugby, ne sont pas prolongés et n'impliqueraient pas une altération majeure de la commande centrale (Lattier et al., 2004; Millet & Lepers, 2004; Tavares et al., 2017). En effet, le niveau d'activation volontaire des extenseurs du genou a diminué de 7,6% après 30km de course à pied (Millet & Lepers, 2004) alors qu'aucune contribution des mécanismes centraux n'a été observée lorsque l'exercice durait seulement ≈ 40 min, même si ce dernier était réalisé à très haute intensité (10 x 1min à 120% VMA avec 2min de récup – pente à 18%) (Lattier et al., 2004). De plus, lors de la réalisation d'exercices intermittents, les temps de repos limiteraient l'altération de la commande nerveuse centrale (Perrey et al., 2010).

Certains travaux ont évalué les dysfonctions neuromusculaires d'origine périphérique suite à la réalisation d'une course en descente (Easthope et al., 2010; Giandolini et al., 2016). Après environ 34 min de course à pied en descente (~ -18% de dénivelé négatif), Giandolini et al. (2016) ont observé une diminution de la réponse électromyographique à une stimulation unique du nerf fémoral sur le muscle relâché, appelée « onde M ». Ce résultat témoigne d'une réduction de l'excitabilité sarcolemmale qui serait due à une augmentation de la perméabilité du sarcolemme induite par les dommages structuraux (Giandolini et al., 2016). En effet, les courses en descente impliquent des contractions excentriques des muscles du quadriceps, bien connues pour induire des dommages de la structure musculaire (Paulsen et al., 2010).

2.1.1.1.1. Les dommages musculaires

Les dommages musculaires se caractérisent principalement par des microlésions des tissus conjonctifs et des composants contractiles du muscle tels que le sarcolemme, les myofibrilles et le cytosquelette (Gandevia, 2001; Howatson & Van Someren, 2008; Paulsen et al., 2010). Ces dégradations peuvent se manifester par des déformations des stries Z, des lésions des bandes A, ainsi que des déstructurations des tubules transverses et/ou du réticulum sarcoplasmique induisant une hausse de la perméabilité de la membrane sarcolemmale (Paulsen et al., 2012). À la suite de ces dégradations structurelles, le nombre et la fonctionnalité des ponts actine-myosine sont réduits et la capacité de production de force diminue en conséquence. Plusieurs études dans la littérature ont été conduites afin d'estimer le niveau des dommages musculaires suite à la réalisation de différents types d'exercices (Hausswirth et al., 2011; Lacome et al., 2018; Paulsen et al., 2012; Takarada, 2003). Les marqueurs les plus souvent utilisés sont la capacité de production de force et/ou de puissance, la concentration sanguine en protéines myofibrillaires ainsi que la perception de la douleur musculaire (Warren et al., 1999).

En utilisant un protocole de contractions excentriques répétées lors de mouvements monoarticulaires, certains auteurs ont rapporté jusqu'à plus de 60% de diminution de la capacité de production de force (Doguet et al., 2016a; Doguet et al., 2016b). Le but de ces travaux est d'induire un niveau important de dommages musculaires afin d'étudier les conséquences physiologiques dans des conditions de laboratoire. Cependant, ils demeurent assez éloignés de la réalité du terrain. Suite à des exercices prolongés de course à pied de 30-55km, la force développée lors d'une contraction maximale volontaire des extenseurs du genou a diminué d'environ 24% (Easthope et al., 2010; Millet et al., 2003). Une diminution moyenne de 9,6% a été notée lorsque l'exercice durait moins d'une heure (Hausswirth et al., 2011). Pour un exercice de 2 heures en cyclisme, la force développée était réduite de 13%, ce qui est largement inférieur à un exercice de course à pied réalisé avec la même durée et intensité (Lepers et al., 2000). En effet, ces différences s'expliqueraient par les dommages structuraux induits par les contractions de types excentriques qui sont réduites en

cyclisme. La comparaison de différents régimes de contractions a montré une perte de force supérieure après des contractions excentriques comparativement aux contractions isométriques et concentriques (Howatson & Van Someren, 2008). Par ailleurs, les sports collectifs se caractérisent par la réalisation d'actions brèves et très intenses impliquant de nombreuses accélérations/décélérations et des changements de direction (Duthie et al., 2003; Nédélec et al., 2012). Dans le rugby par exemple, les phases de combat, telles que les collisions et les mêlées, ainsi que les sauts et les réceptions sont connus pour induire un niveau élevé de fatigue musculaire d'origine périphérique dont d'importants dommages structuraux (McLellan et al., 2011a; Takarada, 2003; Tavares et al., 2017). Après un match de rugby professionnel, la force maximale développée lors d'un CMJ réalisé sur une plateforme de force a diminué d'environ 19% trente minutes après la fin de l'exercice (McLellan et al., 2011b). En plus de la diminution de la capacité de production de force, des marqueurs biologiques ont été utilisés pour estimer l'ampleur des dommages musculaires. En effet, les dégradations de la fibre musculaire induisent la fuite de certains enzymes sarcoplasmiques au travers les structures membranaires (Kayashima et al., 1995; Paulsen et al., 2012; Warren et al., 1999). Par exemple, la créatine kinase (CK) est une enzyme dont la présence est normalement strictement réservée au milieu intracellulaire. L'augmentation de sa concentration sanguine témoigne donc de sa fuite du milieu cellulaire, et constitue un marqueur biologique indirect des dommages musculaires, largement utilisé dans la littérature scientifique (Easthope et al., 2014; Eston et al., 1995; Jones et al., 2014). Le pic de concentration sanguine en créatine kinase [CK], mesuré à 24h suite à un exercice de course à pied d'environ 16km (dont 9km en dénivelée négative - 9%), était de 400 U·L. Lorsque l'effort est plus prolongé, i.e 55 km, le pic de [CK] était d'environ 1400 U·L 24h après la fin de l'exercice (Easthope et al., 2010). La concentration atteint environ 1000 U·L 14-24h après un match de rugby de haut niveau (Cunniffe et al., 2010; Jones et al., 2014; McLellan et al., 2011b; Takarada, 2003). Le poste de jeu peut influencer la [CK] étant donné que des valeurs supérieures étaient observées pour les arrières (Jones et al., 2014). Il convient de préciser que l'utilisation de ce marqueur est également largement répandue, notamment en sports collectifs, du fait de la facilité de sa mesure. Il suffit de prélever une goutte de sang au niveau du doigt pour obtenir une mesure de terrain valide, en comparaison à une mesure standard, en très peu de temps (Horder et al., 1991). Cependant, la mesure de la [CK] a montré une faible reproductibilité que ce soit au repos (CV :16-20% ; ICC :0,4-0,5) ou en réponse à un exercice de course à pied induisant des dommages musculaires modérés (H24 ; CV :33-34% ; ICC : 0,1-0,3) (Easthope et al., 2014). De plus, une large variabilité a été rapportée dans les réponses à cette mesure (Hecksteden et al., 2017), ce qui suggère la nécessité d'interpréter avec précaution les résultats obtenus pour des groupes de sujets. L'analyse de la [CK] devrait donc être réalisée en complément d'autres paramètres, tel que le niveau de diminution de force, afin d'estimer la sévérité des dommages

musculaires (Paulsen et al., 2005; Warren et al., 1999). Il convient également de noter que la variabilité interindividuelle des réponses aux dommages musculaires s'explique en partie par une composante génétique (Baumert et al., 2016a; 2016b; Brancaccio et al., 2008).

L'évaluation du niveau des dommages musculaires est également étudiée à travers la perception des douleurs musculaires à début différé, appelée DOMS pour « *delayed onset muscle soreness* ». Les DOMS sont généralement observées 24 à 48h après l'exercice. Malgré le fait que l'apparition des DOMS est souvent présente suite à un exercice inducteur de dommages musculaires, les mécanismes physiologiques expliquant ce lien sont encore incertains à ce jour (Cheung et al., 2003; Paulsen et al., 2005; Warren et al., 1999). De la même manière que pour la concentration sanguine en CK, le niveau de DOMS serait donc un indicateur intéressant en complément à la diminution de la capacité de production de force qui demeure à ce jour le paramètre le plus pertinent.

2.1.1.1.2. Relation entre charge de travail et fatigue périphérique

Certains travaux dans la littérature ont essayé de mettre en relation des indicateurs de la charge de l'entraînement et de compétition avec des marqueurs de fatigue périphérique dans différents sports. La charge d'entraînement ou de compétition est définie comme le produit de la durée et d'un indicateur de l'intensité d'une séance. Il est possible de distinguer deux types de charges à contrôler lors d'un suivi de l'entraînement : la charge externe et la charge interne. La charge externe est définie comme le travail accompli par le sportif, mesuré indépendamment de ses caractéristiques internes (Halsen, 2014), *e.g.* maintenir une puissance donnée pendant une certaine durée en cyclisme (*i.e.* 30 min à 400 W). La charge interne est caractérisée par le stress physiologique et psychologique relatif à la charge externe imposée. Dans le rugby de haut niveau moderne, la charge externe de l'entraînement et du match est souvent suivie à travers le monitoring des activités de courses. Pour cela, les déplacements sont évalués avec le système GPS («*Global Positioning System*») et les actions de combats à travers l'analyse vidéo. Une corrélation significative a été observée entre le nombre de plaquages offensifs/défensifs, la distance parcourue à haute intensité et la [CK] 16-24 h après le match (Cunniffe et al., 2010; Jones et al., 2014; Takarada, 2003) (figure 10). En utilisant les systèmes de tracking vidéo pour l'analyse de l'activité de course, une corrélation positive a été également observée entre le nombre de sprints courts (<5m) à haute intensité et les DOMS à 24h ($r = 0,74$; $p < 0,01$) et 72h ($r = 0,57$; $p < 0,05$) après un match de football (Nédélec et al., 2014). Ces résultats suggèrent donc que le suivi des indicateurs de la charge externe permettrait de quantifier le niveau de fatigue, en particulier pour les sports collectifs.

Dans les études 2 et 3 de cette thèse, l'évaluation de la charge interne et l'estimation des dommages musculaires permettront de caractériser le niveau de fatigue induit par l'exercice et les conséquences sur l'architecture du sommeil la nuit suivante.

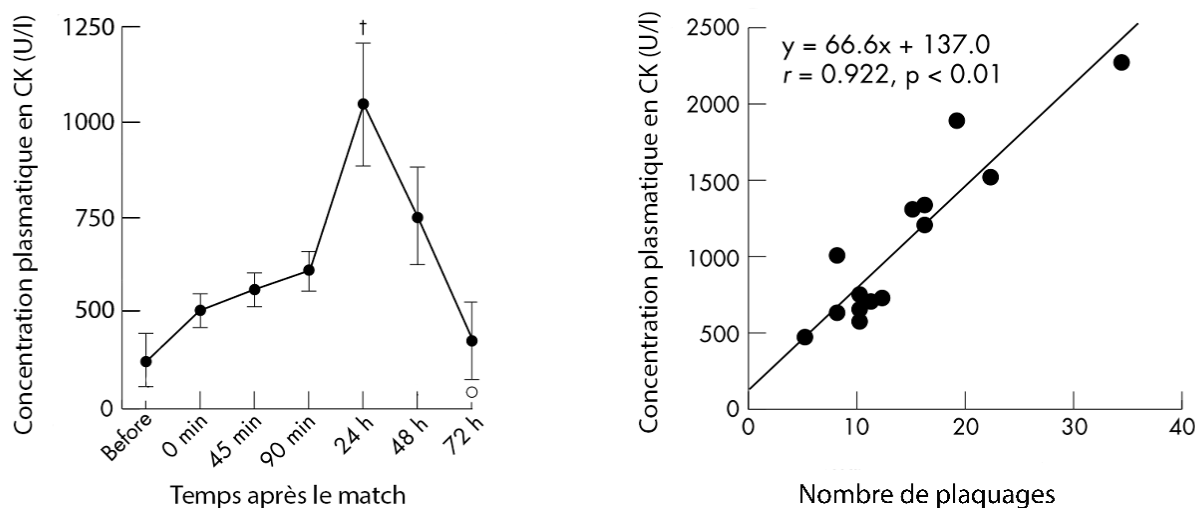


Figure 10: Concentration plasmatique en CK après un match de rugby professionnel (figure à gauche) et sa corrélation (H24) avec le nombre de plaquages offensifs/défensifs (figure à droite). Modifié de Takarada (2003).

2.1.1.2. La fatigue mentale

Dans le cadre cette thèse, les disciplines sportives ainsi que les situations contextuelles (*i.e.* entraînement vs compétition) évaluées impliquent des contraintes cognitives et physiques différentes. La spécificité de la fatigue induite par chaque discipline impliquerait potentiellement un besoin différent de sommeil. La fatigue mentale est définie comme un état psychobiologique caractérisé par une augmentation de fatigue perçue pour une tâche donnée et/ou une diminution de la performance cognitive (Smith et al., 2015b). Elle fait référence à la fatigue ressentie à la suite d'une activité cognitive prolongée. Ainsi, la réalisation d'une tâche cognitive complexe de 90 minutes diminue la performance en endurance sans modifications des réponses cardiovasculaires, comparativement à une tâche non fatigante (Marcora et al., 2009). Ces travaux suggèrent donc de considérer certains éléments contextuels potentiellement sources de fatigue mentale et susceptibles d'influencer le niveau de fatigue générale. Il serait également opportun de penser qu'une quantité de sommeil plus importante est nécessaire dans ces conditions afin d'assurer une récupération post-exercice adéquate (Davenne, 2009). En l'absence de marqueur neurophysiologique objectif permettant de mesurer directement la fatigue mentale, cette dernière est souvent évaluée à travers des questionnaires subjectifs. Le questionnaire de la National Aeronautics and Space Administration Task Load Index « NASA-TLX » (Hart & Staveland, 1988) et le Brunel Mood Scale « BRUMS » (Terry et al., 2003) sont les plus fréquemment utilisés dans la littérature scientifique afin d'évaluer la charge mentale associée à une tâche.

2.1.1.3. Les paramètres subjectifs de la fatigue

La fatigue perçue subjectivement à un instant donné est évaluée à travers des échelles remplies par le sportif. L'échelle RPE « *rating of perceived exertion* », développée par Borg (1982) est la plus utilisée en sciences du sport et contient 15 points (de 6 à 20). Une échelle de 10 points (0 à 10) a été également développée quelques années plus tard (Foster, 1998). Dans une étude de Leung et al. (2004), une corrélation positive a été observée entre la force maximale isométrique développée et le score RPE. Ce résultat suggère que cet outil est pertinent pour quantifier la fatigue musculaire. Le score RPE a été évalué pendant un exercice d'endurance en course à pied (Marcora et al., 2009) et une situation spécifique en football (Smith et al., 2015a), réalisés à la suite d'une tâche cognitive ou bien une condition contrôle. Dans les deux études, la cinétique des scores RPE pendant l'exercice était supérieure pour le groupe présentant une fatigue mentale plus importante. La RPE présente donc l'avantage d'embrasser plusieurs variables dans l'évaluation de la fatigue, ce qui rend cette méthode adaptée pour évaluer le niveau de fatigue relatif à chaque discipline (Borg, 1982). Cette échelle est également utilisée pour évaluer la perception de l'intensité de la séance (RPE-S ; *rating of perceived exertion of the session*) en tant que marqueur subjectif de la charge interne. La RPE-S consiste à multiplier la note RPE recueillie à la fin de la séance par la durée de l'exercice (Foster, 1998). Les scores de RPE-S ont montré une corrélation significative avec les méthodes objectives de quantification de la charge interne dans différents sports (Impellizzeri et al., 2004; Van Erp et al., 2019). Dans une récente revue de littérature, Saw et al. (2016) ont rapporté que les mesures subjectives étaient plus sensibles que les marqueurs objectifs pour refléter une modification aiguë ou chronique de la charge d'entraînement. Dans nos travaux, cet outil sera utilisé comme marqueur de fatigue afin de comparer la charge interne entre les sports et évaluer son effet sur le sommeil.

2.1.2. Discipline sportive et sommeil

Comme nous l'avons précédemment évoqué, des exigences physiques et cognitives différentes entre les disciplines sportives pourraient potentiellement contribuer à l'importante variabilité interindividuelle constatée chez les sportifs de haut-niveau (Mezick et al., 2009). Dans une étude de Suppiah et al. (2016), les auteurs ont comparé le sommeil entre des sports de haute intensité (*i.e.* le sprint) et des sports de faible intensité (*i.e.* le tir). Aucune différence n'a été rapportée pour les variables de sommeil évaluées avec la polysomnographie lors d'une nuit suivant un entraînement spécifique. Des résultats contradictoires ont été rapportés par la même équipe lors d'une comparaison du sommeil entre des joueurs de badminton et des joueurs de bowling (Suppiah et al., 2015). Les sportifs engagés dans les sports à plus haute intensité (*i.e.* le badminton) avaient un sommeil plus profond ($\sim +46\text{min}$; $p < .05$) et une moindre durée d'éveil intrasommeil ($\sim -3\text{min}$; $p < .05$). Le nombre réduit de sujets, surtout dans la dernière étude, et la différente charge d'entraînement pourraient expliquer ces résultats contradictoires (Nédélec et al., 2018). D'une

manière chronique, Kolling et al. (2016b) ont comparé le sommeil pendant six jours entre un groupe qui suit un entraînement de force à dominante excentrique et un deuxième engagé dans un entraînement intermittent à haute intensité. Aucune modification du sommeil n'a été observée pour le premier groupe alors qu'une moindre efficacité de sommeil a été rapportée pour le deuxième. Ces résultats suggèrent un effet plus marqué de l'entraînement intermittent à haute intensité sur la perturbation du sommeil, comparativement à un entraînement en force. Dans une autre étude, le sommeil de sportifs de haut niveau australiens issus de différentes disciplines (cyclisme sur route, VTT, natation, triathlon, football australien, basketball, football et rugby) a été évalué par actimétrie pendant au moins une semaine (entre 7 et 28 jours) lors d'une période d'entraînement (Lastella et al., 2014c). Des horaires de sommeil et d'éveil plus tardifs ainsi qu'une durée de sommeil plus faible ont été rapportés pour les sportifs pratiquant des sports individuels comparativement aux sports collectifs. D'autre part, une étude similaire a été réalisée auprès de 527 sportifs brésiliens et n'a montré aucune différence dans les quantité et qualité de sommeil, évaluées subjectivement (Brandt et al., 2017). Les différences culturelles entre les sportifs australiens et brésiliens ainsi que la différence dans la méthode d'évaluation du sommeil pourraient expliquer ces résultats contradictoires. Par ailleurs, étant donné que ces deux études ont comparé des groupes de sports, *i.e.* collectifs vs individuels, la spécificité des exigences physiologiques et cognitives propre à chaque sport n'a pas été prise en compte. À ce jour, à notre connaissance, il n'existe aucune étude dans la littérature qui propose une comparaison du sommeil entre plusieurs disciplines olympiques, présentant des exigences physiques et cognitives différentes, dans un contexte de contraintes académiques/d'entraînement standardisé, et avec une population d'âge homogène.

Certaines disciplines peuvent être davantage touchées par les troubles de sommeil que d'autres. Il a été rapporté que les sports esthétiques avaient une plus grande prévalence de troubles de sommeil, alors que ces derniers étaient particulièrement réduits dans les sports à risque, tels que les courses de moto et les sports de glisse (Schaal et al., 2011). De plus, une grande prévalence des troubles du sommeil, particulièrement de l'apnée obstructive du sommeil, a été rapportée dans les sports de contact (*e.g.* le rugby) (Dunican & Eastwood, 2017; Dunican et al., 2019). En effet, dans une équipe de 24 joueurs de rugby évalués par polysomnographie, 25% présentaient une apnée obstructive du sommeil (Dunican et al., 2019). Ce constat serait principalement lié à la morphologie particulière de ces sportifs, caractérisée par une large circonférence du cou et un pourcentage de masse grasse plus élevé, surtout pour les avants. Les voies respiratoires sont donc généralement plus étroites pour ces sportifs, ce qui les rend plus à risque de développer de l'apnée obstructive du sommeil. En plus de la prévalence de cette pathologie, les joueurs de rugby sont soumis au cours de leur pratique sportive à d'importantes collisions, pouvant avoir un impact direct sur la qualité de sommeil (Asken et al., 2016); ce qui s'expliquerait par une perturbation du fonctionnement du système

glymphatique, qui joue un rôle important pendant le sommeil. Il permet d'éliminer les déchets métaboliques au niveau de l'espace interstitiel du cerveau. Or, l'exposition récurrente aux collisions au cours des matchs provoquerait l'accumulation des déchets métaboliques (*e.g.* la bêta-amyloïde), et impacterait négativement l'architecture du sommeil (Asken et al., 2016). Cependant, à notre connaissance, il n'existe à ce jour pas d'étude évaluant l'effet du nombre de collisions au cours d'un match officiel du rugby sur la micro- et la macroarchitecture du sommeil de la nuit suivante, dans une population de sportifs de haut-niveau. L'un des enjeux de ce travail de thèse est de comprendre l'influence du nombre de collisions au cours d'un match de rugby sur l'architecture du sommeil au cours de la nuit suivante.

2.1.3. *Charge d'entraînement et sommeil*

En plus de la spécificité du stress physiologique et/ou cognitif relatif à chaque sport, le sommeil peut être impacté par la charge physique et mentale. Plusieurs études ont évalué la relation entre différents indicateurs de la charge de l'entraînement et le sommeil dans différents contextes. Dans la plupart de ces études, la charge interne était évaluée à travers la RPE-S. Lors des camps d'entraînement préparatoires, le stress physiologique est généralement élevé afin de stimuler le développement de certaines qualités physiques. Dans une étude de Lastella et al. (2020b), 11 jeunes joueuses de basketball ($17,3 \pm 0,9$ ans) ont été suivies lors d'un stage de préparation de 14 jours. Des horaires d'endormissement et de réveil plus tardifs et une durée de sommeil plus élevée ont été rapportés lors des jours de repos comparativement aux jours d'entraînement. De plus, l'efficacité de sommeil était réduite ($\sim -2,7\%$; $p < 0,05$) lors des nuits consécutives aux fortes charges d'entraînement comparativement aux faibles. De la même manière, Kolling et al. (2016a) ont évalué 55 jeunes rameurs ($17,7 \pm 0,6$ ans) lors d'un stage de préparation de 4 semaines. Une réduction du temps total de sommeil a été rapportée lors des deux premières semaines pendant lesquelles la charge d'entraînement était particulièrement élevée (jusqu'à 4 séances d'entraînement par jour). Lors des deux dernières semaines, la réduction de la fréquence des séances était accompagnée d'une augmentation du temps total de sommeil. Des résultats similaires décrivant une moindre qualité et quantité de sommeil suite à une augmentation de la charge d'entraînement ont été rapportés pour des cyclistes (Killer et al., 2017; Teng et al., 2011), des triathlonsiens (Hauswirth et al., 2014) et des joueurs de rugby (Thornton et al., 2017). Dans un contexte différent, *i.e.* 9 semaines d'entraînement classique, Dumortier et al. (2018) ont démontré que l'augmentation de la charge d'entraînement provoquait une réduction du temps total de sommeil, évalué subjectivement pour des jeunes gymnastes ($15,4 \pm 3,7$ ans). D'une façon similaire, une étude réalisée auprès de 75 jeunes joueuses de football ($15,5 \pm 1,6$ ans), pendant une saison sportive entière, a montré une corrélation négative entre la charge d'entraînement journalière et la qualité ($r = -0,40$; $p < 0,05$) et la quantité ($r = -0,39$; $p < 0,05$) de sommeil de la nuit suivante (Watson et al., 2017). Toutes les études

présentées tendent à démontrer un effet négatif de l'augmentation de la charge sur la qualité et la quantité de sommeil. Une récente méta-analyse a confirmé que la perturbation du sommeil était observée lors d'une augmentation de la charge de plus de 25% (Roberts et al., 2019b). De la même manière, Hausswirth et al. (2014) ont retrouvé un sommeil plus fragmenté pour des triathlons en surmenage fonctionnel suite à une augmentation de 30% du volume d'entraînement pendant 3 semaines. Cependant, des résultats contradictoires ont été rapportés dans d'autres travaux. Saidi et al. (2019) ont observé une meilleure qualité et quantité de sommeil (TST: +26 min, SL: -4%, WASO: -36 min, SE: +8.5%) suite à une journée comprenant deux séances, comparativement à une seule séance, d'entraînement pour 17 jeunes joueurs de rugby ($15,7 \pm 1,1$ ans). D'autre part, Thornton et al. (2018) ont montré que l'augmentation du nombre d'accélérations/décélérations, évalué par GPS, induit une meilleure efficacité de sommeil (Thornton et al., 2018). Même si la majorité des travaux tendent à montrer une moindre qualité et quantité de sommeil suite à une augmentation de la charge d'entraînement, les résultats contradictoires seraient potentiellement expliqués par la différence dans les protocoles utilisés (*e.g.* aigu vs chronique), la possibilité de temps de sommeil accordée aux sportifs, les différentes populations étudiées et/ou l'effet croisé d'autres facteurs externes pouvant impacter le sommeil. Parmi ces facteurs, l'horaire des entraînements, souvent non précisé dans ces études, pourrait être un élément influençant les rythmes veille-sommeil des sportifs.

2.1.4. Horaire de l'exercice et sommeil

En plus de la charge de l'entraînement, le sommeil du sportif peut être différemment impacté en fonction de l'horaire de la réalisation des séances (Vitale et al., 2017). Dans certains sports, tels que la natation, l'aviron ou le triathlon, les entraînements sont très régulièrement planifiés très tôt le matin. Sargent et al. (2014a) ont évalué des nageurs élités ($22,5 \pm 1,7$ ans) pendant 14 jours. Les entraînements débutaient tous les jours à 06:00. Même si les sportifs s'organisaient pour s'endormir plus tôt par rapport aux autres sports (*i.e.* $\sim 22:00$), le temps total de sommeil obtenu d'environ 5,4h était très largement en dessous des recommandations. Cette restriction de sommeil peut compromettre le processus de récupération et négativement impacter la performance (Sargent et al., 2014a). Des résultats similaires ont été observés dans d'autres études portant sur le sommeil des nageurs (Gudmundsdottir, 2020; Surda et al., 2019). Au regard de ces observations, il est important de planifier les entraînements de façon à permettre aux sportifs d'obtenir la durée de sommeil recommandée et nécessaire pour une récupération optimale (Sargent et al., 2014b). Tandis que les entraînements matinaux semblent être ancrés dans les traditions de certains sports, d'autres sportifs sont souvent soumis à des compétitions tard le soir (Carriço et al., 2017; Fullagar et al., 2016b). En effet, les contraintes économiques relatives à la retransmission à la télévision impliquent des horaires de compétitions très tardifs afin d'atteindre des taux d'audience plus élevés. Il est

aujourd'hui bien admis que les matchs réalisés en soirée retardent l'heure de coucher d'au moins 2 heures et réduisent le temps total et l'efficacité du sommeil (Table 2) (Carriço et al., 2017; Fullagar et al., 2016b; Nédélec et al., 2019). Dans une étude de Juliff et al. (2017), le sommeil des joueuses de netball élités a été comparé entre une nuit consécutive à une compétition en soirée (*i.e.* 18:00) et une journée de repos, en contrôlant l'heure d'endormissement ($\sim$ 22:30). Les résultats de cette étude témoignent d'une diminution de l'efficacité et du temps total de sommeil, ainsi que d'un réveil plus précoce (non imposé) suite au match réalisé en soirée comparativement au jour de repos. Les auteurs ont avancé l'hypothèse de l'effet du stress post-compétition pour expliquer la moindre qualité de sommeil. En effet, une corrélation négative ($r = 0.61$; $p < .01$) a été observée entre la diminution de l'efficacité de sommeil et le score obtenu dans le questionnaire du trait d'hyperactivité (Juliff et al., 2017). Malgré l'importance de ces études observationnelles pour comprendre l'impact des compétitions réalisées en soirée en situation écologique, ces dernières ne permettent pas de distinguer l'effet de l'intensité de l'exercice et l'effet des heures tardives de coucher et/ou du stress post-compétitif sur le sommeil. Forts de ce constat, certains travaux ont adopté une approche méthodologique plus contrôlée en laboratoire afin d'isoler les conséquences de l'intensité et de l'horaire de l'exercice sur le sommeil. Dans ses récentes recommandations pour une bonne hygiène de sommeil, l'*American Sleep Association* suggère de préférer les exercices à haute intensité en journée plutôt que tardivement le soir (American Sleep Association, 2020b). Cela permettrait d'éviter l'excitation proche de l'endormissement qui risque de compromettre la qualité de sommeil. Toutefois, plusieurs études portant sur une population légèrement active ou sédentaire ont montré une amélioration du sommeil après un exercice en soirée réalisé 2 à 4 h avant le coucher (Dworak et al., 2008; Flausino et al., 2012; Hayashi et al., 2014; Larsen et al., 2019; Wong et al., 2013). Les horaires de coucher dans ces dernières études n'étaient également pas très tardifs (avant 23:00). D'autres études n'ont rapporté aucune modification du sommeil (Arias et al., 2016; Bulckaert et al., 2011; Miller et al., 2020; Myllymaki et al., 2011; Myllymaki et al., 2012; O'Connor et al., 1998). À notre connaissance, seulement deux travaux dans la littérature ont retrouvé un sommeil perturbé suite à un exercice en soirée pour des sujets non entraînés (Oda & Shirakawa, 2014; Vitale et al., 2017). Dans la première, l'exercice réalisé était intense (40 min à 80% de VO_{2max}) et la fin de l'exercice était 1h avant le coucher (Oda & Shirakawa, 2014). Les auteurs ont rapporté une latence d'endormissement plus élevée (+14 min, $p < 0,05$), et une augmentation de la fréquence cardiaque au coucher (+26 bpm, $p < 0,01$) comparativement à une condition contrôle sans exercice. La deuxième étude a comparé l'effet de l'exercice en soirée (*i.e.* 20:00) entre un groupe présentant un chronotype du matin et un autre du soir (Vitale et al., 2017). Le sommeil était très perturbé (TST : -6,9% ; SE : -7,5% ; WASO : -7,5%) pour le groupe du matin comparativement au groupe du soir. Les résultats de ces études tendent à montrer que l'exercice en soirée, pour des joueurs de football

amateurs, aurait plus d'effets négatifs sur le sommeil lorsqu'il est intense et réalisé proche des horaires habituels d'endormissement du sujet, ce qui perturberait la régulation circadienne du sommeil (processus S) (Stutz et al., 2018).

Le niveau du sujet peut influencer l'effet de l'exercice en soirée sur le sommeil. En effet, les sportifs entraînés présentent une capacité du système nerveux autonome à récupérer plus rapidement et un système de thermorégulation plus efficace permettant de diminuer rapidement la température centrale à la suite d'un exercice (Robey et al., 2013; Youngstedt et al., 1997). Mais cette hypothèse a été mise à mal lors d'une récente méta-analyse (Stutz et al., 2018). Cependant, cette dernière contient seulement deux études, parmi vingt-trois, portant sur des sujets bien entraînés, ce qui rend nécessaire la réalisation de travaux supplémentaires afin de clarifier cette question. À notre connaissance, il existe à ce jour seulement quatre études dans la littérature portant sur une population de sportifs d'endurance bien entraînés (Kern et al., 1995; Ramos-Campo et al., 2019; Robey et al., 2013; Thomas et al., 2020) (Table 2). Nous nous sommes appuyé sur la classification de De Pauw et al. (2013) pour considérer les sportifs ayant un score supérieur ou égal à 3 (min-max : 1-5) comme bien entraînés. Dans l'étude de Robey et al. (2013), 11 cyclistes/triathlonsiens entraînés ($VO_{2max} : 66 \pm 8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) ont réalisé un exercice à haute intensité (15 min à 75% de la PMA puis 15 min de contre-la-montre) d'une durée d'environ 45 min à 19:00, et l'heure de coucher a été fixée à 22:30. Les résultats de cette étude n'ont montré aucune modification de l'architecture du sommeil entre la nuit post-exercice et celle suivant la condition contrôle (Robey et al., 2013). Avec une population similaire, Kern et al. (1995) ont rapporté une diminution de la proportion du REM suite à un exercice prolongé ($\sim 65\%$ de FC_{max}) d'une durée de 4h30 et débutant à 16:00 comparativement à une condition contrôlée sans exercice. Ce résultat n'est plus observé lorsque l'exercice est de plus courte durée (*i.e.* 2h30) et de plus faible intensité ($\sim 50\%$ de FC_{max}). Bien que l'heure de fin d'exercice (*i.e.* 20h30) et le temps passé au lit étaient similaires entre les conditions dans cette dernière étude, l'heure de coucher n'était malheureusement pas précisée, et non contrôlée (Kern et al., 1995). Dans une autre étude plus récente, 8 coureurs à pied entraînés ($VO_{2max} : 57 \pm 4 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) de chronotype intermédiaire ont réalisé un exercice intermittent à haute intensité (6 x 5min à 90% de la VMA) et un exercice continu d'une intensité moyenne (45% de la VMA), d'une durée de 60 minutes et débutant à 17:50 (Thomas et al., 2020). L'heure de coucher a été fixée à 22h30 et les résultats ont montré une meilleure continuité de sommeil après l'exercice à haute intensité (TST : +14,5 min; WASO : -14,8 min) et l'exercice modéré (TST : +16,7 min; WASO : -16,2 min) comparativement à la condition contrôle. Les trois dernières études suggèrent que le sommeil n'est pas perturbé suite à un exercice à haute intensité réalisé en début de soirée pour des sportifs entraînés. Ces résultats seraient expliqués par l'heure de réalisation de l'exercice dans ces trois études (*i.e.* fin au plus tard à 20h30) et l'heure de coucher assez tôt

(environ 22:30). Dans ces conditions, il est très probable que le processus circadien de la régulation du sommeil ne soit pas perturbé, comme il pourrait l'être lorsque l'exercice est réalisé plus tard (*i.e.* fin vers 22:00) et que l'heure de coucher est décalée (*i.e.* après minuit), comme c'est le cas dans beaucoup de situations dans le sport de haut niveau (Carriço et al., 2017; Nédélec et al., 2019). Ramos-Campo et al. (2019) ont comparé le sommeil à la suite d'exercices de différentes intensités ; haute intensité (7 x 3 min à 100% VMA) et intensité modérée (continu à 50% de la VMA), réalisés le matin (*i.e.* 10:00) ou le soir (*i.e.* 20:00) pour des ultra-triathlons bien entraînés (VO_{2max} : 66 ± 7 mL·kg⁻¹·min⁻¹). La durée de l'exercice était de 60 minutes dans toutes les conditions. Les résultats de cette étude montrent que, quelle que soit l'intensité, le sommeil est perturbé suite à l'exercice réalisé le soir comparativement au matin (haute intensité = WASO: -29,8 min; SE: -6,9% / intensité modérée = WASO: -27,5 min; SE: -5,0%).

Certains mécanismes physiologiques peuvent expliquer la perturbation du sommeil suite à un exercice réalisé tardivement, et à l'approche de l'heure de coucher habituelle (Nédélec et al., 2015a; Robey et al., 2013). L'une des hypothèses est que l'augmentation de la température centrale induite par l'exercice se poursuit pendant une certaine durée et interfère avec sa diminution circadienne qui accompagne l'initiation de sommeil (Kräuchi et al., 2000; Raymann et al., 2005). La difficulté à dissiper la chaleur pendant la nuit pourrait également influencer l'architecture du sommeil, surtout lors des premiers cycles. Certains travaux ont rapporté que 1 à 3 heures sont nécessaires pour retrouver des valeurs de température centrale de référence après un exercice intense (Youngstedt et al., 1997). Dans une récente méta-analyse, l'augmentation de la température centrale au coucher était corrélée à une moindre efficacité de sommeil (Stutz et al., 2018). Cependant, les études ayant rapporté la température centrale pendant la nuit suite à différents types et intensités d'exercices sont celles n'ayant pas observé de modification de l'architecture de sommeil (Flausino et al., 2012; Miller et al., 2020; Oda & Shirakawa, 2014; Robey et al., 2013). De futures études sont donc nécessaires pour comprendre la potentielle implication des mécanismes de thermorégulation dans l'altération du sommeil suite à un exercice tardif.

En plus de l'effet de la thermorégulation, l'influence potentielle de l'exercice intense sur le sommeil pourrait être expliquée par la prolongation des cinétiques de récupération du SNP (Myllymaki et al., 2011; Nédélec et al., 2015a). En effet, nous savons que l'exercice induit une hyperactivité sympathique, et que la récupération des valeurs de balance sympathovagale de repos se fait progressivement durant les 24 heures qui suivent l'exercice (Poher et al., 2004). La durée de cette période dépend principalement des caractéristiques de l'exercice (*i.e.* type, durée et intensité), du niveau du sujet et des conditions environnementales (Youngstedt et al., 1997). D'autres parts, comme nous l'avons évoqué auparavant, une moindre activation du SNS au cours de la nuit était corrélée avec une augmentation des ondes lentes, donc à un sommeil plus profond (Bonnet & Arand,

1997; Chennaoui et al., 2015). L'initiation du sommeil est également associée à une augmentation circadienne de l'activité du SNP (Burgess et al., 2001). D'après une étude de Oda et Shirakawa (2014), il existerait un seuil d'augmentation de la FC au coucher induit par l'exercice, *i.e.* >20bpm, à partir duquel la latence d'endormissement est négativement impactée. Certains travaux ont évalué l'effet de l'exercice sur la régulation autonome nocturne et ont montré une activation plus importante du SNS pendant toute la nuit, ou seulement la première partie, suite à un exercice réalisé en soirée (Myllymaki et al., 2011; Myllymaki et al., 2012; Thomas et al., 2020). A contrario, aucune différence n'a été observée dans la fréquence cardiaque au cours de la nuit lorsque les sujets étaient entraînés (Robey et al., 2013). Malgré l'augmentation de la fréquence cardiaque observée dans certaines études, ces dernières n'ont rapporté aucune modification de l'architecture du sommeil (Myllymaki et al., 2012; Thomas et al., 2020). De ce fait, la relation entre la modification de l'activité autonome induite par l'exercice et celle de l'architecture du sommeil demeure encore à étudier au regard des nombreux facteurs modérateurs.

Au vu de l'ensemble de ces travaux, il ressort une importante hétérogénéité dans les protocoles des exercices réalisés, leurs horaires par rapport à l'heure de coucher habituelle, ainsi que le niveau des sujets. La comparaison entre les études n'est pas aisée. De plus, le chronotype des sujets n'est pas précisé dans la plupart des études, pouvant expliquer certains résultats contradictoires (Vitale et al., 2017). Enfin, il convient de souligner le manque de travaux évaluant l'architecture du sommeil par polysomnographie pour des sportifs bien entraînés réalisant un exercice à des horaires tardifs. Dans le cadre de la deuxième étude de ce projet de thèse, nous avons fait le choix d'adopter une approche expérimentale contrôlée en laboratoire en matière d'individualisation de l'intensité de l'exercice, et de standardisation des horaires de l'exercice et du sommeil. Nous avons également utilisé un système de polysomnographie portable permettant d'évaluer le sommeil au domicile des sujets sans changer leur environnement. Enfin, des critères de performance ont été retenus afin de recruter des sujets bien entraînés, et l'heure de l'exercice a été fixée à 21:00 dans le but de se rapprocher au mieux du contexte du sportif élite.

Table 2 : Études portant sur l'évaluation du sommeil à la suite de la réalisation d'un exercice en soirée pour des sujets sains.

Études	Sujets	Age	Chronotype	Niveau (classification de De Pauw et al. *)	Protocole	Début d'exercice	Heure de coucher (hh :mm)	Résultats (sommeil, FC, VFC et TC)	Méthode
<i>Études observationnelles</i>									
Nédélec et al. (2019)	20 M	26±5	-	Footballeurs Professionnels	CONT : entraînements vs EX : matchs en soirée (début après 18h) - 76±29 min	EX : 18:00, 19:00 et 20:45	CONT : ~ 00:20 EX : ~ 02:20	↓ TST et ↓ TIB pour EX vs CONT	ACT
Vitale et al. (2019a)	24 M/F	26±3	-	Volleyeurs professionnels	PRE-match (J-1) vs match (J0) vs POST-match (J+1)	20:00	-	↓ TST, ↓ SE, ↑ WASO, ↑ SOL ↑ FI pour J0 vs J-1 et J+1	ACT
Juliff et al. (2017)	12 F	19±1	-	Joueuses de Netball élites	CONT : jour de repos vs EX : match en soirée – 45 à 60min	18:00	CONT : ~ 22:30 EX : ~ 22:30	↓ SE et ↓ TST (réveil précoce non imposé) pour EX vs CONT	ACT
Fullagar et al. (2016b)	16 H	26±8	-	Footballeurs Professionnels	CONT : entraînements vs EX _{aprem} : match l'après-midi vs EX _{soir} : matchs en soirée - +60 min	EX _{aprem} : < 18:00 EX _{soir} : > 18:00	CONT : 23:19 EX _{aprem} : 00:18 EX _{soir} : 03:27	↓ TST pour EX _{soir} vs CONT et EX _{aprem} ↑ SOL pour EX _{soir} vs CONT	SUB
Carriço et al. (2017)	25 H	26±4	-	Footballeurs Professionnels	CONT : entraînements vs EX _{aprem} : match l'après-midi vs EX _{soir} : matchs en soirée	CONT: 09:30–12 :30 EX _{aprem} : < 18:00 EX _{soir} : > 18:00	CONT : 00:14 EX _{aprem} : 02:16 EX _{soir} : 02:17	↓ TST pour EX _{soir} vs CONT et EX _{aprem}	ACT
<i>Études contrôlées</i>									
Robey et al. (2013)	11 M	26±4	-	VO _{2max} : 66±8 mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ (4)	CONT vs EX (High - 75-90% PMA) - sur ergocycle – 45 min	~ 19:00	~ 22:30	φ Sommeil, φ FC et φ TC	PSG
Kern et al. (1995)	10 M	20 à 26	-	-	CONT vs Low (40km en 2h30) vs Mod (120-150km en 4h30) - sur ergocycle	18:00 vs 16:00 (fin à 20:30 pour les deux)	23:00	↓ REM pour Mod vs Low et CONT	PSG
Ramos-Campo et al. (2019)	14 M	27±7	Intermédiaire	VO _{2max} : 66±7 mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ (4)	Matin _{10h} (M) vs Soir _{20h} (S) - High (7x3min à 100% VO _{2max}) vs Mod (60% VO _{2max}) – course à pied – 60 min	10:00 vs 20:00	-	↓ SE, WASO et ↑ nombre d'éveils pour S vs M (quelque-soit l'intensité) autres combinaisons intensités/horaires φ FC et φ VFC	ACT
Thomas et al. (2020)	8 M	28±7	Intermédiaire	VO _{2max} : 57±4 mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹ (3)	CONT vs High (6x5min à 90% VO _{2max}) vs Low (45% VO _{2max}) – course à pied – 60 min	17:50	22:30	↑ TST et ↓ WASO pour High et Low vs CONT ↑ FC et φ VFC	PSG
Vitale et al. (2017)	23 M	22±3	12 du matin (M) 11 du soir (S)	> 6h/semaine d'activité physique	Ex matin _{8h} vs EXsoir _{20h} – M vs S Course à pied (intermittent) – 38min	8:00 vs 20:00	-	↓ TST, ↓ SE, ↑ WASO pour M vs S pour l'exercice le soir	ACT
Miller et al. (2020)	12 M	22±3	-	> 3 entraînements/jour	CONT vs Aérobic (75% FCmax sur ergocycle) vs Force (75% - 10RM) – 30/40 min	20:45	23:00	φ Sommeil φ TC	PSG
Arias et al. (2016)	9 M	18-38	-	> 3 entraînements/jour	CONT vs High _{17h} vs High _{21h} (course à pied 20m – vitesse incrémentale) – jusqu'à épuisement	17:00 vs 21:00	-	φ Sommeil ↑ FC au coucher pour High _{17h} et High _{21h} vs CONT	ACT

Myllymaki et al. (2011)	11 M/F	26±3	-	VO _{2max} : 54±8 mL·kg ⁻¹ min ⁻¹ (2)	CONT vs EX (Test incrémental jusqu'à épuisement) - sur ergocycle – 35 min	~ 21:00	~ 23:45	↑ NREM pour EX vs CONT ↑ FC en début de nuit pour EX vs CONT, φ VFC	PSG
Myllymaki et al. (2012)	14 M	36±4	-	VO _{2max} : 49±4 mL·kg ⁻¹ min ⁻¹ (2)	1/ CONT vs High (75% VO _{2max}) vs Mod (60% VO _{2max}) vs Low (45% VO _{2max}) – 30 min 2/ CONT vs 30min vs 60min vs 90 min – course à pied Mod (60% VO _{2max})	18:00	~ 23:30	φ Sommeil ↑ FC pour les conditions plus intenses vs CONT ↓ VFC pour High vs CONT	ACT
Flausino et al. (2012)	18 M	27±4	-	VO _{2max} : 46 mL·kg ⁻¹ min ⁻¹ (2)	CONT Low 30min vs Low 60min vs Mod 30min vs Mod 60min – course à pied	-	20:00 – 20:30	↑ SE et ↓WASO pour tout vs CONT φ TC pendant le sommeil	PSG
Oda et Shirakawa (2014)	12 M	20±1	-	VO _{2max} : 43 à 56 mL·kg ⁻¹ min ⁻¹ (1 à 2)	CONT vs High (80% VO _{2max}) vs Mod (60% VO _{2max}) - course à pied – 40 min	21:20	~ 23:30	↑ SOL pour High vs CONT ↑ FC et ↓VFC au coucher pour High vs CONT φ TC pendant le sommeil	PSG
O'Connor et al. (1998)	8 M	21±2	-	VO _{2max} : 43 mL·kg ⁻¹ min ⁻¹ (1)	CONT vs Mod (60%) vs Low (sans résistance) – sur ergocycle – 60 min	~ 22:30	~ 00:00	φ Sommeil ↑TC pour Mod vs CONT et Mod vs Low	SAD
Bulckaert et al. (2011)	9 M/F	23±3	-	-	CONT vs EX (65 à 70% FC _{max}) - sur ergocycle – 60 min	~ 21:00	22:30 – 23:30	φ Sommeil ↑ VFC et LF/HF pendant SWS1 et SWS2 pour EX vs CONT	PSG
Hayashi et al. (2014)	9 M	23±2	-	DE estimée: 121±86 Kcal/jour	CONT vs High (80%) vs Mod (65%) vs Low (50%) – course à pied – 30 min	3h avant l'heure de coucher habituelle	-	↓ SOL pour High et Mod vs CONT ↑N3 pour Mod vs CONT	PSG
Dworak et al. (2008)	11 M	13±1	-	-	CONT vs High (90%) vs Mod (70%) - sur ergocycle – 30 min	17:00	20:30 – 21:30	↑ N3, ↓ N2, ↑ SE, ↓ SOL pour High vs CONT	PSG
Wong et al. (2013)	12 M/F	25±4	-	VO _{2max} : 35±9 mL·kg ⁻¹ min ⁻¹ (1)	CONT vs 45% vs 55% vs 65% vs 75% (de VO _{2max}) – course à pied – 40 min	~ 17:30	~ 23:30	↑N3 pour 65% et 75% vs CONT	PSG
Larsen et al. (2019)	11 M	49±5	-	VO _{2max} : 34 mL·kg ⁻¹ min ⁻¹ (1)	CONT vs Matin (6h) vs Aprem (14h) vs Soir (19h) – répétitions de sprints sur ergocycle – 30 min	6:00 vs 14:00 vs 19:00	-	↑N3 pour Matin vs CONT ↑NREM et ↓REM pour Soir vs CONT	PSG

CONT : condition contrôle sans exercice ; EX : condition exercice ; PSG : polysomnographie ; ACT : actimétrie ; SUB : évaluation subjective ; SAD : « sleep assessment device » outil positionné à côté du dormeur permettant d'évaluer les horaires de sommeil à travers l'interaction avec des bips sonores ; TST : temps total de sommeil ; TIB : temps passé au lit ; SE : efficacité de sommeil ; WASO : durée d'éveil intrasommeil ; SOL : la latence d'endormissement ; FI : l'indice de fragmentation ; VO_{2max} : la consommation maximale d'oxygène ; PMA : la puissance maximale aérobie développée sur ergocycle ; VMA : la vitesse maximale aérobie développée sur tapis roulant ; FC : la fréquence cardiaque ; VFC : la variabilité de la fréquence cardiaque ; TC : la température centrale ; High : condition exercice réalisé à haute intensité ; Mod : condition exercice réalisé à intensité modérée ; Low : condition exercice réalisé à faible intensité ; * Classification de De Pauw et al. (2013) des niveaux de performance en sciences du sport (1 à 5) pour les sports d'endurance.

2.1.5. *Le sommeil en période compétitive*

La plupart des études rapportent un sommeil particulièrement altéré pendant la période compétitive. Dans une équipe de hockeyeurs sur glace professionnels, un sportif sur six déclare consommer des somnifères en période d'entraînement alors que ce ratio double en période compétitive (Tuomilehto et al., 2016). D'un point de vue subjectif, une moindre qualité de sommeil perçue a été rapportée en période de préparation de présaison comparativement à la saison régulière pour des jeunes footballeurs élités (Noon et al., 2015). Dans des études réalisées en aigu, il est possible de distinguer la nuit de veille et la nuit consécutive à une compétition. En évaluant le sommeil subjectivement par questionnaire, la majorité des travaux rapportent un sommeil perturbé la veille d'une compétition (Ehrlenspiel et al., 2018; Erlacher et al., 2011; Juliff et al., 2014), alors que les données objectives montrent des résultats contradictoires (Lastella et al., 2014b; Richmond et al., 2007). Toutefois, la rumination, la nervosité, le stress et l'inquiétude à l'approche de l'endormissement sont les principaux facteurs responsables de la perturbation du sommeil avant une compétition (Gupta et al., 2016). La difficulté à initier le sommeil serait également largement associée au trait de personnalité du sportif (Ehrlenspiel et al., 2018; Erlacher et al., 2011; Juliff et al., 2014). En effet, les athlètes participant à des sports esthétiques particulièrement concernés par l'image corporelle et le perfectionnisme sont ceux qui présentent le plus de difficultés à initier le sommeil, et plus globalement plus d'anxiété (Schaal et al., 2011). Il apparaît nécessaire de proposer des programmes individualisés de préparation mentale afin d'accompagner les sportifs en difficulté à mieux contrôler leurs émotions à l'approche d'une compétition. Ceci est d'autant plus vrai au regard des résultats de deux études qui ont montré que les sportifs les mieux classés avaient la meilleure qualité et quantité de sommeil pendant des tournois de netball (Juliff et al., 2018a) et de natation (Chennaoui et al., 2016). Par ailleurs, bien que les hommes présentent une moindre efficacité de sommeil en période d'entraînement (Leeder et al., 2012), les femmes semblent être plus sensibles à la perturbation du sommeil à la veille d'une compétition (Erlacher et al., 2011; Schaal et al., 2011). Erlacher et al. (2011) ont rapporté que la fréquence de perturbation précompétitive du sommeil était plus marquée dans les sports individuels (69%) que dans les sports collectifs (60%). Aucune différence entre les sports n'a cependant été retrouvée dans une autre étude réalisée par une équipe australienne (Juliff et al., 2014). La particularité des sports collectifs réside dans la densité du calendrier compétitif (McLean et al., 2010; Nédélec et al., 2012; Tavares et al., 2017). Les matchs ont lieu toutes les semaines, voire deux fois par semaine dans certains sports (*e.g.* le football). Dans ces conditions, un intérêt particulier est accordé à la gestion du sommeil d'après-match afin de raccourcir au maximum la période de récupération (McLellan et al., 2011b; Roberts et al., 2019b). En comparaison à une nuit consécutive à un entraînement, un temps de sommeil plus court et une moindre efficacité de sommeil ont été rapportés après un match de rugby (Dunican et al., 2018;

Eagles et al., 2014; Shearer et al., 2015) et de netball (Juliff et al., 2018b; O'Donnell et al., 2018). Les mécanismes responsables de la perturbation du sommeil après une compétition sont à la fois physiologiques et cognitifs (Gupta et al., 2016; Roberts et al., 2019b). D'un point de vue physiologique, l'élévation du cortisol sanguin (Juliff et al., 2018b), l'hyperactivité sympathique (Chennaoui et al., 2016), l'augmentation de la température centrale (Nédélec et al., 2015a) ainsi que la perception de la douleur (Hainline et al., 2017) peuvent être à l'origine de la perturbation du sommeil. Par ailleurs, d'un point de vue cognitif, la moindre qualité de sommeil pourrait être principalement expliquée par deux processus à savoir; i) « une excitation cognitive », définie par l'engagement incontrôlable dans une activité cognitive à l'origine de l'activation de différentes fonctions physiologiques, *i.e.* autonome, corticale ou métabolique, qui interfèrent avec la nécessité de lâcher prise, indispensable pour l'initiation de sommeil et ii) « un biais attentionnel », caractérisé par la tendance excessive à se focaliser, ou la difficulté de se détacher d'un problème de sommeil (Gupta et al., 2016). Toutes les études présentées témoignent de la nécessité de proposer des stratégies efficaces pour améliorer la qualité du sommeil d'après-match, et par conséquent la récupération, en agissant sur les mécanismes physiologiques et cognitifs impliqués dans sa perturbation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu que le sommeil des sportifs est de moindre quantité et qualité en comparaison à la population générale, et par rapport aux recommandations de la *National Sleep Foundation*. Ce dernier se caractérise également par une importante variabilité inter et intra individuelle. Certains facteurs inhérents à la pratique du sport de haut niveau pourraient expliquer ces observations, tels que la charge de l'entraînement et le niveau, et type, de fatigue associée, les horaires de l'exercice, ainsi que les phases de compétition. En effet, certaines études observationnelles ont rapporté une moindre quantité et qualité de sommeil suite à la réalisation d'une compétition tard le soir. Cependant, il manque à ce jour de travaux plus contrôlés en laboratoire évaluant le sommeil de sportifs bien entraînés par polysomnographie suite à la réalisation d'un exercice à haute intensité en soirée, et les quelques études qui existent rapportent des résultats contradictoires. Cela revient principalement aux différences dans les protocoles utilisés. Certains mécanismes physiologiques ont été proposés pour expliquer la potentielle perturbation du sommeil suite à la réalisation d'un exercice intense proche du coucher tels que la thermorégulation et la régulation autonome. D'autre part, il a été également rapporté que les sportifs présentaient un sommeil perturbé la nuit suivant une compétition comparativement à un entraînement, surtout dans les sports collectifs. Dans le prochain chapitre, nous évoquerons certaines stratégies ayant pour but d'améliorer la récupération et le sommeil.

3. Stratégies d'amélioration de la qualité de sommeil

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, chaque séance d'entraînement ou compétition induit un stress physiologique qui perturbe l'homéostasie de l'organisme (Ihsan et al., 2016; Skorski et al., 2019). En réponse à ce stress, l'organisme déclenche des réactions adaptatives. La majorité des adaptations à l'exercice se déroulent pendant le sommeil (Dattilo et al., 2011). Nous faisons donc l'hypothèse générale que l'optimisation de la quantité et de la qualité de sommeil des sportifs de haut niveau permettrait une amélioration de leur performance, via une récupération plus rapide de manière aiguë (suite à un entraînement, une compétition) et/ou chronique (enchaînement de séances d'entraînement). De nos jours, plusieurs stratégies de récupération existent (Nédélec et al., 2013; Tavares et al., 2017). En plus des stratégies nutritionnelles et hydriques, les techniques les plus utilisées sont la récupération active, l'hydrothérapie, les étirements, les massages, les expositions thermiques, l'électrostimulation et les bas de contention (Nédélec et al., 2013). En s'appuyant sur la relation entre le sommeil et la thermorégulation (section 1.1.2), nous nous intéresserons particulièrement dans cette section à l'effet des techniques d'exposition thermique sur la qualité du sommeil ainsi que sur la récupération post-exercice. Nous distinguerons les stratégies réalisées en aigu avant l'endormissement des interventions sur l'environnement de sommeil appliquées en continu au cours de la nuit.

3.1.1. *La cryothérapie corps entier*

Depuis plusieurs années, l'exposition au froid constitue l'une des stratégies les plus utilisées pour améliorer la récupération à la suite d'un exercice de haute intensité (Ihsan et al., 2016; Lombardi et al., 2017). Plusieurs techniques de refroidissement existent tels que l'immersion en eau froide, les applications locales (*i.e.* poches de glaces, les systèmes de cryo-compression, air froid pulsé, vestes réfrigérées) ainsi que des technologies plus récentes tel que la cryothérapie corps entier. Le principe de l'utilisation du froid est similaire quelle que soit la technique utilisée, alors que la réponse thermo-physiologique diffère selon la durée de l'exposition, la surface de contact et le matériau de refroidissement ; sa température ainsi que sa conductivité thermique (Bleakley et al., 2014; Hausswirth, 2010). L'application du froid déclenche les réponses thermophysiologiques ayant pour but de protéger le corps contre l'agression thermique. En effet, la détection de la variation de température par les récepteurs thermo-cutanés induit une vasoconstriction périphérique et une redistribution du sang vers les cavités centrales, afin de protéger en priorité les organes vitaux (Ihsan et al., 2016; Lombardi et al., 2017). De ce fait, la température cutanée diminue en premier, et lorsque le traitement est intense et/ou prolongé, et que la conductivité thermique du matériau utilisé est élevée, la température centrale baisse en conséquence à l'incapacité de l'organisme à produire de la chaleur permettant de la maintenir. Dans le cadre de la récupération post-exercice, l'effet recherché préférentiellement est la vasoconstriction cutanée qui permet de limiter la perméabilité

des membranes et de diminuer le processus inflammatoire et la douleur musculaire (Bailey et al., 2007).

En s'appuyant sur ce principe, l'utilisation de la cryothérapie corps entier (CCE) s'est répandue dans le sport de haut niveau dans le but d'améliorer la récupération post-exercice en limitant le processus inflammatoire et les douleurs musculaires. Cependant, certains travaux ont rapporté une meilleure efficacité de l'immersion en froide dans la récupération neuromusculaire (Abaidia et al., 2017). Lors d'une séance de CCE, le sujet est exposé à un air très froid ($\sim -110^{\circ}\text{C}$) dans une chambre spécifique pendant environ 3 minutes. Malgré le prix onéreux de ce dispositif, la CCE est de plus en plus populaire, et plusieurs centres d'excellence sportive en sont équipés de nos jours. Les premiers travaux sur la CCE ont été réalisés dans les années 1980 par une équipe japonaise et ont montré son efficacité pour traiter, ou du moins alléger les symptômes des pathologies rhumatismales telle que la polyarthrite rhumatoïde (Banfi et al., 2010; Metzger et al., 2000; Yamauchi, 1989). Quelques années plus tard, la CCE a été utilisée en médecine du sport dans le cadre de programmes de rééducation suivant une ligamentoplastie du genou (Barbiche, 2006). Un groupe de patients réalisant une séance quotidienne de CCE a été comparé à un groupe recevant le même programme de rééducation sans exposition à la CCE pendant une durée de trois semaines. Cette étude n'a pas montré d'effets positifs sur les capacités cardiovasculaires et de production de force, mais une tendance à une moindre perception des douleurs musculaires à début différé pour le groupe expérimental a été observée (Barbiche, 2006). Malgré la potentielle efficacité de la CCE dans un cadre thérapeutique médical, peu d'études existent à ce jour concernant son effet sur la récupération post-exercice dans une population de sportifs (Banfi et al., 2010; Hausswirth, 2010). Le principal effet attendu d'une séance de CCE réalisée à la suite d'un exercice intense est de limiter le processus inflammatoire et d'augmenter le flux sanguin musculaire permettant une meilleure oxygénation du muscle et élimination des déchets métaboliques (Hausswirth, 2010; Lombardi et al., 2017; Pournot et al., 2011). Wozniak et al. (2007) ont rapporté une réduction d'environ 35% de la concentration sanguine en CK (marqueur indirect des dommages musculaires) après 10 jours d'exposition quotidienne à la CCE avant les séances d'entraînement pour des kayakistes de haut niveau. De la même manière, une moindre concentration en cytokines pro inflammatoires, lactate déshydrogénase et marqueurs de dommages musculaires - *i.e.* prostaglandines et CK - a été observée suite à une semaine d'exposition pour des joueurs de rugby professionnels (Banfi et al., 2009). Pour des coureurs à pied bien entraînés, la réalisation d'une séance de CCE quotidienne pendant les 4 jours de récupération suivant un exercice de simulation de trail de 48 minutes a amélioré le processus inflammatoire (Pournot et al., 2011), mais n'a pas montré d'effets positifs sur la réduction des dommages musculaires (Hausswirth et al., 2011) comparativement à une récupération passive. Bien que certains résultats contradictoires aient été rapportés, la majorité des

travaux existant à ce jour supporte le fait que la CCE semble être une technique prometteuse pour améliorer la récupération post-exercice à travers une réduction des niveaux de dommages musculaires et de la réponse pro inflammatoire (Banfi et al., 2009; Patel et al., 2019; Pournot et al., 2011). Cependant, des études complémentaires sont nécessaires pour confirmer son efficacité et évaluer sa potentielle interaction avec les adaptations à l'entraînement, surtout pour l'entraînement en force à visée hypertrophique (Broatch et al., 2019; Lombardi et al., 2017; Roberts et al., 2015).

Quelle que soit la méthode utilisée, le traitement par le froid induit systématiquement une diminution de la température cutanée qui provoque une vasoconstriction de la micro-vascularisation périphérique (Chesterton et al., 2002). Il est couramment admis dans la communauté scientifique que l'atteinte d'une température cutanée donnée permet de déclencher une réponse physiologique spécifique. Par exemple, il est recommandé d'obtenir une température cutanée inférieure à 13,6°C pour provoquer une analgésie locale (Costello et al., 2014). De même, il est nécessaire d'atteindre une température de 12,5°C pour réduire de 10% la vitesse de conduction nerveuse, et de 10 à 11°C pour diminuer de 50% l'activité enzymatique métabolique (Chesterton et al., 2002). Certains travaux ont exploré les réponses thermiques associées à la réalisation d'une séance de CCE (Costello et al., 2012; Westerlund et al., 2003; Zalewski et al., 2014; Zalewski et al., 2013). La diminution de la température cutanée diffère selon la partie du corps, mais atteint en moyenne 12,4°C à la fin de l'exposition (Westerlund et al., 2003). Selon les études, la température centrale ne présente aucune diminution (Westerlund et al., 2003) ou bien une diminution d'environ 0,3°C environ 60 minutes après l'exposition (Costello et al., 2012; Zalewski et al., 2014).

La CCE peut également influencer la récupération cardiovasculaire (Lombardi et al., 2017). Étant donné que l'exercice induit une activation du SNS et une réduction du tonus vagal, il est aujourd'hui démontré que la réactivation plus rapide du SNP permet d'accélérer le processus de récupération (Hauswirth et al., 2013; Lombardi et al., 2017). Au cours des dernières années, quelques travaux ont évalué l'effet de la CCE sur la régulation autonome à travers l'analyse de variabilité de la fréquence cardiaque et la réalisation de dosages sanguins des catécholamines quelques minutes après l'exposition (Hauswirth et al., 2013; Louis et al., 2015). En condition de repos, sans la réalisation préalable d'exercice physique, la CCE induit une activation plus importante du SNP, exprimée par une augmentation de la puissance de la bande haute fréquence et de la RMSSD, ainsi qu'une diminution de la FC pour des sujets en bonne santé (Hauswirth et al., 2013; Westerlund et al., 2006; Zalewski et al., 2014). Des résultats similaires ont été rapportés lors de la réalisation d'une CCE après un exercice de natation synchronisée pour une population de sportifs élités (Schaal et al., 2013). De ce fait, en plus de son potentiel effet bénéfique sur la réduction de l'inflammation et des dommages musculaires, la CCE permettrait une meilleure récupération cardiovasculaire qui se

traduirait par une activité plus importante du SNP dans les premières minutes qui suivent l'exposition (Hausswirth et al., 2013; Louis et al., 2020) sans toutefois que l'on connaisse la persistance de l'effet dans le temps.

Comme nous l'avons abordé précédemment (section 1.1.2), l'activité du SNA est associée à la modification de l'architecture du sommeil. En effet, une activation plus importante du SNP est associée à un sommeil plus profond alors que l'activation du SNS est rapportée pendant les phases d'éveil (Fonseca et al., 2020). De plus, l'initiation du sommeil est accompagnée par une diminution circadienne de la température centrale à l'approche de l'endormissement. En s'appuyant sur les réponses physiologiques à la CCE, *i.e.* une légère diminution de la température centrale environ 60 min après la séance et une réactivation dans les premières minutes du SNP, nous émettons l'hypothèse que la réalisation d'une CCE avant le coucher permettrait de diminuer la latence d'endormissement et d'avoir un sommeil plus profond et continu. Quelques travaux dans la littérature ont évalué l'effet de la CCE sur la qualité de sommeil (Bouzigon et al., 2014; Douzi et al., 2018; Douzi et al., 2019; Schaal et al., 2014). Dans une étude réalisée au cours d'une compétition internationale auprès de 27 joueurs de basketball, une meilleure qualité de sommeil subjective a été rapportée les nuits consécutives à la réalisation d'une CCE comparativement aux nuits suivant une récupération passive (Bouzigon et al., 2014). Par ailleurs, Schaal et al. (2014) ont analysé le sommeil par actimétrie lors d'une période de 14 jours avec une augmentation de 25% du volume d'entraînement pour des nageurs élités. Bien que cette étude ait rapporté un temps total de sommeil plus élevé avec la CCE, ce résultat reste limité par le fait que le temps passé au lit était également supérieur pour la condition CCE, et que la durée d'éveil intra sommeil, exprimée en pourcentage du temps passé au lit, n'a pas été présentée par les auteurs. Douzi et al. (2018) ont également évalué le sommeil par actimétrie, après un exercice de course à pied intense réalisé en soirée, suivi d'une séance de CCE. Dans la condition CCE, le niveau d'activité au cours de la nuit était plus faible comparativement à la condition contrôle, c'est-à-dire sans intervention après l'exercice (Douzi et al., 2018). Les auteurs ont conclu que la réduction de l'activité motrice témoignerait indirectement d'un sommeil plus profond. Cependant, à notre connaissance, aucune étude dans la littérature scientifique n'a évalué l'architecture du sommeil par polysomnographie après une séance de CCE. Dans la dernière étude évoquée, les auteurs ont également évalué l'activité du SNA à travers l'analyse de la VFC au cours de la nuit. Une meilleure activation du SNP a été rapportée pendant la première séquence de sommeil lent profond dans la condition CCE. En effet, des travaux antérieurs ont montré que le sommeil lent profond est une période propice pour réaliser la mesure de la VFC reconnue pour être largement affectée par les mouvements, la respiration et les changements environnementaux (Brandenberger et al., 2005). L'évaluation pendant ce stade de sommeil présente moins d'interférences, garantit une meilleure stationnarité du signal ECG et par

conséquent une meilleure standardisation de la mesure (Brandenberger et al., 2005). Étant donné que la régulation autonome diffère entre les cycles et les stades de sommeil (Bonnet & Arand, 1997; Versace et al., 2003; Viola et al., 2004), nous avons tenu, dans le cadre des études 2 et 3 de cette thèse, à utiliser à chaque fois la première occurrence de sommeil lent profond au cours du premier cycle de sommeil pour réaliser l'analyse de la VFC. Nous avons également utilisé la polysomnographie pour tester l'hypothèse d'un sommeil plus profond et continu et un raccourcissement du temps d'endormissement après une exposition à la CCE avant le coucher.

3.1.2. La literie à haute conductivité thermique

En plus des interventions avant l'endormissement, les stratégies d'optimisation de l'environnement de sommeil au cours de la nuit sont d'une grande importance pour améliorer la qualité de sommeil. Les travaux scientifiques sur ce sujet sont très peu nombreux pour la population générale, et presque inexistant en sciences du sport (Troynikov et al., 2018). Optimiser l'environnement de sommeil signifie s'intéresser à tous les facteurs en lien avec la chambre à coucher et qui influencent le sommeil. Nous notons particulièrement le bruit, la température ambiante et le niveau d'humidité, la luminosité et la literie. À cela, il est nécessaire d'ajouter les conditions de couchage étant donné que la présence d'un partenaire de chambre/animal de compagnie peut également influencer la qualité de sommeil, surtout si ce dernier ronfle, bouge au cours de la nuit (lorsque le lit est partagé) ou bien présente un rythme veille-sommeil différent, *i.e.* chronotype et/ou du rythme socio-professionnel (Davenne, 2009; Nédélec et al., 2018; Pitchford et al., 2017). Cette situation est courante dans le sport de haut niveau étant donné que dès le plus jeune âge, les sportifs sont amenés à partager des chambres à plusieurs, en intégrant un centre d'excellence sportive. À ce jour, à notre connaissance, le chronotype ainsi que les emplois du temps académique et sportif ne sont pas systématiquement pris en compte dans le choix des partenaires de chambres. Dans un récent consensus du Comité International Olympique sur la santé mentale des sportifs élités, il a été rapporté que les futurs villages olympiques devraient être conçus en assurant un environnement favorable à une bonne qualité du sommeil (Reardon et al., 2019). D'un point de vue général, il a été démontré que le bruit extérieur des voitures (Öhrström & Skånberg, 2004) et la présence de sources lumineuses dans la chambre (Nédélec et al., 2015b) perturbent la qualité de sommeil. Il est donc recommandé que la chambre soit la plus isolée et sombre possible (Vitale et al., 2019b). Par ailleurs, d'après les recommandations de *l'American Sleep Association*, les températures de la chambre et du microclimat du lit sont les facteurs les plus importants pour la qualité de sommeil (American Sleep Association, 2020a). La température ambiante optimale recommandée est de 18-19°C (Nédélec et al., 2015b). Dans une étude d'Okamoto-Mizuno et al. (2005), la température centrale, cutanée et celle du microclimat du lit ont été évaluées dans différentes conditions environnementales (figure 11). Les résultats montrent qu'une élévation de la température ambiante

(26°C vs 32°C) couplée à un environnement plus humide (60% vs 80%) augmentent la durée d'éveil intrasommeil et réduisent les proportions de N3 et de REM (Okamoto-Mizuno et al., 2005). Une plus grande difficulté à dissiper la chaleur, et par conséquent à diminuer la température centrale, dans des conditions plus humides et plus chaudes, expliquerait ces résultats. Dans une autre étude réalisée par Raymann et al. (2008), la température cutanée distale a été légèrement manipulée au cours de la nuit (environ 0,4°C en moyenne), sans modifier la température centrale, à travers le port de combinaisons spécifiques. Il a été observé que lors des phases d'augmentation de température cutanée, la durée d'éveil intrasommeil a diminué et la proportion de sommeil lent profond a augmenté (Raymann et al., 2008). Il semblerait donc qu'un léger réchauffement cutané, associé à une meilleure évacuation de la chaleur améliore l'initiation et la continuité de sommeil (Kräuchi & Deboer, 2010; Troynikov et al., 2018). Raymann et al. (2008) ont souligné l'intérêt de développer une technologie intégrée dans la literie permettant d'optimiser les échanges thermiques au cours de la nuit. En s'appuyant sur ce constat et sur la relation entre le sommeil et la thermorégulation pendant le sommeil, l'efficacité d'une literie « à haute conductivité thermique » sur la qualité de sommeil a été évaluée (Herberger et al., 2019; Krauchi et al., 2018). Les propriétés de ce matelas permettent d'absorber la chaleur de la surface du corps en contact avec le matelas, par conduction. Par définition, le transfert de chaleur par conduction se fait en présence de deux solides, du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Contrairement à un matelas classique, le matelas à haute conductivité thermique "stocke" la chaleur tout en restant plus frais jusqu'à 4 à 5 heures après l'endormissement, assurant un échange thermique continu avec l'organisme. La température centrale a diminué et la proportion de sommeil lent profond a augmenté avec l'utilisation de cette literie comparativement à une literie classique (Herberger et al., 2019; Krauchi et al., 2018). Cependant, les deux seules études qui existent ont été conduites avec une population non sportive et il n'existe à ce jour pas de travaux évaluant l'intérêt de ce type de technologie sur la qualité du sommeil du sportif après un exercice à haute intensité.

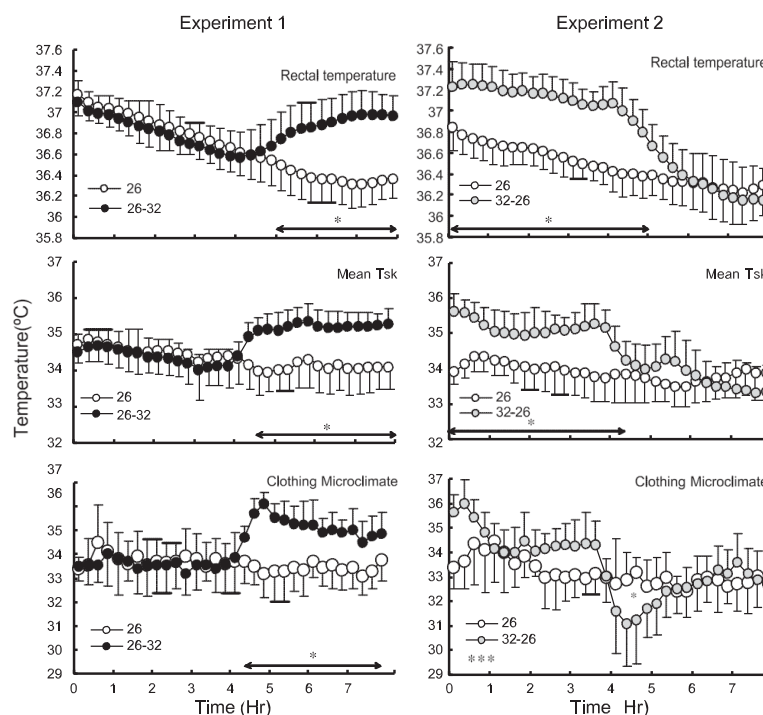


Figure 11 : Effet de la modification de la température ambiante (26 vs 32°C) et du niveau d'humidité (60 vs 80%) en première (expérimentation 2) et deuxième (expérimentation 1) partie de la nuit sur la température centrale, cutanée et celle du microclimat (Okamoto-Mizuno et al., 2005)

Dans ce dernier chapitre de la revue de la littérature, nous avons observé que certains travaux ont rapporté un effet bénéfique de la cryothérapie corps entier sur la récupération post-exercice. Les principaux effets décrits concernent sa capacité à réduire les réponses inflammatoires et les douleurs musculaires. Après une séance de CCE, le système nerveux parasympathique est réactivé plus rapidement comparativement à une récupération passive. Certaines études ont rapporté une meilleure qualité de sommeil évaluée subjectivement et par actimétrie après une séance de CCE. Cependant, il n'existe à ce jour aucune étude évaluant son effet sur l'architecture du sommeil.

Une nouvelle stratégie innovante d'hygiène de sommeil consiste en un matelas à haute conductivité thermique dont les propriétés permettraient d'optimiser les échanges thermiques au cours de la nuit. Les premiers travaux portant sur cette stratégie ont été réalisés auprès de sujets jeunes et en bonne santé, non sportifs, au repos, et ont montré des résultats prometteurs. Il n'existe à ce jour aucune étude évaluant son efficacité pour améliorer le sommeil post-exercice auprès d'une population de sportifs de haut niveau.

OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

L'objectif principal de cette thèse était d'évaluer le sommeil en réponse à des facteurs de stress relatifs au sport de haut niveau (*i.e.* entraînement tardif et compétition), et d'étudier l'efficacité de stratégies permettant de l'améliorer. La première étude était descriptive et avait comme objectif principal de **comparer le sommeil entre différentes disciplines présentant des exigences physiques et cognitives différentes**. Elle a été réalisée en période d'entraînement, auprès de sportifs de la même catégorie d'âge, impliqués dans un double projet académique et sportif. Un autre objectif de cette étude était d'**évaluer l'effet chronique de la variation de la charge d'entraînement sur la quantité et la qualité de sommeil**. Nous avons émis l'hypothèse que l'augmentation de la charge d'entraînement entraînerait une perturbation de la qualité et la quantité de sommeil. La deuxième étude avait comme principal objectif d'**évaluer l'effet d'un exercice à haute intensité réalisé en soirée sur l'architecture du sommeil**. Un autre objectif de cette étude était d'**étudier l'implication des mécanismes physiologiques de thermorégulation et de régulation autonome dans la potentielle perturbation du sommeil**. Un exercice inducteur de dommages musculaires a été réalisé afin d'**explorer leur potentielle interaction avec la modification de l'architecture du sommeil**. Nous avons émis l'hypothèse que l'exercice à haut intensité réalisé proche de l'heure de coucher influencerait négativement la qualité de sommeil. Cette perturbation du sommeil serait expliquée notamment par une activation plus importante du système nerveux sympathique et une augmentation de la température centrale, majoritairement en première partie de la nuit. Enfin, la dernière étude de cette thèse visait à comprendre l'**effet d'un match de rugby de haut niveau sur l'architecture du sommeil** et d'**étudier l'efficacité de deux stratégies différentes pour améliorer la qualité de sommeil post-match** (*i.e.* matelas à haute conductivité thermique et cryothérapie corps entier). Nous avons émis l'hypothèse que l'augmentation de la charge du match, surtout le nombre de collisions, impacterait négativement la qualité de sommeil et que les deux stratégies proposées amélioreraient la qualité de sommeil à travers une meilleure thermorégulation au cours de la nuit et une activation parasympathique post-match plus importante.

CONTRIBUTION SCIENTIFIQUE

Étude 1 : La relation entre la discipline pratiquée, la charge de l'entraînement et le sommeil chez des sportifs de haut niveau adolescents

Publication associée :

Aloulou, A., Duforez, F., Léger, D., De Larochelambert, Q. & Nédélec, M. (2020). The relationships between training load, type of sport and sleep among high-level, adolescent athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance* (under review)

Study 1: The relationships between training load, type of sport and sleep among high-level adolescent athletes

Abstract

Purpose: To evaluate the effects of sporting activities, training loads, and athlete's characteristics on sleep among adolescent high-level athletes, in a controlled training and academic environment.

Methods: 128 adolescent, high-level athletes [age: 15.2 (2.0) years], across nine different sports, completed common sleep questionnaires and were monitored daily [7.3 (2.7) days], during a typical in-season training period. Sleep was analyzed using actigraphy and sleep diaries, whereas training load was evaluated using the session rating of perceived exertion and muscle soreness and general fatigue were reported with the aid of visual analog scales. Separate, linear, mixed-effects models were fitted, including the athlete as a random effect and the following variables as fixed effects: the sport practiced (categorical predictor), daily training load, age, and sex. Different models were used to compare sleep variables among sports and to assess the influence of training load, age, and sex.

Results: Mean total sleep time (TST) was 7.1 (0.7) h. Swimmers presented increased sleep fragmentation, training loads, perceived muscle soreness, and general fatigue compared with athletes who engaged in other sports. Independent of any sport-specific effects, a higher daily training load induced an earlier bedtime and reduced TST and perceived sleep quality, with higher sleep fragmentation. Moreover, female athletes experienced increased TST and worse sleep quality in response to stress compared with those in males.

Conclusion: In a controlled training and academic environment, adolescent, high-level athletes did not achieve the recommended sleep duration. Impaired sleep quality and quantity could be partially explained by increased training loads.

Keywords: actigraphy, RPE, swimming, training, muscle soreness, fatigue

Introduction

Sleep is one of the most important components of an athlete's recovery (Venter, 2014). The National Sleep Foundation recommends 7–9 hours of sleep each night, for healthy adults, and 9–10 hours each night, for teenagers and young adults (Hirshkowitz et al., 2015). Late bedtimes, caused by lifestyle, social activity, and phase delays of the circadian pacemaker, combined with early school start times, can make achieving the recommended sleep duration challenging for young people (Crowley et al., 2018). A previous study reported that 20% of the young population (12 to 18 years old) obtained less than 6 hours of sleep each night (Roberts et al., 2009). Even further reduced sleep times (-47 min) have been reported for young athletes compared with non-sporting controls (Brand et al., 2010). Sleep restriction, which is defined as the reduction in total sleep time, negatively impacts cognitive and physical performance (Roberts et al., 2019a). The very dense academic, performance, and social agendas largely account for the insufficient sleep patterns observed among young athletes (Bergeron et al., 2015). In a cohort of 628 collegiate level student-athletes, 42% were classified as “poor sleepers”, based on scores ≥ 5 on the Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) (Mah et al., 2018). In addition to the insufficient duration and/or quality, sleep among athletes is often characterized by larger intra- and inter-individual variability than that for age- and sex-matched non-sporting controls (Nédélec et al., 2018; Whitworth-Turner et al., 2018). Multiple factors associated with the high-level sporting context may account for this phenomenon, e.g. type of sport (Gudmundsdottir, 2020; Lastella et al., 2014c), training/competition schedules (Sargent et al., 2014a) and training loads (Dumortier et al., 2018; Watson et al., 2017). Previous studies have reported very low sleep durations ($\sim 05:30$) among swimmers, which may be explained by the trend towards early morning training sessions for this sport (Gudmundsdottir, 2020; Sargent et al., 2014a). Moreover, later bedtimes ($\sim +57$ min) and longer sleep durations were noted for team-sport athletes compared with individual athletes (Lastella et al., 2014c). By comparing the sleep/wake behaviours of elite athletes from three different football codes, Miller et al. (2017) showed higher wake ($\sim +13$ -14 min) and movement ($\sim +16$ -17 min) time during sleep for Australian football players compared with soccer and rugby players. However, whether differences in sleep parameters observed among different sports can be explained by the sport itself and/or the training loads associated with each sport remains unclear. The relationships between training loads and sleep have also been studied (Dumortier et al., 2018; Knufinke et al., 2018b; Lastella et al., 2020b). Reductions in total sleep times and sleep efficiency have been reported after increasing training loads in young gymnasts (Dumortier et al., 2018) and basketball players (Lastella et al., 2020b), respectively. Moreover, the daily training load was negatively correlated with subsequent subjective sleep duration and quality among young soccer players (Watson et al., 2017). Conversely, Knufinke et al. (2018b) did not

report any modifications in sleep variables, as a function of day-to-day variations in training loads. The discrepancies in these results may be explained by the populations studied, which included a mix of elite adult and young athletes, with different training, academic, and sleep requirements, which may have blunted the training load effects.

The present study aimed to evaluate the effects of different sports, training loads, and athletes' characteristics on sleep, by examining a homogeneous, adolescent, high-level athlete population, in a controlled training and academic environment.

Methodology

Participants

One hundred and twenty-eight adolescent, high-level athletes (male = 89 and female = 39), from nine different sports (archery, $n = 14$; golf, $n = 8$; swimming, $n = 10$; road cycling, $n = 12$; badminton, $n = 8$; fencing, $n = 10$; soccer, $n = 39$; handball, $n = 17$; and volleyball, $n = 10$) participated in this study [age: mean (SD), 15.2 (2.0) years; range, 12–21 years]. All competitive elite athletes (Araujo & Scharhag, 2016; Swann et al., 2015) performed at the highest national and international level for their age categories and were housed in three different national excellence training centers (Paris, France). The descriptive characteristics of the participants, for each sport, are presented in Table 3. The experiments were conducted according to the Helsinki Declaration (1964: revised in 2001), and the protocol was approved by the local Ethics committee (East III, France. Ref. 170605).

Experimental design

Participants completed common sleep questionnaires prior to the start of the daily monitoring period. Each participant received an activity monitor to record sleep data and a sleep diary, in which to report daily subjective data. The daily monitoring of the training load, the perceived muscle soreness and general fatigue, and the sleep variables was performed during a typical, in-season training period [7.3 (2.7) days] between September 2017 and January 2018, out of vacation, exam period and competition. During that period, the weekend was free from competition and training. The study timeline is presented in Figure 12.

Measurements

Sleep questionnaires

The Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) is a 19-item, self-report questionnaire that assesses general sleep quality and duration over the previous month (Buysse et al., 1989). Seven component

scores were calculated: sleep quality, sleep latency, sleep duration, sleep efficiency, sleep disturbance, use of sleep medication, and daytime dysfunction. The Global PSQI score ranges from 0 to 21. A score ≥ 5 was considered to represent poor sleep quality (Mah et al., 2018).

The Ford Insomnia Response to Stress Test (FIRST) is a nine-item scale that is used to assess an individual's likelihood of experiencing sleep difficulties in response to common stressful situations (Drake et al., 2004). Each item is self-rated on a four-point Likert scale and total score range from 9 to 36; higher scores indicate higher levels of sleep hyperarousal.

The Insomnia Sleep Index (ISI) was used to evaluate insomnia and consists of seven items that ask the athletes to rate their experiences with insomnia, from 0 to 4. A score between 8–14 indicates sub-threshold insomnia, whereas a score >14 indicates clinical insomnia (Bastien et al., 2001).

The Epworth Sleepiness Scale (ESS) was administered prior to the study, to assess sleep propensity, on a 0-3 scale, for 8 standardized daily situations (Johns, 1991). The global score ranged from 0 to 24, with higher scores reflecting increased daytime sleepiness.

The Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ) consists of 19 self-assessed questions, which determines an individual's chronotype (Horne & Ostberg, 1976). The chronotype classification was performed according to Horne et Ostberg (1976) as follows; 16-41 = evening type; 42-58 = intermediate type; and 59-96 = morning type.

	<u>Monday</u>	<u>Tuesday</u>	<u>Wednesday</u>	<u>Thursday</u>	<u>Friday</u>	<u>Saturday</u>	<u>Sunday</u>
8h	Class	Class	Class	Class	Class	Rest	
10h							
12h	Lunch						
14h	Class	Class	Rest	Class	Class		
16h							
18h							

Figure 12: Study 1 timeline

Daily-monitored measures

Actigraphy data were collected using a bracelet that was worn on the non-dominant wrist (MotionWatch8, CamNTEch, Cambridge, UK). The recorded data were scored automatically, using Sleep Analysis software (Actiwatch activity and sleep analysis version 7.43, CamTNEch, Cambridge, UK), which indicated whether the participant was awake or asleep for each 60-s epoch.

Sleep variables derived from the algorithms applied to activity counts by the MotionWatch 8 and associated software have shown reliability and validity when compared with polysomnography for healthy young subjects (Sadeh, 2011). Because a variety of sports was considered, a medium sleep-wake threshold (≥ 40 activity counts is scored as awake) was applied to the data set as it has shown to generate the smallest mean biases compared with polysomnography (PSG) for total sleep time, sleep efficiency, and wake after sleep onset in athletic population (Fuller et al., 2017). The sleep variables were measured as follows:

- (1) sleep time median (STM - hh:mm): the median between bedtime and get-up time;
- (2) time in bed (TIB - minutes): the time between bedtime (lights off) and get-up time;
- (3) total sleep time (TST - minutes): the time spent asleep, determined from sleep start to sleep end, minus any waking time;
- (4) wake after sleep onset (WASO - %): the total wake time, according to the epoch-by-epoch wake/sleep categorization, expressed as a percentage of TIB;
- (5) sleep efficiency (SE - %): the TST divided by the TIB;
- (6) sleep onset latency (SOL - minutes): the time between lights off and sleep onset;
- (7) fragmentation index (FI - A.U.): the sum of the mobile time (%) and the immobile bouts ≤ 1 min (%); and
- (8) social jet lag (SJL - minutes): the difference in the STM between weekends (Friday and Saturday nights) and weeknights (Nédélec et al., 2018).

The Spiegel Sleep Inventory (SSI) was administered upon waking, to assess the daily perceived sleep quality. The SSI is a self-administered questionnaire, composed of 6 questions (score: 1–5), regarding sleep onset latency, sleep quality, sleep duration, nocturnal awakenings, dreams, and feeling refreshed in the morning. The global score is the sum of all 6 items. Few data are available regarding the psychometric validity of the SSI; however, the SSI is a very simple and easy-to-use scale that is often used to assess the presence of insomnia (Léger et al., 2006).

Training load, muscle soreness, and general fatigue

Rating of perceived exertion of the session (RPE-S) was reported within 30 minutes of the end of each training session. Participants answered the question, “How was your workout?”, on a scale from 0 (rest) to 10 (maximal) (Foster et al., 2001). The answer was multiplied by the session duration (in minutes) to obtain the training load. All sessions during a single day were summed to obtain the daily training load. The mean training load per day during the follow-up period for each athlete [7.3 (2.7) days] was then calculated for between-sport comparison.

Subjective ratings of muscle soreness and general fatigue were assessed each morning, using a 10-cm VAS. Participants made a mark with a pen to indicate their perception for each item, which ranged from the most negative to the most positive state (Thompson et al., 1999).

Statistical analysis

Statistical analyses were conducted using the R studio program (version 1.2.5033). Descriptive data are reported as the mean (SD). The Shapiro–Wilk and Levene's tests were performed to assess the normality of data distribution and the homogeneity of variance, respectively. The between-sports comparisons of athletes' characteristics, sleep questionnaire scores, mean training load, muscle soreness, general fatigue, and SJL were conducted using a one-way analysis of variance (ANOVA) or the Kruskal-Wallis test, depending on the meeting of assumptions. When a main effect of the type of sport was noted, multiple pairwise comparisons and the “Holm” method for alpha adjustment were employed. The chi-squared test was used for categorical data, to compare gender and chronotype proportions between sports. When a main effect was noted, adjusted residuals were analyzed to identify the overrepresented sports. Moreover, a first type of linear, mixed-effects model (“*lme*” function of the “*nlme*” package) was fitted to compare each dependent variable (i.e., actigraphy and SSI score) among the different sports and to assess its relationships with the daily training load, age, and sex (Knufinke et al., 2018b). Each model included the athlete, as a random effect, and the following variables as fixed effects: the sport practiced (categorical predictor), the daily training load, age, and sex. For all models for which a main effect of the type of sport was reported, multiple, post hoc, Student's t-tests pairwise comparisons were conducted, using least squared means contrasts, with the “Holm” method for alpha adjustments (“*emmeans*” function of the “*emmeans*” package). Effect sizes (*Cohen's d*) were calculated to interpret the magnitude of the difference between disciplines with $d < 0.2$, $d = 0.2–0.5$, $d = 0.5–0.8$ and $d > 0.8$ considered as trivial, small, moderate and large, respectively. (Cohen, 1988) A second type of linear, mixed-effects models was used to assess the relationship between muscle soreness, general fatigue (separately) and sleep variables. The estimate, the 95% confidence interval (CI), and the p-value were reported for models results. The level of significance (alpha) was set at 0.05.

Results

Athletes' characteristics and sleep questionnaires

Descriptive statistics for athletes' characteristics and sleep questionnaires are presented in Table 3. Our results showed no significant differences among sports for PSQI, ISI, and ESS scores or chronotype distributions. However, more than half of the athletes (~52%) reported a PSQI score ≥ 5 , indicating poor global sleep quality. The FIRST mean scores were high, with athletes from five

disciplines presenting mean scores above 20: golf, swimming, badminton, fencing, and handball, which indicated higher levels of sleep hyperarousal among these athletes. Furthermore, a significant difference ($p < .001$) was noted between males [18.2 (4.5) arbitrary units (A.U.)] and females [22.1 (4.5) A.U.] with regard to FIRST scores.

The mean ISI scores in athletes were also high, with six disciplines presenting mean scores above 8, which are associated with sub-threshold insomnia: swimming, cycling, badminton, fencing, soccer, and handball. A mean ESS score > 10 , which is an indicator of a high level of sleepiness, was observed among the athletes in 4 disciplines: swimming, cycling, soccer, and handball.

A significant main effect of the type of sport was noted for the age ($\chi^2 = 79.5$; $df = 8$; $p < .001$) and the sex proportions ($\chi^2 = 71.3$; $df = 8$; $p < .001$). Specifically, golfers, soccer players, and badminton players were significantly younger ($p < .05$) than the athletes from the other sports. Moreover, residuals analysis of the chi-squared tests showed that females were overrepresented among handball and golf players and underrepresented among soccer and volleyball players (Table 3).

Daily-monitored measures

Between-sports differences in sleep

Table 4 provides an overview of the differences in objective and subjective daily monitored sleep variables among sports. A later STM was observed for volleyball players compared with the participants in all other sports. WASO was significantly higher for swimmers compared with archers (+5.7%; $p = .01$; 95% CI: 1.4 to 10.2%; $d = 1.70$). Swimmers showed higher levels of sleep fragmentation than archers (+17 A.U.; $p < .001$; 95% CI: 4.7 to 30.0%; $d = 1.80$), fencers (+17 A.U.; $p < .001$; 95% CI: 3.7 to 28.8%; $d = 1.78$), badminton players (+15 A.U.; $p = .02$; 95% CI: 4.0 to 30.5%; $d = 1.66$), soccer players (+17 A.U.; $p = .001$; 95% CI: 5.1 to 30.0%; $d = 1.78$), handball players (+17 A.U.; $p < .001$; 95% CI: 4.9 to 30.4%; $d = 1.86$), and volleyball players (+14 A.U.; $p = .01$; 95% CI: 1.1 to 26.3%; $d = 1.45$). Otherwise, soccer players experienced increased SJL compared with archers (+68 min; $p = .02$; 95% CI: 25 to 112 min; $d = 0.97$), swimmers (+81 min; $p = .04$; 95% CI: 27 to 136 min; $d = 1.14$), cyclists (+80 min; $p = .005$; 95% CI: 42 to 118 min; $d = 1.19$), fencers (+98 min; $p < .001$; 95% CI: 64 to 132 min; $d = 1.47$) and volley-ball players (+78 min; $p = .02$; 95% CI: 28 to 129 min; $d = 1.10$). No between-sports differences were noted for SE, SOL and SSI scores.

Table 3: Participant characteristics and general sleep measures in relation to the practiced sport. Data are reported as mean (SD).

Total (n=128)	Archery (n=14)	Golf (n=8)	Swimming (n=10)	Cycling (n=12)	Badminton (n=8)	Fencing (n=10)	Soccer (n=39)	Handball (n=17)	Volley-ball (n=10)
Athlete Characteristic									
Age (years)	16.4 (2.2) ^{***} ^γ	13.9 (1.0)	17.8 (2.1) ^{##} ^{γγ}	16.1 (0.8) ^{***} ^γ	13.6 (1.7)	17.3 (1.7) [#] ^{γγ}	13.5 (0.5)	15.5 (1.3) ^{**}	16.6 (1.3) [#] ^{***} ^γ
Sex (n, % female)	7 (50 %)	5 (62.5 %) ^f	5 (50 %)	2 (16.7 %)	1 (12.5 %)	2 (20 %)	0 (0 %) ^m	17 (100 %) ^f	0 (0 %) ^m
Height (cm)	174 (8.5)	167.4 (6.5)	174.8 (7.8)	178.2 (6.6)	164.4 (5.7)	175.5 (11.4)	166.7 (11.8)	175.1 (5.8)	190.5 (6.7)
Weight (kg)	65.9 (9.1)	56.2 (7.1)	62.2 (8)	63.5 (4.4)	48.6 (9.2)	68 (14.5)	52.7 (12.9)	67.4 (7.9)	73.7 (6.9)
Sleep questionnaires									
PSQI (A.U.)	4.6 (1.4)	4.7 (1.8)	5.0 (1.5)	5.0 (1.3)	4.6 (2.8)	5.5 (3.7)	4.6 (2.0)	4.9 (2.2)	4.9 (3.2)
FIRST (A.U.)	17.8 (4.2)	23.3 (8.8) [*]	21.1 (4.3)	19.9 (2.6)	21.9 (4.2)	20.7 (3.2)	17.1 (4.4)	22.4 (3.5) ^α ^{**}	16.7 (4.2)
ISI (A.U.)	6.3 (4.0)	7.2 (4.5)	9.6 (4.5)	8.7 (4.2)	8.9 (7.4)	8.7 (4.2)	8.6 (5.5)	9.2 (3.9)	8 (5.4)
ESS (A.U.)	9.6 (3.5)	9.7 (4.7)	12 (2.2)	10.4 (2.9)	8.9 (2.1)	7.5 (2.3)	11.8 (4.0)	11.2 (2.8)	9.6 (2.7)
Chronotype									
Morning types (%)	0	0	13	0	25	10	11	15	30
Intermediate types (%)	92	83	50	83	75	70	78	77	60
Evening types (%)	8	17	37	17	0	20	11	8	10

Significantly different from soccer: * p < .05; ** p < .01; *** p < .001

Significantly different from golf: # p < .05; ## p < .01; ### p < .001

Significantly different from badminton: ^γ p < .05; ^{γγ} p < .01; ^{γγγ} p < .001

Significantly different from volley-ball: ^α p < .05

Significantly overrepresented in; ^m males and ^f females (p < .05)

A.U.: arbitrary unit; PSQI: The Pittsburg Sleep Quality Index; FIRST: The Ford Insomnia Response to Stress Test; ISI: The Insomnia Sleep Index; ESS: The Epworth Sleep Scale; MEQ: The Morningness-Eveningness Questionnaire

Table 4: Overview of the objective (actigraphy) and subjective (SSI) sleep variables in relation to the practiced sport. Data are reported as mean (SD)

Total (n=128)	Archery (n=14)	Golf (n=8)	Swimming (n=10)	Cycling (n=12)	Badminton (n=8)	Fencing (n=10)	Soccer (n=39)	Handball (n=17)	Volley-ball (n=10)
Actigraphy									
Bed time (hh:mm)	23:33 (00:53) ^{αα}	23:10 (00:41) ^α	23:06 (00:32) ^{ααα}	23:29 (00:30) ^{ααα}	23:12 (00:48) ^{αα}	23:52 (00:37) ^α	23:26 (00:29) ^{ααα}	23:39 (00:27)	00:42 (00:49)
Get-up time (hh:mm)	07:53 (00:30)	08:00 (00:20)	07:47 (00:25)	08:16 (00:27)	08:00 (00:45)	08:04 (00:31)	07:50 (00:32)	07:32 (00:29) ^α	08:15 (00:26)
Sleep time median (hh:mm)	03:43 (00:33) ^{αα}	03:35 (00:29)	03:26 (00:21) ^{ααα}	03:53 (00:18) ^α	03:35 (00:50) ^α	03:58 (00:29) ^α	03:46 (00:28) ^{αα}	03:44 (00:17) ^α	04:28 (00:33)
Time in bed (min)	500.3 (55.9)	530.2 (28.2)	520.4 (35.7) ^α	526.1 (45.1) ^{ααα}	527.9 (36.2) ^α	492.5 (36.2)	514.6 (25.0) ^α	484.1 (42.4) ^{† φφ}	453.6 (42.0)
Total sleep time (min)	434.8 (49.9)	446.2 (25.4)	428.3 (43.6)	435.8 (53.0) ^α	437.3 (34.8)	414.2 (32.4)	437.1 (32.7) ^α	420.1 (43.1)	374.8 (40.5)
Wake after sleep onset (%)	8.9 (3.1) [†]	11.4 (1.7)	14.6 (5.2)	13.2 (5.0)	11.5 (4.5)	11.5 (3.0)	11.1 (3.3)	10.1 (2.7)	11.6 (3.7)
Sleep efficiency (%)	87.0 (4.2)	84.1 (2.7)	82.3 (6.1)	82.8 (5.8)	83.1 (6.4)	84.2 (4.5)	85.0 (4.1)	86.8 (3.2)	82.9 (4.7)
Sleep onset latency (min)	19.1 (13.4)	22.3 (14.3)	17.1 (12.1)	16.9 (9.7)	24.4 (15.6)	15.8 (11.1)	19.5 (12.4)	11.4 (5.5)	13.4 (11.0)
Fragmentation index (A.U.)	26.1 (7.5) ^{†††}	29.0 (5.7)	43.6 (15.1)	31.7 (9.5)	26.2 (8.4) [†]	27.2 (5.3) ^{†††}	25.1 (6.6) ^{††}	24.6 (6.4) ^{†††}	29.8 (5.7) [†]
Social jetlag – SJL (min)	74.3 (60.3) [*]	72.7 (58.6)	61.2 (49.2) [*]	62.8 (40.9) ^{**}	97.3 (44.4)	44.6 (28.6) ^{***}	142.8 (77.3)	111.8 (41.2)	64.3 (57.7) [*]
SSI score (A.U.)	23.0 (2.3)	23.3 (3.0)	20.6 (3.0)	20.8 (2.5)	23.5 (2.7)	22.8 (2.0)	21.9 (2.9)	22.6 (2.1)	22.6 (3.3)

Significantly different from swimming: [†] p < .05; ^{††} p < .01; ^{†††} p < .001

Significantly different from soccer: ^{*} p < .05; ^{**} p < .01; ^{***} p < .001

Significantly different from volley-ball: ^α p < .05; ^{αα} p < .01; ^{ααα} p < .001

Significantly different from cycling: ^{φφ} p < .01

SSI: Sleep Scale Inventory; A.U.: arbitrary unit; SSE: Spiegel Sleep Inventory

Between-sports differences in training loads, muscle soreness and general fatigue

The mean training load was significantly higher for swimming compared with all other sports (Figure 13a). Moreover, the mean perceived muscle soreness was higher for swimming compared with golf (+3.1 A.U.; $p < .001$; 95% CI: 1.9 to 4.4 A.U.; $d = 2.67$), cycling (+3.0 A.U.; $p < .001$; 95% CI: 1.7 to 4.3 A.U.; $d = 2.35$), badminton (+2.1 A.U.; $p = .04$; 95% CI: 0.6 to 3.7 A.U.; $d = 1.45$), soccer (+1.9 A.U.; $p = .009$; 95% CI: 0.3 to 2.8 A.U.; $d = 1.03$), and volley-ball (+2.4 A.U.; $p = .008$; 95% CI: 1.1 to 3.6 A.U.; $d = 2.04$) (Figure 13b). Finally, swimmers presented higher mean general fatigue scores than archers (+2.4 A.U.; $p = .02$; 95% CI: 0.8 to 4.1 A.U.; $d = 1.60$), golfers (+2.7 A.U.; $p = .03$; 95% CI: 0.6 to 4.8 A.U.; $d = 1.42$), and badminton players (+2.9 A.U.; $p = .01$; 95% CI: 1.1 to 4.7 A.U.; $d = 1.73$) (Figure 13c).

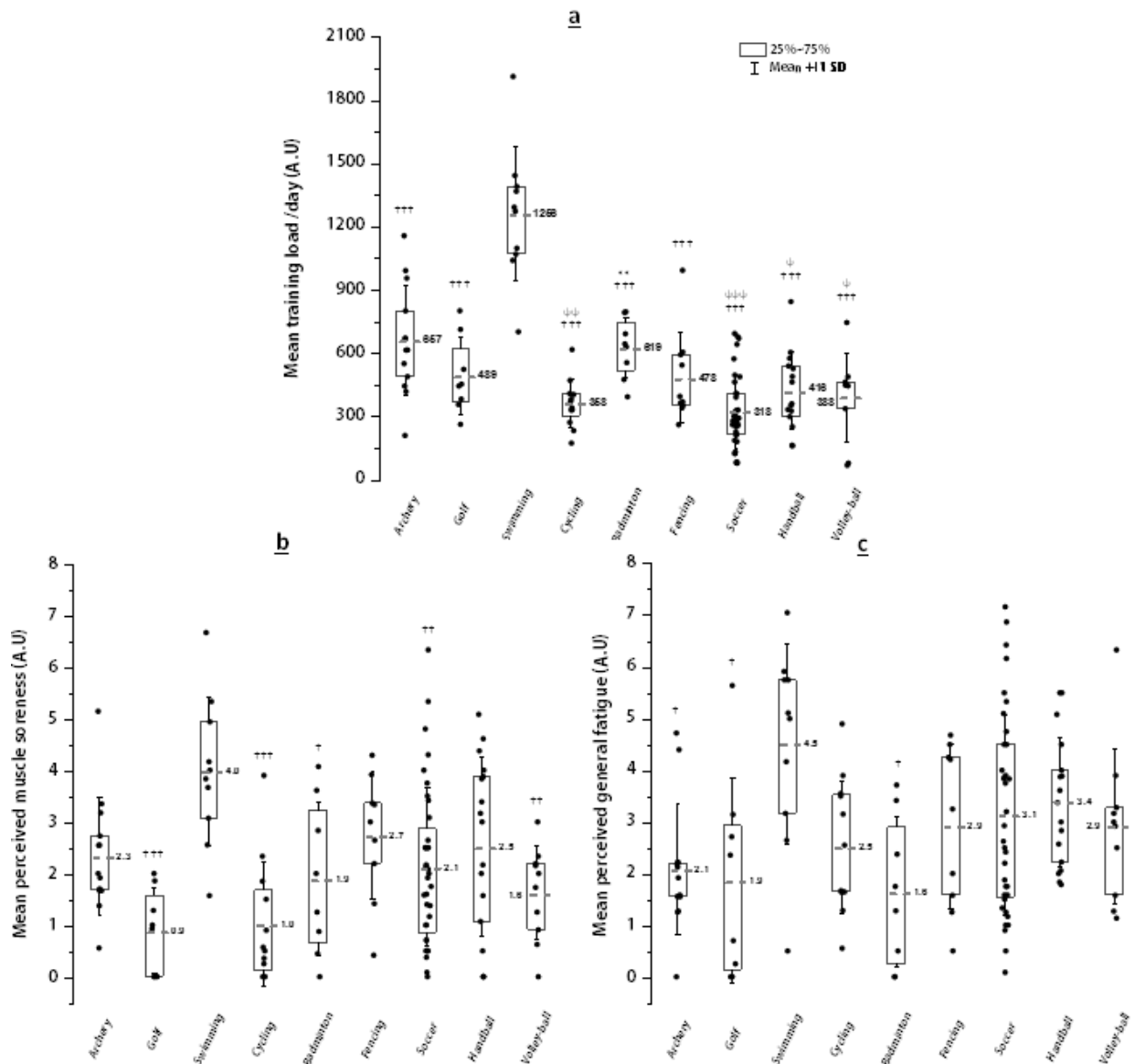


Figure 13: Between-sports comparison for mean training load, perceived muscle soreness and perceived general fatigue. Significantly different from archery: ψ $p < .05$; $\psi\psi$ $p < .01$; $\psi\psi\psi$ $p < .001$. Significantly different from swimming: $\dagger$ $p < .05$; $\dagger\dagger$ $p < .01$; $\dagger\dagger\dagger$ $p < .001$. S

Relationships between daily training loads and subsequent sleep

Table 5 provides an overview of the relationships between daily training loads and dependent sleep-associated variables, adjusted for age, sex, and practiced sport. For every 100 A.U. increase in daily training load, significantly earlier STM (-2.5 min; $p < .001$), lower total sleep time (-1.2 min; $p = .008$) and SSI scores (-0.1 A.U.; $p = .005$), and higher fragmentation index values (+0.1 A.U.; $p = .04$) were reported. Additionally, for every additional year in age, a later STM (4.1 min; $p = .03$) was found. Male athletes experienced lower TST compared to female athletes (-32.9 min; $p = .003$). No relationships were noted between muscle soreness, general fatigue and sleep variables.

Table 5: Linear mixed-effects models outputs for objective and subjective sleep variables with the subject as a random effect and the sport, daily training load, sex and age as fixed effects

Model	Estimate	95% CI	p-value
Sleep time median (min)			
~ Daily training load (*100 A.U.)	-2.5	[-3.3, -1.6]	< .001
~ Age (years)	4.1	[0.4, 7.9]	.03
~ Sex (M vs F)	3.7	[-12.5, 19.9]	.65
Total sleep time (min)			
~ Daily training load (*100 A.U.)	-1.2	[-2.0, -0.3]	.008
~ Age (years)	-4.3	[-9.3, 0.6]	.08
~ Sex (M vs F)	-32.9	[-53.9, -11.8]	.003
Wake after sleep onset (%)			
~ Daily training load (*100 A.U.)	-0.0	[-0.1, 0.1]	.43
~ Age (years)	0.1	[-0.4, 0.5]	.87
~ Sex (M vs F)	1.5	[-0.6, 3.5]	.16
Sleep efficiency (%)			
~ Daily training load (*100 A.U.)	0.0	[-0.1, 0.1]	.61
~ Age (years)	-0.1	[-0.7, 0.5]	.70
~ Sex (M vs F)	-1.8	[-4.4, 0.9]	.18
Sleep onset latency (min)			
~ Daily training load (*100 A.U.)	0.0	[-0.3, 0.3]	.98
~ Age (years)	0.1	[-1.5, 1.7]	.89
~ Sex (M vs F)	-0.4	[-7.1, 6.4]	.91
Fragmentation index (A.U.)			
~ Daily training load (*100 A.U.)	0.1	[-0.0, 0.3]	.04
~ Age (years)	0.5	[-0.6, 1.6]	.35
~ Sex (M vs F)	0.5	[-4.1, 5.2]	.82
SSI score (A.U.)			
~ Daily training load (*100 A.U.)	-0.1	[-0.1, -0.0]	.005
~ Age (years)	-0.1	[-0.5, 0.2]	.49
~ Sex (M vs F)	-0.2	[-1.7, 1.3]	.83
Total sleep time (min)			
~ DOMS (A.U.)	-0.5	[-3.0, 2.1]	.72
~ General fatigue (A.U.)	1.3	[-1.1, 3.7]	.27
Wake after sleep onset (%)			
~ DOMS (A.U.)	-0.1	[-0.2, 0.1]	.28
~ General fatigue (A.U.)	-0.0	[-0.1, 0.1]	.89
Fragmentation index (A.U.)			
~ DOMS (A.U.)	-0.2	[-0.6, 0.2]	.28
~ General fatigue (A.U.)	0.2	[-0.2, 0.6]	.28

Discussion

The present study assessed the effects of sport, training loads, age and gender on sleep variables among a cohort of adolescent, high-level athletes from various disciplines, in a controlled training and academic environment. Our results showed that swimmers presented higher training loads and increased levels of perceived muscle soreness and general fatigue. Although no relationships were noted between muscle soreness, general fatigue and sleep variables, swimmers presented also higher sleep fragmentation compared to athletes from the other disciplines apart from cyclists and golfers. Independent of any sport-specific effects, higher daily training loads induced earlier STM, reduced TST and perceived sleep quality, and increased sleep fragmentation. Moreover, we noticed later STM values for volleyball players and increased social jetlag for soccer players. Female athletes also showed longer TST and higher FIRST scores compared with male athletes.

The first important issue identified by our study was the high level of subjective complaints regarding sleep and sleepiness among the athletes in several disciplines, especially swimming, fencing, soccer, and handball. The high mean PSQI, FIRST, ISI, and ESS scores were paradoxical, as being young and exercising are generally considered factors associated with good sleep. Physical activity is usually considered to be beneficial for aiding sleep, although this link may be subject to multiple moderating factors, such as sex, age, fitness level, and the characteristics of exercise (intensity, duration, time of day, and environment) (Nédélec et al., 2018). We hypothesize that adolescent, high-level athletes may present several other factors that contribute to poor sleep, such as anxiety associated with competitions and poor sleep schedules. Moreover, the present study found a rather short mean TST [7.1 (0.7) hours], which is far below the 9-10 hours recommended by the National Sleep Foundation for the adolescent population (Hirshkowitz et al., 2015).

Another important issue identified by our study concerns swimmers' sleep. Swimmers reported similar sleep durations and wake-up times as participants in other sports. This finding was different from the reduced sleep durations and the early wake-up times reported for swimmers elsewhere (Gudmundsdottir, 2020; Sargent et al., 2014a). However, the swimmers involved in the present study showed increased sleep fragmentation compared with participants in other sports. Similarly, increased moving time was previously reported among high-level swimmers (Lastella et al., 2014c). Several hypotheses may explain the impaired sleep continuity observed among this specific population. Firstly, swimmers reported increased perceived muscle soreness and general fatigue compared with the participants in other sports. Soreness and sleep are potentially linked, as the activation of the locus coeruleus and dorsal raphe are important for the occurrence of paradoxical sleep, and the activation of these areas also alleviates pain (Ohayon, 2009). Our findings did not show a significant relationship between perceived muscle soreness and sleep actigraphic variables

while a recent study reported a positive association between perceived soreness and sleep fragmentation for elite Australian footballers (Lalor et al., 2020). Using an experimental model of muscle pain induction during sleep, Drewes et al. (1997) reported an arousal effect as well as lower delta and higher alpha and beta activities in response to muscle-pain stimuli. Future investigations are required to explore the reciprocal relationship between sleep and soreness among high-level athletes.

Secondly, swimmers in the present study showed higher training loads compared with the participants in other sports, which was explained by both longer training duration and higher perceived exertion of the session. The effects of daily training load on subsequent sleep, independent of discipline, was assessed using a separate linear mixed-effect model for each sleep variable, adjusted for age and sex. Our results showed that for every additional 100 A.U. in daily training load, earlier STM scores (-2.5 min), lower TST (-1.2 min), and SSI scores (-0.1 A.U.), and increased sleep fragmentation (+0.1 A.U.) were noted. These results are in agreement with previous reports examining young athletes' sleep (Dumortier et al., 2018; Lastella et al., 2020b; Watson et al., 2017). Using subjective assessments, higher training loads led to shorter sleep durations for gymnasts (Dumortier et al., 2018), and a significant correlation was noted between daily acute training loads and sleep duration ($r = -0.39$; $p < .05$) and quality ($r = -0.40$; $p < .05$) among young soccer players (Watson et al., 2017). High-training-load days during training camp were associated with earlier sleep schedules and reduced TST (~ -72 min; $p < .05$) compared with rest days, and lower sleep efficiency ($\sim -2.7\%$; $p < .05$) compared with low-training-load days in basketball players (Lastella et al., 2020b). All these results suggest that increased training loads among young, high-level athletes may impair sleep quality and quantity. While the effect of training loads presents a good rationale to explain the sleep disturbance of swimmers in the present study, futures studies are required with the aim of manipulating training load and assessing the impact on sleep architecture.

Thirdly, 37% of the swimmers sample were evening types, which is unusual for this population (Rae et al., 2015). This result could be explained by the phase delay of the circadian pacemaker noted for adolescents (Crowley et al., 2018). In the present study, swimmers are older than the other groups of athletes.

Results of the present study showed higher FIRST scores for golfers and handball players compared with soccer and volleyball players, and no differences between sports for PSQI. Despite the validity of the FIRST questionnaire among the general population, this questionnaire lacks specificity for the high-level sport context. The establishment of a new, specific questionnaire, to sensitively measure the vulnerability to sleep disturbances among young, high-level athletes, may be an

additional asset to the literature. Higher FIRST scores were noted for females compared with males ($\sim +3.9$ A.U.; $p < .001$), which is consistent with sleep difficulties reported elsewhere for female athletes compared with their male counterparts (Schaal et al., 2011). Between-sex differences were also noted for sleep duration, with females experiencing higher TSTs than males ($\sim +32.9$ min; $p = .003$). Taken together, these findings suggested that female athletes experienced increased sleep durations in common training settings but appeared to be more sensitive to sleep deterioration in response to stressful situations compared with male athletes. The effect of gender on generalized anxiety disorder and stress responsiveness may also account for this result (Schaal et al., 2011).

Practical applications

The present study showed that independent of the practiced sport, higher training loads were accompanied by earlier bedtimes, lower total sleep times, reduced subjective sleep quality, and increased sleep fragmentation. Moreover, adolescent, female athletes presented increased sleep disturbances in response to stressful situations, which may require individualized support. Thus, an objective sleep assessment at specific phases of the season should be implemented to foster appropriate sleep hygiene strategies.

Conclusions

In a controlled training and academic environment, adolescent, high-level athletes did not achieve the recommended sleep duration. Impaired sleep quality and quantity could be partially explained by increased training loads. Swimmers presented increased sleep fragmentation, training loads, perceived muscle soreness, and general fatigue compared with athletes who engaged in other sports. Independent of any sport-specific effects, a higher daily training load induced an earlier STM and reduced TST and perceived sleep quality, with higher sleep fragmentation. Moreover, female athletes experienced increased TST and poorer sleep quality in response to stress compared with those in males.

Acknowledgments

The authors are very grateful to the athletes, coaches, and medical teams for their efforts and involvement in this study. The results of the current study do not constitute any endorsement of the products used by the authors or the journal. This work was supported by an unrestricted grant from Bultex, France.

Synthèse de l'étude 1

Le sommeil est reconnu à ce jour comme la stratégie de récupération la plus importante pour les sportifs (Venter, 2014). Cependant, les premiers travaux portant sur l'évaluation du sommeil des sportifs rapportent une moindre qualité par rapport à la population générale et une grande variabilité inter et intra individuelle (Leeder et al., 2012; Whitworth-Turner et al., 2018). Plusieurs facteurs de stress spécifiques au contexte du sport de haut niveau ont été décrits pour expliquer ces résultats, dont, entre autres, la nature de l'activité pratiquée et la charge de l'entraînement, avec le niveau de fatigue qu'elle engendre (Nédélec et al., 2018).

L'objectif principal de la première étude de cette thèse était donc de décrire le sommeil des jeunes sportifs de haut niveau français pratiquant différentes disciplines, et de le mettre en relation avec la modification de la charge interne. Cette étude est observationnelle, réalisée dans un cadre écologique sans intervention particulière. Nous avons toutefois tenu à standardiser les conditions de réalisation de l'étude en recrutant seulement des jeunes sportifs de haut niveau, non élites, impliqués dans un double projet sportif et académique, pendant une phase d'entraînement. La charge de l'entraînement a été évaluée subjectivement par la méthode RPE-S et mise en relation avec les variables objectives (évaluées par actimétrie) et subjectives du sommeil en utilisant des modèles de régression linéaires mixtes. L'inclusion du participant comme effet aléatoire du modèle a permis d'introduire un coefficient propre à chacun et de prendre en compte l'individualité des réponses pour chaque variable dépendante.

Le résultat principal de cette étude montre un sommeil plus fragmenté pour les nageurs comparativement aux sportifs des autres disciplines. D'une façon similaire, les nageurs présentaient une charge interne perçue, des douleurs musculaires et une fatigue générale supérieures aux autres sportifs. Ces résultats suggèrent une relation étroite entre l'augmentation du volume d'entraînement, du niveau de fatigue associé, et la modification du sommeil, qu'il est nécessaire de confirmer avec des études plus contrôlées en utilisant la polysomnographie, pour accéder à l'architecture du sommeil. Indépendamment du sport pratiqué, cette étude a montré que l'augmentation de la charge interne de l'entraînement était accompagnée d'une réduction du temps total de sommeil et de la qualité de sommeil perçue, d'une légère avance de phase, décrite par des heures de coucher et de lever plus précoces, et d'un sommeil plus fragmenté. Bien que plusieurs études aient évalué l'effet de la privation et de la restriction de sommeil sur la performance et la récupération, les effets à long terme d'une légère réduction du temps de sommeil (~ 1-2 heures) et/ou d'une moindre qualité de sommeil ne sont à ce jour pas encore étudiés. Pourtant, d'un point de vue pratique, ces situations sont les plus observées dans le sport de haut niveau (Fox et al., 2020). Pour appuyer ce constat, le dernier résultat de cette étude montre une durée de sommeil d'environ 7 heures par nuit, qui est 1 à

2 heures en dessous des recommandations pour les adolescents (Hirshkowitz et al., 2015). De plus, les scores obtenus dans les différents questionnaires subjectifs de somnolence diurne, de qualité globale de sommeil, et de sommeil en réponse au stress témoignent d'une mauvaise qualité de sommeil pour un grand nombre de sportifs. Les effets de cette dette chronique et la moindre qualité de sommeil sur la performance, la récupération et à plus long terme, sur le risque potentiel de blessure, demeurent à ce jour inconnus et devraient faire l'objet de futures études afin de se rapprocher au plus de la réalité du terrain.

Dans une revue de la littérature réalisée par Roberts et al. (2019b), il a été rapporté que le sommeil des sportifs de haut niveau était également influencé par l'horaire des entraînements et/ou de compétition, particulièrement lorsque ces derniers sont réalisés en soirée. Cette variable n'a pas été prise en compte dans la première étude étant donné que les jeunes sportifs finissaient rarement les entraînements après 18-19h. Cependant, le principal objet de la deuxième étude de cette thèse était d'étudier l'influence de la réalisation d'un exercice en soirée sur la modification de l'architecture du sommeil auprès d'une population plus âgée.

Étude 2 : Effet de l'exercice à haute intensité réalisé en soirée sur le sommeil des coureurs à pied entraînés

Publication associée :

Aloulou, A., Duforez, F., Bieuzen, F., & Nédélec, M. (2019). The effect of night-time exercise on sleep architecture among well-trained male endurance runners. *Journal of Sleep Research*, e12964.

Study 2: The effect of night-time exercise on sleep architecture among well-trained male endurance runners

Abstract

Purpose: The aim of the present study was to investigate the effects of night-time (21:00) high-intensity, intermittent exercise on sleep architecture among well-trained athletes in a laboratory setting.

Methods: In a randomized, counterbalanced order, eleven well-trained male runners completed a simulated trail-running exercise (TRAIL) on a motorized treadmill and a resting condition (REST) (no exercise during the day). After each condition, nocturnal autonomic nervous system activity and core body temperature (CBT) were measured and sleep was analyzed using polysomnography and actigraphy. Markers of muscle damage (maximal voluntary contraction [MVC], plasma creatine kinase concentration [CK] and perceived muscle soreness) were recorded before and immediately (POST), 24 h (H24) and 48 h (H48) after exercise.

Results: TRAIL induced a high level of fatigue and mild exercise-induced muscle damage, as determined by a reduction in MVC (-8.4%, $p < 0.05$, $d = -1.23$) and increases in [CK] (+179.0%, $p < 0.01$, $d = 1.58$) and perceived muscle soreness (+4.5 UA, $p < 0.01$, $d = 2.17$) compared with REST at H24. A trend for increased non-rapid eye movement (+4.2%; $p = 0.07$; $d = 0.86$) and reduced rapid eye movement (-4.8%; $p = 0.07$; $d = -0.87$) during sleep was observed for TRAIL compared with REST. Moreover, compared with REST, TRAIL significantly increased CBT and nocturnal HR during the first part of the night.

Conclusion: Sleep architecture was modified after night-time, high-intensity exercise among well-trained runners.

Keywords: High-intensity running exercise, heart rate variability, polysomnography, core body temperature, muscle damage

Introduction

Ensuring balance between training load and recovery is essential for optimal athletic performance and success in competition (Mujika et al., 2018; Nédélec et al., 2013). Both athletes and the scientific community agree that sleep is one of the most important components for recovery in elite sport (Halsen, 2008; Venter, 2014). Moreover, a growing body of scientific evidence confirms the negative impacts that sleep loss can have on physical performance (Mougin et al., 1989) and cognitive processing (Fullagar et al., 2016b; Jarraya et al., 2013), and sleep loss can increase the risk of injury (Milewski et al., 2014). However, elite athletes display impaired sleep compared with age and sex matched non-sporting controls (Leeder et al., 2012). The sleep duration recommended for adults, 7-9 h per day, is not achieved by the majority of athletes (Hirshkowitz et al., 2015; Leeder et al., 2012). Elite sport poses a significant challenge to the ability of an athlete to achieve optimal sleep, due to the physiological and psychological demands and training/competition schedules that are associated with elite sports (Gupta et al., 2016). The media industry currently requires athletes to perform in several night-time competitions (starting at 21:00 or later) throughout a season, which may have consequences for both sleep and recovery (Gupta et al., 2016). Fullagar et al. (2016b) reported decreased sleep quantity (-181 min) and subjective sleep restfulness following a night match compared with a training day.

Some physiological mechanisms have been proposed to explain the detrimental impacts of night-time exercise on sleep, such as thermoregulation and autonomic nervous system modulation (Roberts et al., 2019b; Uchida et al., 2012). Exercise-induced core body temperature (CBT) elevation (1.5-2°C) (Robey et al., 2013) could potentially hinder the normal pre-sleep rate of CBT decline, which could subsequently modify sleep architecture (Kräuchi, 2007) and increase arousal during the night (Roberts et al., 2019b). Exercise-induced modulations of the autonomic nervous system (*i.e.*, sympathetic hyperactivity) may also interact with sleep architecture (Uchida et al., 2012). However, it remains unclear whether night-time exercise-induced increased CBT and sympathetic hyperactivity are responsible for altered sleep quantity and quality among athletes.

Few studies have examined the impacts of night-time exercise on sleep among athletes using polysomnography (PSG) in a laboratory setting. Myllymaki et al. (2011) reported an increase in non-rapid eye movement (NREM) and a decrease in rapid eye movement (REM) sleep after an incremental cycle ergometer test until exhaustion (started at approximately 21:00) in physically fit young adults ($\dot{V}\cdot\text{O}_{2\text{max}} = 54 \pm 8 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, age 26 ± 3 years). Conversely, other authors have not reported any modifications in sleep architecture after a variety of physical exercises (starting between 18:30 and 21:20) among normal sleepers with different levels of fitness (Bulckaert et al., 2011; Oda & Shirakawa, 2014; Robey et al., 2013). The diversity among the exercise start times,

the fitness levels of participants, and the physical exercise protocols used, including differences in intensities and durations, may account for the discrepancies between results. Additionally, weight- and non-weight-bearing physical activity may induce different levels of muscle damage (Halson, 2011), and the influence of exercise-induced delayed-onset muscle soreness on sleep quantity and quality is still a matter of debate (Hauswirth et al., 2014; Ohayon, 2009).

The aim of the present study was to investigate the effects of a night-time (21:00), high-intensity, intermittent running exercise on sleep architecture among well-trained athletes in a laboratory setting. We hypothesized that intense exercise performed close to bedtime would negatively affect sleep architecture compared with a resting condition.

Methodology

Participants

Twelve well-trained male runners training three to five times a week, were recruited for this study. The design consisted of a familiarization session and two experimental conditions: a simulated trail-running exercise (TRAIL) and no exercise during the day (REST). Participants were asked to abstain from physical activity during the two experimental conditions, which were conducted during the summer (Northern hemisphere). They were instructed to sleep in the same home environments throughout the study. Eleven participants (age: 32.3 ± 5.2 years, body mass = 67.4 ± 6.7 kg, height = 176.9 ± 6.4 cm, maximal aerobic speed [MAS] = 18.2 ± 1.5 km·h⁻¹, maximal oxygen uptake [$\dot{V}\cdot\text{O}_{2\text{max}}$] = 69.0 ± 6.5 mL·min⁻¹·kg⁻¹) completed the protocol. The experiments were conducted according to the Helsinki Declaration (1964: revised in 2001), and the protocol was approved by the local Ethics committee (East III, France. Ref. 170605). All participants underwent a detailed medical history and examination, including an electrocardiogram at rest, and provided their written informed consent before the initiation of the experiments. Exclusion criteria checked prior to the start of the study were as follows: i) an average sleep duration > 9 h or < 6 h per night from Sunday to Thursday; ii) an average lights-out time earlier than 21:00 from Sunday to Thursday; iii) an average wake-up time later than 09:00 from Monday to Friday (Arnal et al., 2016); iv) the daily consumption of alcoholic beverages or more than 300 mg of caffeine per day or the use of antidepressant medications during the last year; v) excessive daytime sleepiness (*i.e.*, Epworth Sleepiness Scale > 12), sleep complaints (*i.e.*, Pittsburg Sleep Quality Index > 5) and a non-intermediate chronotype or moderately morning type on the Horne and Ostberg questionnaire (*i.e.*, < 42 and > 69) (Arnal et al., 2016); vi) polysomnography-confirmed sleep disorders, such as sleep apnea (apnea-hypopnea index > 10), and shift-workers. One participant was diagnosed with sleep apnea (apnea/hypopnea index = 11.4 events per hour) during the familiarization session and was

consequently excluded from the study. Participants with a mean total sleep duration between 7–8.5 h/night, $\dot{V}\cdot\text{O}_{2\text{max}} > 60 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $\text{MAS} > 16.5 \text{ km/h}$ were included in the present study.

Familiarization session

The familiarization session was conducted at least one week before the experimental conditions and included the following: i) a familiarization with the protocol of lower limb muscle strength assessment using the isokinetic ergometer ii) a short period ($\approx 5\text{min}$) of downhill running on the treadmill, with the purpose of familiarization without inducing muscle damage iii) a familiarization night with the PSG portable device in the same home environment as for the experimental nights to avoid the first night effect (Agnew et al., 1966).

Experimental conditions

In a randomized, cross-over, counterbalanced order, participants performed the two experimental conditions (REST and TRAIL). The ambient temperature in the laboratory was $23.8 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$, and the humidity was $39.3 \pm 4.6\%$. Participants arrived at 20:00 to begin the testing battery (PRE), including the isometric maximal voluntary force assessment of knee extensors, subjective ratings of muscle soreness, and blood sampling (Figure 14). At 21:00, they performed the simulated trail-running exercise (TRAIL) or sat quietly (REST). Then, the test battery was repeated (POST), and participants took a standardized 5-minute shower and ate a standardized meal at 22:30. Food intake was standardized for all athletes during the entire study period. All athletes were provided with a meal plan composed by a nutritionist. The meal plan included a variety of breads, cereals, milk/yogurts, meats, pasta/rice, fruit, and vegetables to ensure the adequate intake of macro- and micronutrients. Finally, the PSG equipment was set up (taking approximately 30 minutes) by a qualified practitioner, and participants went home to sleep in their usual environment. The room temperature was $24.3 \pm 3.2^{\circ}\text{C}$ for the TRAIL condition and $24.3 \pm 3.0^{\circ}\text{C}$ for the REST condition. Humidity was $55.3 \pm 7.5\%$ and $53.0 \pm 2.9\%$ for TRAIL and REST, respectively (Kestrel® 4500 Pocket Weather® Tracker, United-States). Participants returned to the laboratory 24 (H24) and 48 (H48) hours post-exercise for the same battery of tests to be performed.

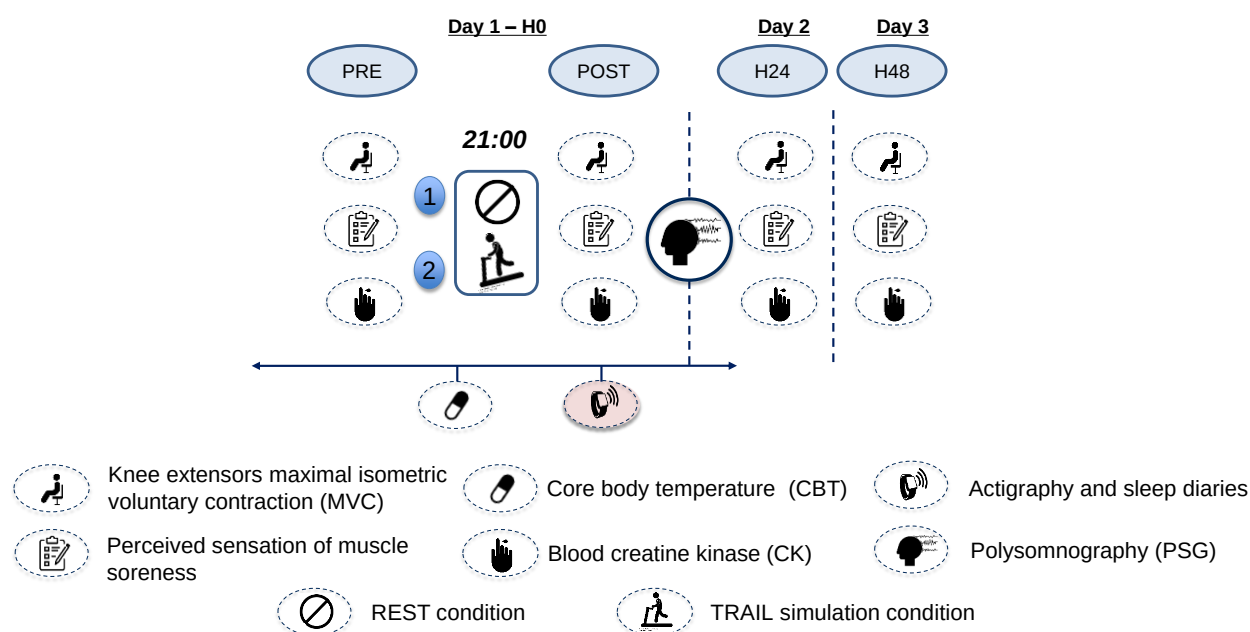


Figure 14: Experimental design (study 2)

Simulated trail-running exercise

Prior to the study, each participant performed an incremental test on a motorized treadmill (H/P/CosmosH Saturn, Traunstein, Germany) to assess MAS and $\dot{V}O_{2\max}$. For the TRAIL condition, participants completed a simulated trail-running exercise protocol. Adapted from (Hausswirth et al., 2011), this protocol was shown to elicit a significant level of fatigue and muscle damage. The exercise lasted 48 minutes, with a 3-minute warm-up period (at a velocity of $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) followed by five 9-minute blocks. Each block included 3 minutes of downhill running (-12.5% gradient), 3 minutes of flat running (0% gradient), and 3 minutes of uphill running (+10% gradient) (Figure 15). During the downhill segments, velocity was individualized and set to 80% of the MAS achieved during the familiarization session. The flat block included three one-minute runs at 100%, 60% and 100% of MAS. During the uphill block, the velocity was set to 60% of MAS. Fluid intake was ad libitum both during and after the run.

Sleep analysis

Polysomnography recordings were obtained during the first night of each condition by a portable device (Nox A1, Resmed, United States), following the technical specifications of the American Academy of Sleep Medicine manual for the scoring of sleep and associated events (Berry et al., 2017). The PSG montage included 6 electroencephalography channels placed according to the international 10-20 electrodes placement system (F3-M2, F4-M1, C3-M2, C4-M1, O1-M2, O2-M1); left and right electro-oculography; two chin electromyography channels, placed on the mentalis and submentalis; bilateral tibial electromyography; electrocardiography; and rib cage and

abdominal wall motion via respiratory impedance. All data were scored using Noxturnal software version 5.1 (Resmed, United States) in 30-s epochs, according to the 2007 American Academy of Sleep Medicine criteria (Silber et al., 2007). Each experimental night was analyzed by two different trained specialists. Two distinct analyses were performed, one for the whole night and one for the first 180 minutes after sleep onset (Robey et al., 2013).

Actigraphy data were collected using an actiwatch worn on the non-dominant wrist (Camntech, Motion Ware 8, Cambridge, UK). The recorded data were scored automatically using Sleep

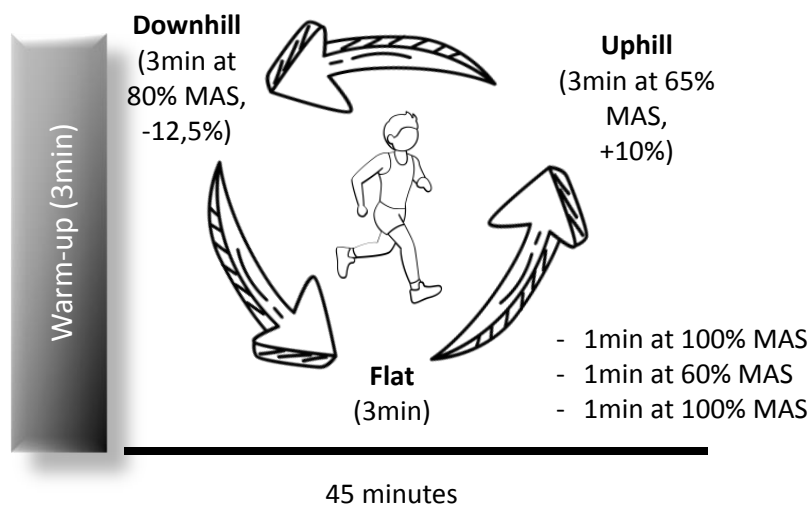


Figure 15: Schematic representation of the simulated trail protocol (total duration = 48 minutes)

Analysis software (Version 7.43, Camntech, Cambridge, UK), which indicated whether the participant was awake or asleep for each 60-s epoch. The actigraphy method has been shown to be reliable and valid for the objective measurement of sleep, with a sleep-wake threshold that has a high sensitivity to sleep (≥ 80 activity counts is scored as wake) generating the smallest mean biases compared with PSG for total sleep time, sleep efficiency and wake after sleep onset among endurance athletes (Sargent et al., 2016). A sleep-wake threshold that has a high sensitivity to sleep was accordingly applied to the present population of endurance athletes. The sleep variables were as follows: time in bed (TIB) was defined as the time between lights off (bedtime) and sleep end; sleep onset latency (SOL) was defined as the time between lights off and sleep onset; total sleep time (TST) was defined as the time spent asleep, as determined from sleep start to sleep end, minus any wake time; sleep efficiency (SE) was defined as the TST divided by the TIB (expressed as a percentage); wake after sleep onset (WASO) was defined as the total wake time, according to the epoch-by-epoch wake/sleep categorization; the fragmentation index (FI) was defined as the sum of the mobile time (%) and the immobile bouts ≤ 1 min (%). Actigraphy data were also collected during

five to fifteen days (BASELINE: 10 ± 6 days) before the start of the study to assess the sleep-wake cycle of each participant.

The Spiegel Sleep Inventory (SSI) was administered upon waking to assess the perceived sleep quality of each participant during BASELINE, TRAIL and REST conditions. The SSI is a self-administered questionnaire composed of 6 questions (score: 1-5) regarding sleep start, sleep quality and length, nocturnal awakenings, dreams, and feeling refreshed in the morning. The global score is the sum of the 6 items. There are few data available on the psychometric validity of the SSI; however, it is a very simple and easy-to-use scale that is often used to assess the presence of insomnia (Léger et al., 2006).

Core body temperature

At 18:00, during both the TRAIL and REST conditions, participants ingested a radiotelemetric pill (BodyCap, e-Celsius® Performance, France) to continuously record CBT. This method has been shown to be reliable and valid (Bongers et al., 2018), with an accuracy of 0.23 °C, an intra-class correlation coefficient of 1.00, and a standard error of measurement of 0.03. No data are presented between 22:30 and midnight due to artefacts caused by the meal consumption.

Nocturnal heart rate (HR) and heart rate variability (HRV)

The ECG signal was derived from the right midclavicular and around 6 cm under the left arm pit positions. The electrodes were connected to the polysomnographic system (Nox A1, Resmed, United States) and ECG data were continuously recorded at 200 Hz. Data were then converted into European data format and imported into Kubios HRV software (version 3.2, 2019, MATLAB, Kuopio, Finland) for further analysis. For each subject, nocturnal HRV and HR indexes were determined using the first 5min stationary segment (free from arousals) in the first slow wave sleep (SWS) sequence (determined via polysomnographic scoring) that lasted more than 15min. SWS was shown to better discriminate the state of sympathovagal balance than waking periods (Brandenberger et al., 2005). Heart rate was also assessed continuously and changes were reported as 30 min means for the first 5.5 hours of sleep. ECG waveforms were analyzed to obtain three frequency domain variables: low frequency (LF; 0.04–0.15 Hz), high frequency (HF; 0.15– 0.40 Hz) bands and the LF/HF power ratio during each 5-min spectrum.

Markers of fatigue and exercise-induced muscle damage

The isometric maximal voluntary force of knee extensors was assessed at a 90° knee angle and 100° hip angle with an isokinetic ergometer (Con-Trex Multi-Joint System, Dübendorf Switzerland). For each maximal contraction, the participants were instructed to extend their knees as fast and as hard

as possible for 5 s. Two isometric maximal voluntary contractions (MVC) of the knee extensor muscles were performed, with rest periods of 60 s. MVC performance was defined as the highest peak force value of the two trials. The test-retest reliability was assessed. The typical error was $9.5 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ (95% CI= 6.8 to 16.2), the intra-class correlation coefficient was 0.95 (95% CI= 0.83 to 0.98) and the coefficient of variation was 4.9%.

Subjective ratings of muscle soreness were assessed using a 10-cm visual analogic scale. Participants made a mark with a pen to indicate their subjective soreness ratings, which ranged from “no soreness” to “important muscle soreness” (Thompson et al., 1999). The question asked was, “what is your muscle soreness level?”

Blood creatine kinase concentration [CK] was assessed by collecting a 32- μl blood sample from a fingertip capillary puncture. The blood sample was then placed on a measurement strip and analyzed using a Reflotron (Roche Diagnostics, Grenzacherstrasse, Switzerland). The Reflotron was calibrated according to the manufacturer’s recommendations. The test-retest reliability was assessed. The typical error was 19.5 UA (95% CI= 13.6 to 34.1), the intra-class correlation coefficient was 0.95 (95% CI= 0.83 to 0.99) and the coefficient of variation was 9.7%.

Rating of perceived exertion (RPE) was assessed five times during the simulated trail protocol, at the end of each 9-min bloc. Participants answered the question, “How was your workout?” on a scale from 0 (rest) to 10 (maximal) (Foster, 1998).

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using Statistica 7.0 (Stat Soft. Inc., OK, USA). The normality of the data distribution was assessed using the Shapiro-Wilk test. For fatigue markers (MVC, [CK], muscle soreness and general fatigue) the distributions deviated from normal distribution, and a statistical analysis using nonparametric tests was accordingly performed. A Wilcoxon matched-pairs test was completed to assess significant difference between the two conditions (TRAIL vs REST) at each time point (POST, H24 and H48). MVC and [CK] results are presented as the % of variation from PRE values. The delta of variation from PRE was used for muscle soreness and general fatigue. Levene’s test was performed to assess the homogeneity of differences in variance. For CBT and HR kinetics, two-way (condition x time) repeated-measures analysis of variance (ANOVAs) were conducted. Condition factor was TRAIL vs REST for both variables. Time factor was adapted for each variable. For CBT during exercise, six time points were used from exercise initiation to 100min post-exercise initiation with 20-min intervals. For CBT during the night, thirteen time points were used from 23h45 to 06h15 with 30-min intervals. For nocturnal HR, eleven time points were used from sleep initiation to 330min after sleep initiation with 30-min intervals.

The F-value and the degrees of freedom (d.f.) were presented for each significant main effect. Student's paired t-tests with the Bonferroni correction method were used for post hoc pairwise comparisons when a significant main effect for the interaction between time and condition was observed. Differences between conditions for actigraphy, PSG, HRV, mean CBT and mean HR values were tested for significance using the Student's paired t-test or Wilcoxon test, depending on the normality of data distribution. Effect sizes (ES) were calculated to interpret the magnitude of the mean difference between conditions with $d < 0.2$, $d = 0.2-0.5$, $d = 0.5-0.8$ and $d > 0.8$ considered as trivial, small, moderate and large, respectively (Cohen, 1988). Correlations were analyzed using the Pearson product-moment correlation coefficient (r). Results are expressed as the mean $\pm$ standard deviation (SD). The level of significance was set at $p < 0.05$.

Results

Effect of the simulated trail-running exercise protocol on sleep, nocturnal heart rate and core body temperature

Polysomnography. Whole night. The light sleep proportion (N1+N2) was significantly higher (+6.9%; $p < 0.05$; CI 95%: -0.2 to 14.0%, $d = 0.86$) for TRAIL than for REST (Table 6). A large effect was observed for increased NREM sleep proportion (+4.2%; $p = 0.07$; CI 95%: -0.1 to 8.5%, $d = 0.86$) and decreased REM sleep proportion (-4.4%, $p = 0.07$; CI 95%: -8.9 to -0.1%, $d = -0.87$) for TRAIL compared with REST.

Table 6: Polysomnography, mean nocturnal heart rate and core body temperature during the whole night after resting (REST) and trail running (TRAIL) (n=11). T value was presented for t-test and z value for non-parametric Wilcoxon test, depending on the normality of data distribution.

	REST	TRAIL	p value	t/z value	d	Descripto r
Total sleep time (min)	392.3 ± 29.7	391.8 ± 42.8	0.97	-0.04	-0.01	Trivial
Time in bed (min)	414.7 ± 27.8	415.1 ± 42.3	0.97	0.03	0.01	Trivial
Wake after sleep onset (WASO) (min)	8.5 ± 7.0	9.2 ± 5.2	0.54	0.61	0.12	Trivial
Sleep Efficiency (SE) (%)	94.6 ± 2.8	94.8 ± 2.8	0.85	-0.20	-0.06	Trivial
Sleep onset latency (SOL) (min)	10.2 ± 8.8	10.8 ± 12.4	0.65	0.44	0.06	Trivial
REM latency (min)	97.9 ± 31.2	122.9 ± 44.7	0.13	1.64	0.62	Moderate
Wake (%)	2.1 ± 1.8	2.4 ± 1.4	0.42	0.42	0.18	Trivial
Stage N1 sleep (%)	8.8 ± 3.6	10.3 ± 3.6	0.33	1.01	0.41	Small
Stage N2 sleep (%)	35.0 ± 8.1	40.4 ± 5.2	0.09	1.83	0.79	Moderate
Light sleep (N1 + N2) (%)	43.8 ± 9.8	50.7 ± 5.6	<0.05	2.25	0.86	Large
Stage N3 sleep (%)	30.8 ± 5.7	28.0 ± 4.7	0.08	-1.95	-0.52	Moderate
NREM sleep (%)	74.6 ± 6.0	78.8 ± 3.3	0.10	1.81	0.86	Large
REM sleep (%)	23.2 ± 5.9	18.8 ± 4.1	0.07	-2.01	-0.87	Large
Arousals (n/h)	11.8 ± 2.6	12.0 ± 2.6	0.89	0.14	0.47	Small
Mean heart rate (bpm)	44.7 ± 8.2	49.3 ± 9.5	<0.01	4.16	0.53	Moderate
Mean core body temperature (°C)	36.47 ± 0.18	36.63 ± 0.14	<0.01	2.70	0.95	Large

First 180 minutes. Compared with REST, TRAIL significantly increased the wake after sleep onset (WASO, +2.5 min; $p < 0.05$; CI 95%: 0.3 to 4.7 min, $d = 1.01$) and light sleep proportion (+12.0%; $p < 0.01$; CI 95%: 2.9 to 21.0 %, $d = 1.17$) and decreased REM sleep (-6.3%; $p < 0.05$; CI 95%: -10.3 to -2.2%, $d = -1.37$) during the first 180 minutes of the night (Table 7)

Table 7 : Polysomnography, mean nocturnal heart rate and core body temperature during the first 180min after sleep start for resting (REST) and trail running (TRAIL) (n=11). T value was presented for t-test and z value for non-parametric Wilcoxon test, depending on the normality of data distribution.

	REST	TRAIL	p value	t/z value	d	Descriptor
Total sleep time (min)	178.2 ± 1.3	175.8 ± 3.2	0.04	-2.37	-1.01	Large
Wake after sleep onset (min)	1.8 ± 1.3	4.2 ± 3.2	0.04	2.37	1.01	Large
Wake (%)	1.0 ± 0.7	2.3 ± 1.7	0.04	2.35	0.99	Large
Stage N1 sleep (%)	6.1 ± 2.3	10.4 ± 4.2	<0.01	3.31	1.29	Large
Stage N2 sleep (%)	31.0 ± 9.3	38.7 ± 9.8	0.02	2.86	0.80	Large
Light sleep (N1 + N2) (%)	37.1 ± 10.6	49.1 ± 9.7	<0.01	4.18	1.17	Large
Stage N3 sleep (%)	48.9 ± 10.6	41.9 ± 12.3	0.11	-1.71	-0.61	Moderate
NREM sleep (%)	86.0 ± 5.2	91.0 ± 4.7	0.06	2.14	0.99	Large
REM sleep (%)	13.0 ± 5.2	6.7 ± 3.8	0.01	-2.99	-1.37	Large
Arousals (n/h)	10.7 ± 3.3	11.7 ± 4.0	0.57	0.58	0.46	Small
Mean heart rate (bpm)	45.2 ± 8.4	51.3 ± 10.4	<0.001	4.75	0.64	Moderate
Mean core body temperature (°C)	36.48 ± 0.26	36.74 ± 0.21	<0.001	4.85	1.13	Large

Actigraphy. There were no significant differences between TRAIL and REST for actigraphy variables except for bedtime which was 00:16 ± 00:17 min later ($p < 0.05$; CI 95%: 00:00 to 00:32 min; $d = 0.90$) in TRAIL (Table 8). Compared with BASELINE, bedtime was 00:38 ± 00:46 min later ($p < 0.05$; CI 95%: -00:07 to 01:24; $d = 0.83$) for TRAIL and 00:22 ± 00:46 min later ($p < 0.05$; CI 95%: -00:23 to 01:08; $d = 0.49$) for REST.

Subjective sleep evaluation. Compared with REST, the TRAIL condition decreased ($p < 0.05$) the total Spiegel score (-3.4 UA; CI 95%: -6.0 to 0.8 UA, $d = -1.21$), sleep initiation (-1.0 UA; CI 95%: -1.8 to -0.2 UA, $d = -1.19$), perceived sleep quality (-1.1 UA; CI 95%: -1.9 to -0.3 UA, $d = -1.30$) and nocturnal awakenings (-1.0 UA; CI 95%: -1.8 to -0.2 UA, $d = -1.17$) (Table 8). No significant differences were observed between REST and BASELINE.

Table 8 : Actigraphy and Spiegel sleep inventory data recorded during REST, TRAIL and prior to the study (BASELINE) (n = 10). T value was presented for t-test and z value for non-parametric Wilcoxon test, depending on the normality of data distribution.

	REST	TRAIL	p value	t/z value	d	Descriptor
<u>Actigraphy</u>						
Total sleep time (min)	401.0 ± 37.9	389.1 ± 46.0	0.13	-1.68	-0.28	Small
Time in bed (min)	419.9 ± 35.5	412.2 ± 41.2	0.14	-1.64	-0.20	Small
Bed time (hh:mm)	00:26 ± 00:17	00:42 ± 00:12	<0.01	3.71	0.90	Large
Wake-up time (hh:mm)	07:14 ± 00:39	07:16 ± 00:46	0.79	0.27	0.06	Trivial
Wake after sleep onset (WASO) (min)	10.1 ± 5.7	12.4 ± 7.5	0.19	1.30	0.35	Small
Sleep Efficiency (SE) (%)	95.5 ± 2.5	94.3 ± 4.6	0.36	-0.92	-0.30	Small
Sleep onset latency (SOL) (min)	7.0 ± 5.8	8.1 ± 13.2	0.77	0.30	0.11	Trivial
Sleep fragmentation (%)	22.8 ± 9.0	22.7 ± 6.6	0.97	-0.03	-0.01	Trivial
<u>Spiegel Sleep Inventory</u>						
Sleep initiation	4.6 ± 0.7	3.6 ± 1.0	<0.05	2.37	-1.19	Large
Sleep quality	3.6 ± 0.5	2.5 ± 1.1	<0.05	2.07	-1.30	Large
Sleep duration	3.0 ± 0.4	3.0 ± 0.8	1.00	0.00	0.00	Trivial
Nocturnal awakenings	3.8 ± 0.4	2.8 ± 1.1	<0.05	2.02	-1.17	Large
Dreams	4.1 ± 1.1	4.0 ± 0.9	0.72	0.37	-0.10	Trivial
Feeling refreshed in the morning	3.4 ± 0.7	3.2 ± 0.6	0.46	0.73	-0.30	Small
Total Spiegel score	22.5 ± 2.1	19.1 ± 3.4	<0.05	2.72	-1.21	Large

Nocturnal heart rate and HRV. Compared with REST, TRAIL significantly increased the whole night mean nocturnal HR by 4.7 ± 3.7 bpm ($p < 0.01$, CI 95%: -3.2 to 12.5 bpm, $d = 0.53$) (Table 6). The two-way ANOVA with repeated measures revealed main effects for time (d.f. = 11; $F = 30.1$; $p < 0.001$) and for the interaction between time and condition (d.f. = 11; $F = 6.0$; $p < 0.001$) on HR during the night. Significant differences between the two conditions in HR were observed for the first 3 h after sleep start (Figure 16). HRV analysis showed a moderate effect for decreased HF (-13.1%; $p = 0.12$; CI 95%: -33.5 to 7.2%, $d = -0.61$) and increased LF (+13.1%; $p = 0.12$; CI

95%: -7.2 to 33.5%, $d = 0.61$) and LF/HF ratio (+ 1.4%; $p = 0.17$; CI 95%: -0.7 to 3.4, $d = 0.64$) in TRAIL compared with REST.

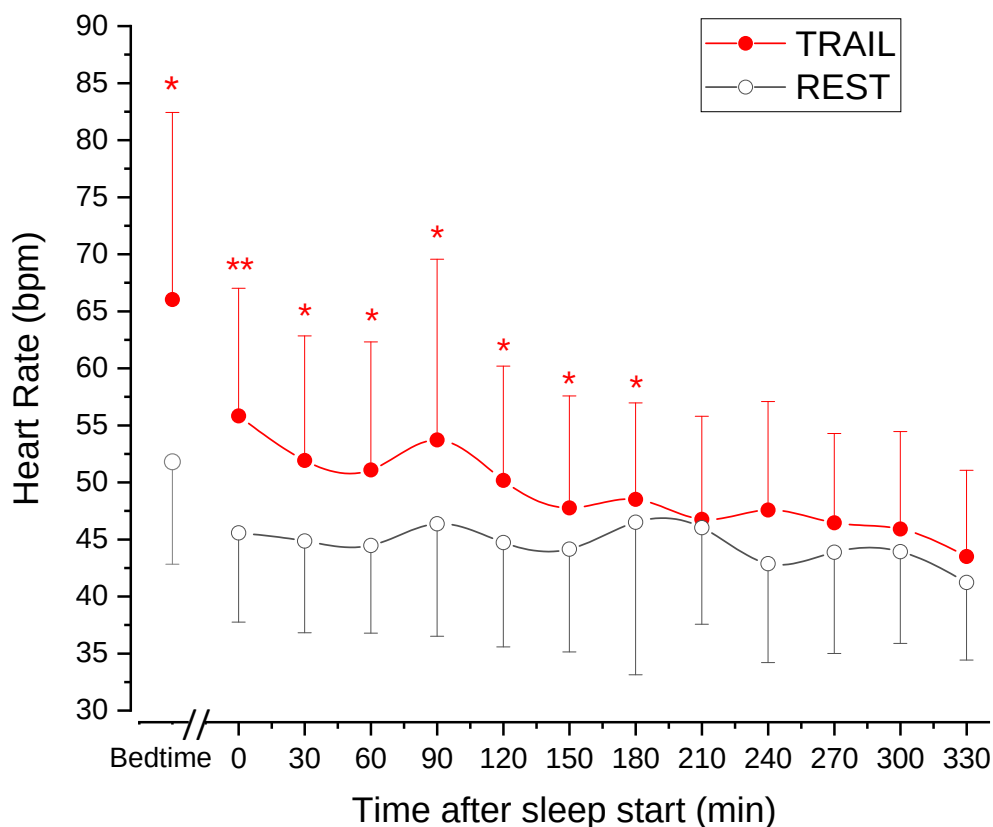


Figure 16: Changes in nocturnal heart rate over the first 5.5 h of sleep after TRAIL and REST conditions. All data are presented as mean $\pm$ SD. Significant difference from REST: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

Nocturnal core body temperature. Compared with REST, TRAIL significantly increased the mean CBT during the night by $0.15 \pm 0.16^{\circ}\text{C}$ ($p < 0.01$, CI 95%: 0.00 to 0.31°C , $d = 0.95$) (Table 6). The two-way ANOVA revealed a significant main effects for time (d.f. = 12; $F = 9.3$; $p < 0.001$) and the interaction between time and condition (d.f. = 12; $F = 2.7$; $p < 0.001$) for CBT during the night. Significant differences between the two conditions were observed at 00:30, 01:00, 01:30 and 03:30 ($p < 0.05$) (Figure 17). At sleep start, CBT was significantly higher during TRAIL compared with REST (+ 0.38°C ; $p < 0.05$; CI 95%: 0.16 to 0.61°C , $d = 1.55$).

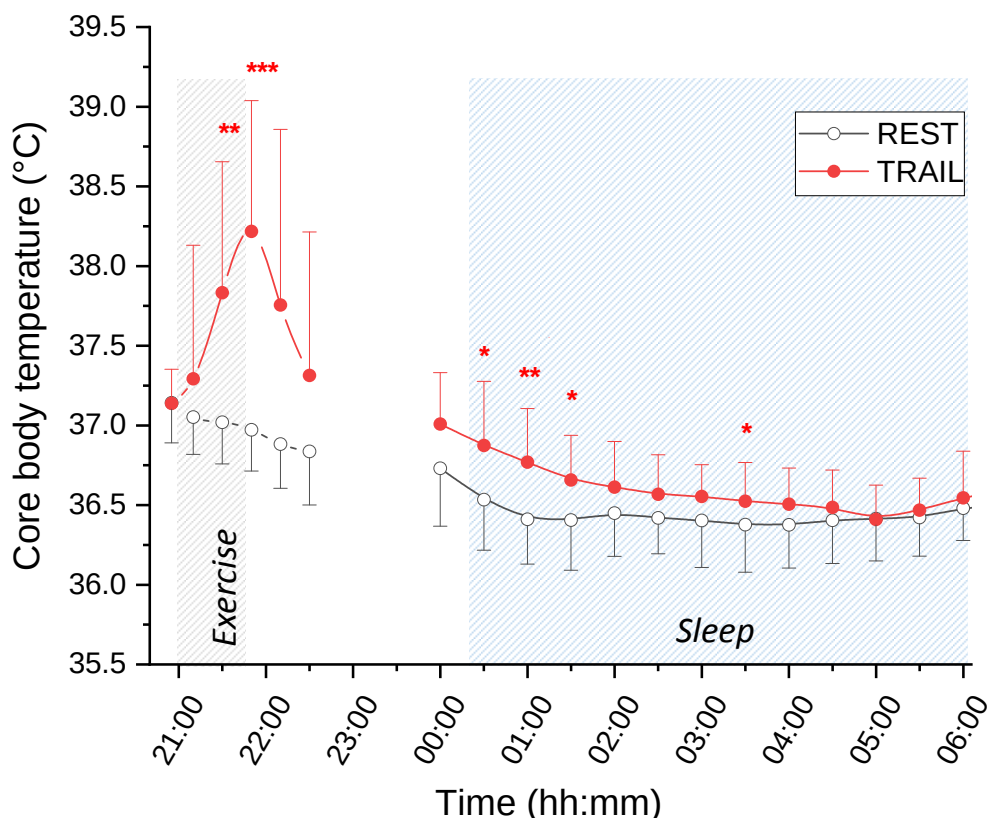


Figure 17 : Changes in core body temperature (CBT) after TRAIL and REST conditions. All data are presented as mean $\pm$ SD. Significant difference from REST: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

Simulated trail-running exercise protocol

The mean HR during TRAIL was $83 \pm 4\%$ of the maximal HR (min-max; 76-88%). The RPE at the end of each 9-min block was as follows in chronological order: 6.7 ± 1.4 UA, 7.9 ± 1.0 UA, 8.9 ± 1.0 UA, 8.9 ± 0.9 UA and 9.1 ± 1.2 UA (end of TRAIL). A significant main effect was observed for the interaction between time and condition ($p < 0.01$) for CBT during the exercise (Figure 17). At the beginning of exercise, CBT was 37.17 ± 0.22 °C for TRAIL and 37.11 ± 0.27 °C for CONT. At the end of TRAIL, CBT was significantly increased ($p < 0.001$) by 1.40 ± 0.43 °C compared with REST (38.43 ± 0.72 °C and 36.97 ± 0.27 °C, respectively).

Recovery kinetics after the simulated trail-running exercise protocol

No significant differences were observed between the two conditions among the PRE values for MVC (REST: 199.8 ± 38.7 and TRAIL: 204.2 ± 43.8 N·m⁻¹), [CK] (REST: 234.3 ± 76.3 and TRAIL: 190.9 ± 73.0 IU·L⁻¹), or muscle soreness (REST: 1.5 ± 1.7 and TRAIL: 1.4 ± 1.5 UA).

Isometric maximal voluntary contraction (MVC) of knee extensors

The results indicated a large effect for the observed declines in MVC during TRAIL compared with REST at POST (- 8.5%, $p < 0.01$, CI 95%: -13.4 to -3.6%, $d = -1.55$) and H24 (- 9.4%, $p < 0.01$, CI 95%: -15.6 to -3.6%, $d = -1.36$) and a moderate effect at H48 (- 7.7%, $p = 0.09$, CI 95%: -16.6 to 1.2 %, $d = -0.77$) (Figure 18a).

Creatine kinase concentration [CK]

Large effects were observed for increased [CK] during TRAIL compared with REST at POST (+43.5%, $p < 0.01$, CI 95%: 31.6 to 55.5%, $d = 3.2$), H24 (+176.0%, $p < 0.01$, CI 95%: 70.7 to 281.4 %, $d = 1.49$) and H48 (+86.8%, $p < 0.01$, CI 95%: 25.3 to 1148.3, $d = 1.26$) (Figure 18b).

Muscle soreness

A large effect for increased muscle soreness after TRAIL compared with REST was observed at POST (+3.5 UA, $p < 0.01$, CI 95%: 1.8 to 5.2 UA, $d = 1.86$) and H24 (+4.5 UA, $p < 0.01$, CI 95%: 2.5 to 6.4 UA, $d = 2.06$) and a moderate effect was noted at H48 (+2.2 UA, $p < 0.01$, CI 95%: -0.8 to 5.2 UA, $d = 0.64$) (Figure 18c).

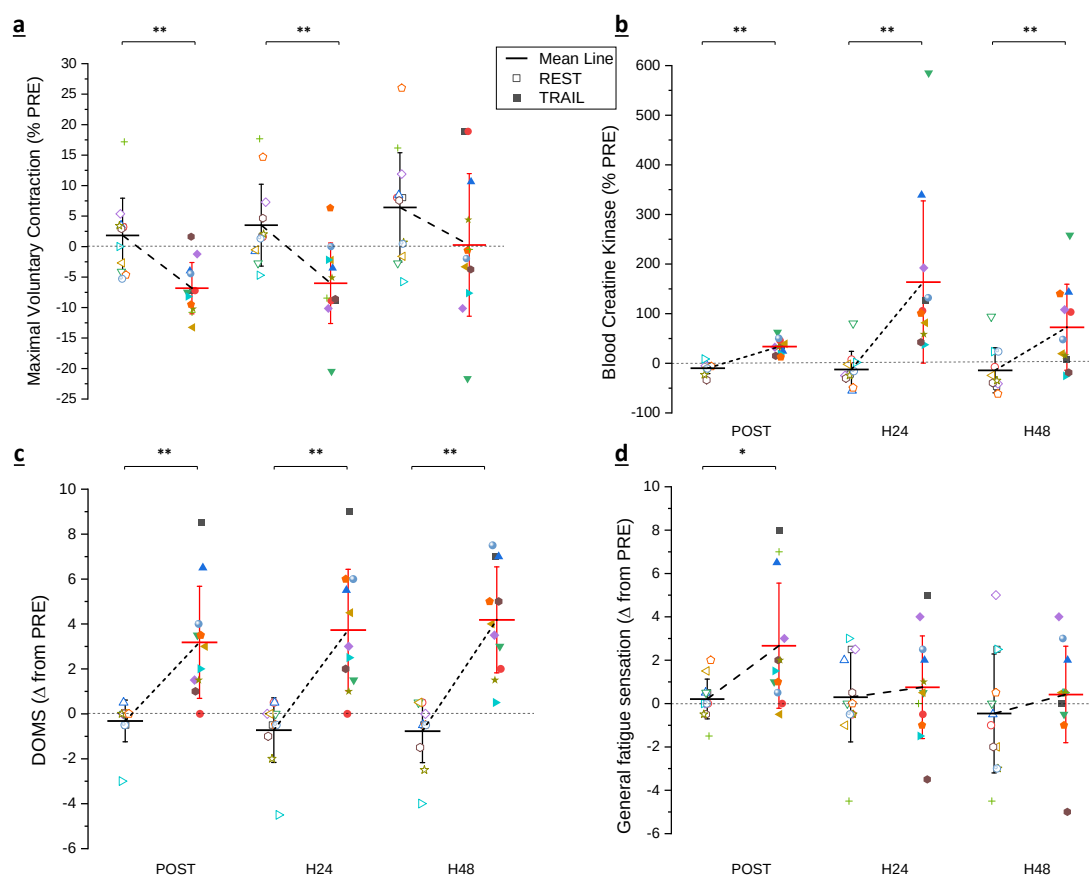


Figure 18: Change from PRE in MVC (a), CK levels (b), DOMS (c) and general fatigue perception (d) immediately after (POST), 24 (H24) and 48 (H48) hours for REST and TRAIL conditions ($n=11$). All data are presented as mean $\pm$ SD. Significant difference from REST: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

Discussion

The aim of this study was to investigate the effects of a night-time, high-intensity, intermittent running exercise on sleep architecture among well-trained athletes. The primary results showed the following: i) the simulated trail-running exercise protocol significantly increased light sleep proportion and decreased REM sleep compared with a non-exercise condition ii) subjective sleep quality was impaired the night after the TRAIL and iii) core body temperature and heart rate were significantly increased during the first part of the night after TRAIL compared with REST.

In the present study, results showed that performing a simulated trail-running exercise ending approximately 2 h before bedtime modified the subsequent sleep architecture evaluated using polysomnography. Light sleep was significantly increased (+6.9%; $p < 0.05$; $d = 0.86$) and trends for increased NREM (+4.2%; $p = 0.10$; $d = 0.86$) and reduced REM (-4.4%; $p = 0.07$; $d = -0.87$) were observed for TRAIL compared with REST which suggests a modification of sleep architecture after night-time, high-intensity exercise among well-trained runners. Slow wave sleep, a component of NREM sleep, has been proposed to be the most restorative sleep stage. It is characterized by the increased secretion of growth hormone (Kern et al., 1995; Obal & Krueger, 2004), which is involved in muscle reconstruction/adaptation (Halsen & Juliff, 2017). Our results showed a trend for a moderate, but not significant, decrease in SWS proportion (-2.7%, $p = 0.08$, $d = -0.52$) for TRAIL compared with REST. A previous study conducted with trained athletes reported a significant decrease in SWS (-11.0%) during a taper period compared with a high-training-volume period (Taylor et al., 1997). In the present study, the negative impact of TRAIL on sleep may be due to exercise intensity and/or timing rather than volume. Mean HR during TRAIL was $83 \pm 4\%$ of maximal HR and RPE at the end of TRAIL was 9.1 UA. Additionally, TRAIL induced a significant decrease in MVC, and increases in [CK] levels and perceived muscle soreness until 48 hours after exercise. These results suggest that the exercise protocol induced a high level of metabolic and neuromuscular fatigue with the presence of mild muscle damage (Paulsen et al., 2012). However, it was not possible in our study to evaluate the relationship between the exercise-induced level and type of fatigue and sleep architecture. This was principally due to our reduced sample and the important inter-individual variability in the responses to fatigue markers. Future studies should be conducted to clarify this relationship, which, to our point of view, will lead to better understand sleep among athletes.

One originality of the present study is the inclusion of highly trained runners. To our knowledge, only two studies previously assessed the impact of late-night exercise on sleep using PSG with highly trained athletes (Kern et al., 1995; Robey et al., 2013). Kern et al. (1995) found a decrease in REM sleep after a moderate-intensity long-distance cycling exercise (120-150 km) performed

between 16:00 and 20:30. In the other hand, Robey et al. (2013) reported no modifications in sleep architecture after an intense cycling exercise (*i.e.*, 15 minutes at 75% peak power, followed by a 15-minute maximal time trial) that started at 18:30. Discrepancies between studies may be explained by different start times, which could interfere with the circadian regulation of the sleep-wake cycle (Halsø & Juliff, 2017), and/or the exercise mode (running vs cycling), which could lead to different levels of muscle damage, inflammation and muscle soreness (Halsø, 2011). Soreness and sleep are potentially linked, as the activation of the locus coeruleus and dorsal raphe is important for the occurrence of paradoxical sleep, and the activation of these areas also alleviates pain (Ohayon, 2009). This hypothesis is supported by the significant correlations obtained between the variations from PRE to H24 for muscle soreness, the whole-night REM sleep proportion ($r = -0.50$; $p < 0.05$; $n = 22$), and subjective sleep quality ($r = -0.63$; $p < 0.01$; $n = 22$). Future specific studies are necessary to explore the influence of exercise-induced delayed-onset muscle soreness on sleep architecture.

In the current study, two physiological mechanisms were evaluated during the night: the autonomic nervous system activity and CBT. It was previously suggested that sleep initiation is associated with the nocturnal circadian decline of CBT (Kräuchi, 2007), and that CBT downregulation could increase slow wave activity (Berger & Phillips, 1995). Our result showed that CBT significantly increased at the end of TRAIL ($+1.40 \pm 0.43^{\circ}\text{C}$) and remained higher during the first three hours of sleep compared with REST. In the same time, we reported an increase in light sleep ($+12.0\%$; $d = 1.17$) proportion and a reduction in both REM and SWS (-6.3% ; $d = -1.37$ and -7.0% ; $d = -0.62$, respectively) for TRAIL compared with REST. The first sleep cycles (4 to 5 h) usually contain a high proportion of SWS and are associated with the increased release of growth hormone (Kern et al., 1995), which is crucial for the enhancement of peripheral cellular restoration and recovery after exercise (Halsø & Juliff, 2017). A causal relationship between delta activity initiation and CBT decrease has been previously proposed (Berger & Phillips, 1995). VanSomeren (2000) proposed that the major brain region that drives heat loss, *i.e.* the preoptic area/anterior hypothalamus, may mediate this relationship. Moreover, at the cellular level, there is an overlap in neurons sensitive to heat and neurons changing their firing pattern following sleep (VanSomeren, 2000). Future studies are required to ascertain the potential relationship between exercise-induced core body temperature changes and sleep architecture.

Our result reported that the nocturnal HR was significantly higher during TRAIL compared with REST, especially during the first three hours of sleep. Moreover, TRAIL showed a trend for decreased HF and increased LF and LF/HF power ratio during the first SWS period, suggesting a sympathetic hyperactivity and a decreased vagal modulation. Previous studies reported similar

findings (Myllymaki et al., 2011; Oda & Shirakawa, 2014) with less trained subjects, which may explain that parasympathetic activity did not fully recover before sleep start even for athletes with very high level of fitness and used to train at night. However, our exercise intensity and design probably induced higher relative metabolic and neuromuscular fatigue which makes difficult the comparison with the previously mentioned studies.

Sleep quality was evaluated subjectively throughout the study, using the Spiegel Sleep Inventory (SSI). Significant decreases in sleep initiation, quality, and total Spiegel score and increase in perceived nocturnal awakenings were reported during TRAIL compared with REST. Conversely, SOL and WASO, two indicators of sleep quality, were not altered after TRAIL, as assessed by PSG. These results confirms that objective PSG sleep assessment should be preferentially used instead of subjective assessments when possible (Baker et al., 1999).

Limitations

The present study was conducted in a laboratory setting, and consequently, the psychological strain associated with competitive stakes (Juliff et al., 2017) was not investigated. Moreover, the inclusion of a condition pertaining to high-intensity exercise performed earlier during the day may allow to establishment of the specific impacts of exercise timing, rather than exercise load, on sleep architecture. Finally, three participants included in the study were morning type. Bedtime was slightly later for TRAIL compared to CONT ($\approx +15$ min) and baseline sleep-wake patterns ($\approx +38$ min). However, athletes usually exhibit later bedtime than usual after night competitions (Fullagar et al., 2016b).

Conclusion

The present study showed that night-time (21:00), high-intensity, intermittent running exercise moderately increased whole-night NREM and reduced REM sleep proportions among well-trained athletes compared with no exercise during the whole day. After exercise, the HR and CBT were elevated during the first three hours of sleep, which was associated with decreased REM and SWS proportions. Future studies are required to confirm the distinct influences of the exercise intensity and time on sleep architecture during the night.

Synthèse de l'étude 2

De nos jours, les enjeux financiers liés aux droits télévisuels engendrent de plus en plus de compétitions réalisées tardivement le soir dans le but d'atteindre les taux d'audience les plus élevés possible (Nédélec et al., 2019). Dans d'autres sports, certains sportifs élites sont engagés dans une autre activité professionnelle au cours de la journée, en plus de leur pratique sportive, et sont souvent contraints à des séances d'entraînement intense tard le soir. Bien qu'il soit à ce jour relativement bien admis que la réalisation d'une activité modérée le soir ne perturbe pas le sommeil (Stutz et al., 2018), peu de données existent sur l'effet d'une activité intense sur l'architecture du sommeil de sportifs entraînés.

La deuxième étude de cette thèse avait donc comme principal objectif d'évaluer l'influence de la réalisation d'un exercice intermittent à haute intensité en soirée sur la quantité et la qualité du sommeil de coureurs à pied bien entraînés. Le principal apport de cette étude, par rapport aux travaux existant dans la littérature, est l'évaluation du sommeil par polysomnographie auprès d'une population de sportifs bien entraînés. De plus, le matériel utilisé était transportable, ce qui nous a permis de nous affranchir du potentiel effet de la modification de l'environnement de sommeil. Le deuxième objectif de ce travail était d'étudier certains mécanismes physiologiques proposés dans la littérature pour expliquer l'éventuelle perturbation du sommeil à la suite de la réalisation d'un exercice intense à l'approche de l'heure de coucher. En effet, la réalisation de ce type d'effort augmente la température centrale, stimule le système nerveux sympathique et selon la nature de l'exercice réalisé, pourrait induire des dommages de la structure du muscle, avec l'apparition de douleurs musculaires à début différé. Ces différents mécanismes physiologiques sont directement impliqués dans la régulation du sommeil, sauf pour les dommages musculaires et la perception de la douleur où la relation avec l'architecture du sommeil ne fait pas encore consensus à ce jour.

Le principal résultat de cette étude est que la simulation de TRAIL réalisée en soirée a largement augmenté la proportion de sommeil léger, a réduit celle du sommeil paradoxal et modérément diminué la proportion de sommeil lent profond comparativement à une condition de repos. De plus, une comparaison entre les deux conditions lors des 180 premières minutes de sommeil a montré que cette partie de la nuit était la plus impactée par la simulation de TRAIL. La fréquence cardiaque et la température centrale étaient également significativement plus élevées après le TRAIL, seulement pendant la première partie de la nuit comparativement au repos. Cela confirme le lien entre l'hyperactivité sympathique, la régulation thermique et la qualité du sommeil (De Zambotti et al., 2018; Kräuchi & Deboer, 2010).

Dans la prochaine étude de cette thèse, nous nous appuierons sur la relation entre ces différents mécanismes physiologiques pour proposer et évaluer l'efficacité de deux stratégies d'exposition thermique sur l'amélioration de la qualité de sommeil.

Étude 3 : Effet de la cryothérapie corps entier et d'un matelas à haute conductivité thermique sur le sommeil à la suite d'un match officiel de rugby

Publication associée :

Aloulou, A., Leduc, C., Duforez, F., Piscione, J., Cheradame, J., Bieuzen, F., Thomas, C., Chennaoui, M., Van Beers P., & Nédélec, M. (2020). Effect of an innovative mattress and cryotherapy on sleep after an elite rugby match. *Medicine and Science in Sports and Exercise. Published Ahead of Print.*

Study 3: Effect of an innovative mattress and cryotherapy on sleep after an elite rugby match

Abstract

Introduction: This study aimed to explore the relationship between elite rugby union match and post-match sleep architecture and to investigate the effects of a high-heat capacity mattress (MAT) and a whole-body cryotherapy session (WBC) on post-match sleep architecture.

Methods: Nineteen elite male U23 rugby union players performed in three official matches, followed by three experimental conditions, in a randomized order: MAT, WBC, and no intervention (CONT). Match load was evaluated using global positioning system (GPS) trackers and video analyses. Sleep architecture was assessed by polysomnography (PSG). Core body temperature (CBT) and mattress surface temperature were monitored during sleep. Linear mixed-effects models were conducted to assess the effects of each experimental condition on sleep, with match load variables as covariates.

Results: A lower wake after sleep onset ($\beta = -10.5$ min, $p < 0.01$) and higher rapid-eye-movement sleep proportion ($\beta = +2.8\%$, $p < 0.05$) were reported for MAT compared with CONT. Moreover, a lower mean CBT ($\beta = -0.135^{\circ}\text{C}$, $p < 0.001$) and mean mattress surface temperature ($\beta = -2.736^{\circ}\text{C}$, $p < 0.001$) during sleep were observed for MAT compared CONT. Whole-body cryotherapy did not affect nocturnal CBT nor interfere with sleep architecture. For every 100-m increase in high-speed running distance, a higher slow-wave sleep (SWS; $\beta = +1.1\%$, $p = 0.05$) and lower light sleep proportion ($\beta = -1.2\%$, $p < 0.05$) proportion were observed. Conversely, for every 10 supplementary collisions, a lower SWS ($\beta = -1.9$, $p = 0.09$) and higher light sleep ($\beta = +2.9\%$, $p < 0.001$) proportion were observed.

Conclusion: MAT use had a positive effect on sleep architecture after an elite rugby union match, potentially through a more efficient nocturnal heat transfer.

Keywords: POLYSOMNOGRAPHY, CORE BODY TEMPERATURE, MUSCLE DAMAGE, RECOVERY, HEART RATE VARIABILITY, SLEEP ARCHITECTURE

Introduction

Rugby union is a high-intensity, intermittent sport, played worldwide (Duthie et al., 2003). During match play, high-speed running and collision-based activities, such as tackling, static holds, scrums, rucks, and mauls, have been shown to induce high levels of fatigue and muscle damage (McLellan et al., 2011a; Tavares et al., 2017). Professional teams play weekly matches and train twice daily for two or more consecutive days (McLean et al., 2010), which can make player readiness for competitions challenging. Therefore, the optimal management of the recovery process is required to minimize training- and competition-induced fatigue (Mujika et al., 2018). Sleep is recognized by the scientific community and by players to be a major component of the recovery process (Tavares et al., 2017; Venter, 2014). A previous study examining rugby union players showed that the mean sleep time was reduced by approximately one hour and sleep efficiency was reduced by approximately 4.5% on nights following a match compared with nights following regular training days (Shearer et al., 2015). Reductions in sleep quantity have been shown to negatively impact physical performance (Azboy & Kaygisiz, 2009) and increase injury risk (Von Rosen et al., 2016). Previous studies have also reported reduced sleep quality and quantity among rugby players compared with non-athletes controls (Caia et al., 2017a; Shearer et al., 2015). Consequently, post-match sleep conditions should be optimized to ensure that players experience the maximum levels of physical and psychological recovery (Dunican & Eastwood, 2017).

Sleep and thermoregulation are closely related (Kräuchi & Deboer, 2010; Van Someren, 2006). Sleep initiation is associated with the maximal rate of decline in core body temperature (CBT), which occurs through an increase in cutaneous temperature and heat loss from the periphery (Kräuchi & Deboer, 2010). Within the sleep period, lowering the minimum CBT has been suggested to increase slow-wave sleep (SWS) and to positively impact sleep quality (Krauchi et al., 2018; Togo et al., 2007). Krauchi et al. (2018) reported a higher proportion of SWS ($\approx 3.7\%$) when sleeping on a high-heat capacity mattress (MAT), which facilitates the continuous and slow removal of body heat via conductive heat transfer. However, this study was conducted on untrained subjects. To the best of our knowledge, MAT use on sleep quality and quantity after competitions has not been examined among elite athletes.

Whole-body cryotherapy (WBC: 3 min at -110°C) has been shown to decrease cutaneous temperature during the exposure, and to slightly reduce CBT ($\approx 0.3^{\circ}\text{C}$) after the exposure (Costello et al., 2012; Zalewski et al., 2014). Whole-body cryotherapy has also been shown to reduce actigraphic activity during sleep, which may potentially indicate a deeper sleep (Douzi et al., 2018; Douzi et al., 2019). However, CBT and sleep architecture were not assessed in these studies. Moreover, it is not clear whether the acute pre-sleep WBC cooling effect persists throughout the

night and interfere with sleep architecture. Earlier research stated that sleep and autonomic modulation are linked as higher delta activity during non-rapid eye movement (NREM) sleep has been associated with reduced sympathetic modulation (Bonnet & Arand, 1997). Heart rate variability (HRV) indices are higher directly after WBC exposure (Schaal et al., 2013) and during the first SWS sequence following a night-time exercise (Douzi et al., 2018). However, the relationship between WBC-induced parasympathetic hyperactivity during the early phase of NREM and the overall sleep architecture is still to be elucidated.

The aim of the present study was to investigate the effect of MAT - continuous cooling strategy during the night - and WBC - acute cooling intervention before the night - on sleep architecture and short-term recovery after an elite rugby union match. This study was designed to compare each intervention with a control condition. The secondary aim of this study was to investigate the potential effect of rugby match load variables on sleep architecture. We hypothesized that MAT use and WBC would enhance sleep compared with a control condition, and that a higher match load would negatively impact sleep architecture.

Methodology

Participants

Twenty-three elite male under-23 rugby union players, competing at the highest national French level, were initially recruited. Due to substitutions related to tactical choices, injuries, and player unavailability, nineteen players who participated in at least two conditions (CONT+WBC+MAT: $n=10$, CONT+WBC: $n=2$, CONT+MAT: $n=2$ and WBC+MAT: $n=3$), or only in the CONT condition ($n=2$), were included in the final analysis. Ten backs (mean $\pm$ SD; age: 20.8 ± 1.0 yrs; body mass = 91.4 ± 7.4 kg; height = 183.5 ± 8.5 cm) and nine forwards (mean $\pm$ SD; age: 20.6 ± 1.3 yrs; body mass = 111.7 ± 8.7 kg; height = 189.4 ± 8.8 cm) were included. The study was conducted according to the Helsinki Declaration (1964: revised in 2001), and the protocol was approved by the local ethics committee (East III, France. Ref. 170605). All players provided a detailed medical history and underwent a medical examination, including an electrocardiogram at rest. The players also provided their written informed consent before the initiation of experiments. The inclusion criteria were as follows: i) an intermediate or moderately evening type, according to the Horne and Ostberg questionnaire (*i.e.* < 58 and > 31); ii) free from PSG-confirmed sleep disorders, such as sleep apnea (apnea-hypopnea index > 10), periodic limb movement syndrome, hypersomnia, or narcolepsy; and iii) free from diabetes, severe hypertension, heart disease, anorexia, and bulimia.

Experimental sessions

The study was conducted over three weekends within the same month (April 2018). The study was designed according to a within-subject crossover comparison that finally resulted in unbalanced experimental conditions order due to substitutions, injuries, and player unavailability. The design consisted of one familiarization night and three experimental conditions: 1) High heat capacity MATtress (MAT) condition, during which players slept on a specific mattress (described elsewhere); 2) Whole Body Cryotherapy (WBC) condition, during which players spent 3 min in a specific chamber, at -110°C , two hours before bedtime ($\approx 21:30$, *i.e.* ≈ 4 h post-match); and 3) control (CONT) condition, during which players received no intervention after the match. The players were blinded to the MAT condition, and they were informed that the aim of the study was solely to evaluate the effects of WBC on sleep. For each of the experimental weekends, the entire team arrived at the training centre on Friday, played an official match on Saturday afternoon (15:00), and left the centre on Sunday afternoon (Figure 19). Sleep was only assessed on Saturday nights, following match play. However, one night of familiarization was conducted on the very first Friday of the experimental period (Agnew et al., 1966). On Saturday morning, baseline tests (BASELINE) were conducted at 09:00, before the first warm-up protocol; they were used to assess test-retest reliability. One hour after the match (around 18:00), the same testing battery (POST) was conducted as BASELINE. Dinner was served around 21:00. The meal was prepared by a nutritionist and included a variety of breads, cereals, milk/yogurts, meats, pasta/rice, fruit, and vegetables, to ensure the adequate intake of macro- and micronutrients. The same meal was replicated for each of the three conditions. The PSG equipment was assembled by a team of qualified practitioners (≈ 20 to 30 min for each player), and bedtime was set at 23:30. The following morning, wake-up was planned at 08:00. At 10:00, after breakfast, the same testing battery was conducted (D+1) to assess recovery status. During the PSG nights, room temperature and humidity were assessed continuously, using an iButton (DS 1922L, iButtonLink, Whitewater, USA; resolution 0.0625°C ; sampling rate: 1 value per minute), which was placed on the bedroom wall. No significant differences were noted in ambient temperatures (CONT = $21.6 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$; WBC = $20.8 \pm 1.3^{\circ}\text{C}$; MAT = $21.7 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$) or humidity (CONT = $52.9 \pm 11.2\%$; WBC = $52.4 \pm 8.2\%$; MAT = $53.1 \pm 6.2\%$) between conditions.

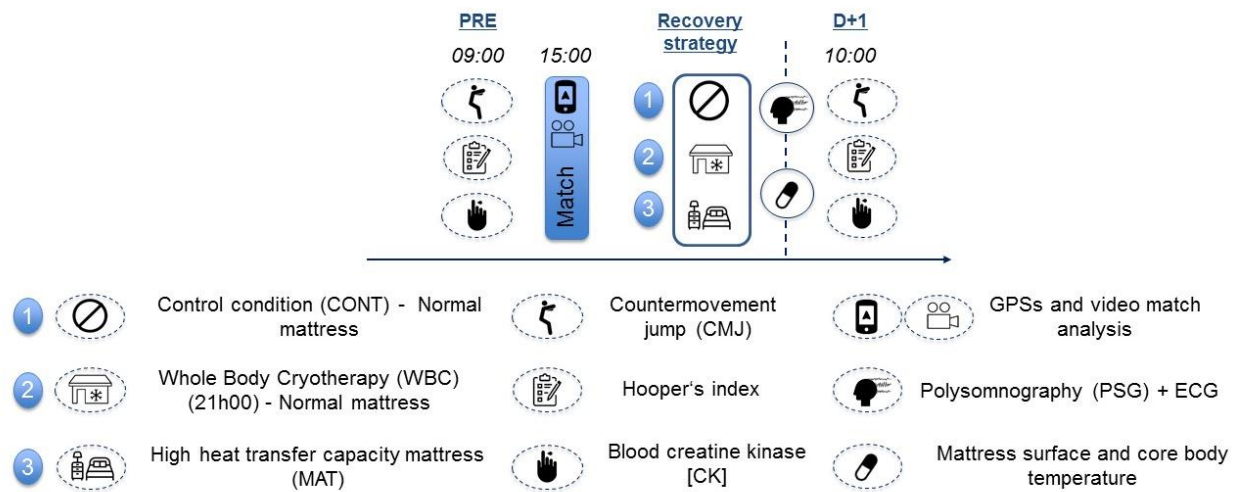


Figure 19: Experimental design (study 3)

Mattress properties

The mattress used for all conditions was composed of the following layers: i) an upper quilted panel, composed primarily of foam (thickness of 2.5 cm and density of 23 kg/m³); ii) a core comprised of a specific foam type (nano, Bultex, France), with a thickness of 16 cm and a density of 33 kg/m³; and iii) a lower quilted panel, composed primarily of foam (thickness of 1.8 cm and density of 23 kg/m³). For the MAT condition, we added a 6-cm polyurethane, high-heat capacity layer (Figure 20), with a density of 1.006 kg/m³ which allows the slow removal of body heat via conductive heat transfer (Krauchi et al., 2018). All mattresses used in the study were identical in size (100 × 200 × 23 cm). The same cover types (non-quilted textile, with a weight of 400 g/m²) and pillows were used throughout the study to avoid potential bias. Participants were required to sleep in the same clothes for all three conditions. The mattress surface temperature was continuously assessed with the same iButtons used to assess ambient temperatures, which were placed in the middle of the mattress, 60 cm from the top.

Match analysis

Global positioning systems (GPS) and video analyses were used to monitor the external workloads of each player during the three matches. Each player wore the same 16-Hz unit (Sensoreverywhere V2, Digital Simulation, Paris, France), in a Lycra vest that positioned the unit on the upper thoracic spine, between the scapulae. Data were downloaded after the game, and playing times were fixed for each player, to ensure that only game data were used for analysis. In this study, we focused on three GPS-derived locomotor variables: i) total covered distance (TD); ii) distance covered at high speeds (HS; > 5 m.s⁻¹); and iii) distance covered at low-speeds (LS; < 5 m.s⁻¹) (Lacome et al., 2017).

The GPS measures previously showed high levels of validity and between-device reliability for maximal sprinting and acceleration (Lacome et al., 2019). In addition, video analyses were conducted via the Hudl system (Sportstec, NE), to assess the total number of collisions during the match, which was calculated as the sum of offensive and defensive tackles, rucks, and contact hits (Jones et al., 2014).

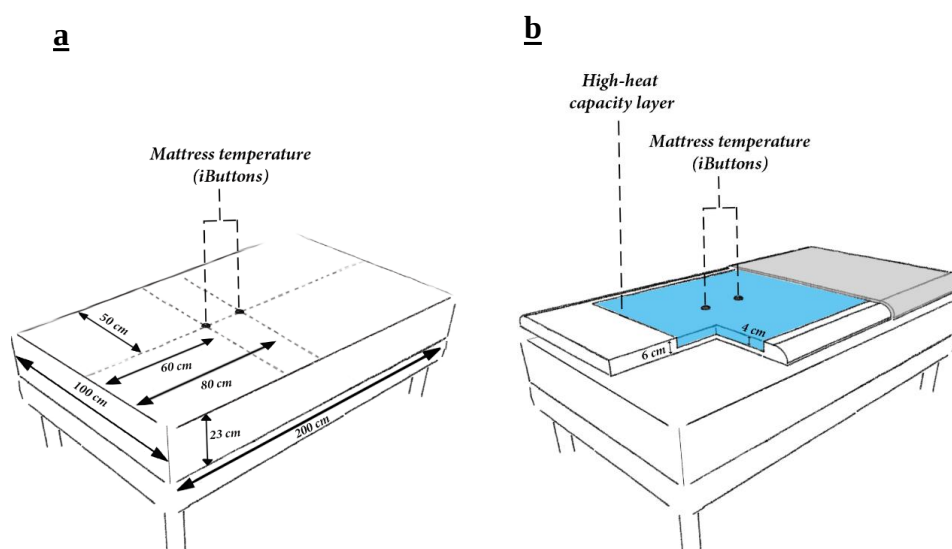


Figure 20: Figure that illustrates the bedding conditions: (a) CONT and WBC; (b) MAT

Sleep analysis

Polysomnography (PSG) recordings were obtained the night after each match using two types of portable devices (Nox A1, Resmed, United States [n=11] and Actiwave©, CamNtech Ltd., Cambridge, UK [n=8]). Each participant used the same device for all conditions. Both systems provided continuous monitoring of four electroencephalograms (F3-M2, F4-M1, C4-M1, O2-M1), two electrocardiograms (ECG), two electrooculograms (outer canthus of each eye), and two electromyograms (chin). Contralateral mastoid leads served as references for all unipolar measurements (electroencephalograms and electrooculograms). Polysomnography data were scored by two trained technicians who were assigned all the nights from one PSG model, and were blinded to the experimental conditions. The American Academy of Sleep Medicine (AASM) criteria were employed (Berry et al., 2017). Analyses were conducted using Noxturnal software version 5.1 (Resmed, United States) and Somnologica (TM; Medcare©, Reykjavik, Iceland). The sleep variables were measured as follows: sleep onset latency (SOL) was defined as the time between lights off and sleep onset; wake after sleep onset (WASO) was defined as the total wake time during the sleep period; total sleep time (TST) was defined as the time spent asleep, as determined from

sleep start to sleep end, minus WASO; sleep efficiency (SE) was defined as the TST divided by the time in bed (expressed as a percentage); and finally, light, SWS, rapid eye movement (REM) and non-rapid eye movement (NREM) were defined as the proportion of time spent in each of these sleep stages expressed as a percentage of TST.

Core body temperature (CBT)

During the afternoon, players ingested a radio telemetric pill (BodyCap, e-Celsius® Performance, France), to continuously record their nocturnal CBTs. This method has been shown to be reliable and valid (Bongers et al., 2018), with an accuracy of 0.23°C, an intra-class correlation coefficient of 1.00, and a standard error of measurement of 0.03.

Nocturnal heart rate (HR) and heart rate variability (HRV)

The ECG signal was derived from positions at the right midclavicular and approximately 6 cm under the left armpit. The electrodes were connected to the polysomnographic systems (Nox A1, Resmed, United States or Actiwave©, CamNtech Ltd, Cambridge, UK), and ECG data were continuously recorded at 200 Hz. Data were then converted into a European data format and imported into Somnologica Studio (version 2.0.1 Medcare-Embla®, Reykjavik, Iceland) for further analysis. This software has been used in previous sleep studies (Song et al., 2012). Nocturnal HRV and HR indexes were determined using the first 5-min stationary segment (free from arousals) in the first SWS sequence that lasted for longer than 15 min. Slow wave sleep has been shown to be better for discriminating sympathovagal balance states than waking periods (Brandenberger et al., 2005). All data acquisition and analyses were performed in accordance with established standards (Task Force, 1996). Electrocardiogram waveforms were analyzed to obtain temporal and frequency domain components. Time-domain variables, including mean R-R interval (RRI) and the root mean square standard deviation (RMSSD) of RRI, were assessed. Frequency domains were assessed for low- (LF; 0.04–0.15 Hz) and high-frequency (HF; 0.15– 0.40 Hz) bands and the ratio of LF/HF during each 5-min spectrum. Mean HR was calculated using the following formula: $HR \text{ (bpm)} = 1 / R\text{-}R \text{ (sec)} * 60$.

Markers of fatigue and subjective assessments

Markers of peripheral fatigue and exercise-induced muscle damage included countermovement jump performance (CMJ), blood creatine kinase concentration ([CK]), and perceived delayed-onset muscle soreness (DOMS). These indicators were obtained at BASELINE and at D+1 (Figure 19).

Countermovement jump (CMJ) performance was assessed to evaluate neuromuscular fatigue. Prior to testing, players performed a 10-minute dynamic warm-up, consisting of active mobility and progressive lower-body loading using lunges, step-ups, and squats. Jump assessments required each

participant to perform unloaded CMJs, with a wooden stick placed on their shoulders. The CMJ mean force (CMJ-F) was assessed using a portable linear encoder device (GymAware Power Tool, Kinetic Performance Technologies, Canberra, Australia) (Mathieu et al., 2017). Each participant performed four repetitions, pausing for approximately 3-5 s between each jump. The mean of the trials (excluding the best and the worst trial) was calculated and used as a marker of neuromuscular performance. A typical error of the mean (TEM) of 177.4 N, an intraclass correlation coefficient (ICCC) of 0.87, and a coefficient of variation (CV) of 8.6% were obtained.

Blood creatine kinase concentration ([CK]) was assessed by collecting 500 µl of blood from fingertip capillary punctures, which were stored in a microtube containing lithium heparinase (BD Microtainer, BD, New Jersey, US). Within one hour after the blood collection, 32 µl of each sample was taken from the tube, using a specific pipette, and placed on a measurement strip. Analyses were performed using a Reflotron Sprint (Roche Diagnostics, Grenzachstrasse, Switzerland). The Reflotron was calibrated according to the manufacturer's recommendations. A TEM of 65.7 IU·L⁻¹, an ICCc of 0.99, and a CV of 10.6% were obtained for [CK] measurements.

Subjective assessments

The well-being Hooper Index is a rating of general fatigue, DOMS, stress, and sleep perception. Players were asked to subjectively evaluate, twice for each condition (PRE and D+1), the four items, using a 1-7 scale, with 1 representing the most positive rating and 7 representing the most negative rating, for each variable. The Hooper index was calculated as the sum of all four scores. Each variable was presented separately (Hooper & Mackinnon, 1995).

Rating of perceived exertion of the session (sRPE) was assessed for each player at the end of each match. Players answered the question “How was your workout?” using a scale from 0 (rest) to 10 (maximal). The obtained score was then multiplied by the playing duration for each player (Quarrie et al., 2017) and recorded as arbitrary units (AU).

Perceived thermal comfort (on a scale from -2 “very uncomfortable” to +2 “very comfortable”) and *sensation* (on a scale from -3 “cold” to +3 “hot”) (Zhang & Zhao, 2008) was recorded for each player the morning after each post-match night.

The total quality of recovery (TQR) scale was reported by the players in the morning, after each post-match night. Scores varied from 6, “very, very poor recovery,” to 20, “very, very good recovery” (Kenttä & Hassmén, 1998).

Statistical analysis

Three types of linear mixed-effects models were fitted with regards to the dependent variables (DVs) tested and the research question. Table 9 provides an overview of the models' designs. For the second type of model, the variations between each experimental condition and the CONT condition for each DV were adjusted according to the number of collisions and the HS distance recorded for each player. These two variables represented the most important components associated with rugby union match-related metabolic and neuromuscular fatigue (Jones et al., 2014). All models were fitted using the "*lme*" function of the *nlme* package in the R program (version 1.1.456). Data are presented as the estimate (β), the standard error (SE), the 95% confidence interval (CI), and the P-value. For the interpretation of the models, the intercept represented the mean CONT value of the DV when the fixed effects were null. The effects of MAT and WBC on mattress surface temperature kinetics (8 time points, with 1-h intervals) compared with the CONT condition were assessed using a two-way (condition $\times$ time) repeated-measures analysis of variance (ANOVA). Multiple Student's paired t-tests, with Bonferroni correction, were then used for post hoc pairwise comparisons when a significant interaction between time and condition was observed. The level of significance was set at $p < 0.05$.

Table 9: Outline of models' details (the random and fixed effects) used for each dependent variable depending on the research question.

Objective	Dependent variables	Fixed effect(s)	Random effect(s)
Assess the difference in match load and sleep time between CONT and the two experimental conditions	<u>Match load</u> : sRPE, TD, HS, LS and number of collisions <u>Sleep</u> : bed time, wake up time and time in bed	The experimental condition (categorical predictor with CONT as reference)	The player
To evaluate the effect of MAT and WBC on sleep, HRV and fatigue markers with a comparable match load between conditions	<u>Sleep</u> : total sleep time, sleep onset latency, WASO, sleep efficiency, light sleep, SWS, REM and NREM <u>HRV</u> : RMSSD, HF, LF and LF/HF <u>Fatigue markers</u> : Δ [CK], Δ DOMS and Δ CMJ-F	The experimental condition (categorical predictor with CONT as reference) + the number of collisions + the HS distance	The player
To compare nocturnal CBT and mattress surface temperature between the experimental conditions and CONT	CBT Mattress surface temperature	The experimental condition (categorical predictor with CONT as reference)	The player and the slope (15 time points with 30min intervals)

CONT: control condition, MAT: high heat capacity mattress condition, WBC: whole body cryotherapy condition, sRPE: Rating of perceived exertion of the session, TD: total distance, HS: high speed running distance, LS: low speed running distance, WASO: wake after sleep onset, SWS: slow wave sleep proportion, REM: rapid eye movement sleep proportion, RMSSD: Root Mean Square Standard deviation of R-R interval, HF: high frequency band, LF: low frequency band, LF/HF : the ratio of low by high frequency, Δ [CK]: the variation from PRE to D+1 of blood creatine kinase levels, Δ DOMS: the variation from PRE to D+1 of delayed onset muscle soreness levels, Δ CMJ-F: the variation from PRE to D+1 of the force developed during a counter movement jump test, CBT: core body temperature.

Results

Match load, sleep schedules and baseline fatigue between conditions

Match load. Global match load variables are presented as the intercept of the mixed-effect model (Table 10). Independently from the experimental conditions, total distance covered was $3643.0 \pm 468.9\text{m}$, including $3416.8 \pm 455.0\text{m}$ of LS running distance and $226.4 \pm 54.5\text{m}$ of HS running distance. The number of collisions was 16.2 ± 2.9 and sRPE was 434.1 ± 65.4 AU.

A significantly higher total distance ($\beta = +980.2$ m, $p < 0.05$), LS running distance ($\beta = +899.0$ m, $p < 0.05$) and number of collisions ($\beta = +4.4$, $p = 0.05$) were reported for the WBC condition compared with the CONT condition. No significant differences were observed for HS distance ($\beta = +81.5$ m, $p = 0.17$) and sRPE ($\beta = +78.6$ AU, $p = 0.20$) between the WBC and CONT conditions. No significant differences were observed for any match load variables between the MAT and CONT conditions (Table 10).

Sleep schedules. No significant differences were reported for bedtimes (intercept: $23:35 \pm 00:33$; Δ WBC - CONT = $00:11$ min, $p = 0.38$; Δ MAT - CONT = $00:17$ min, $p = 0.17$) or get up times (intercept: $08:02 \pm 00:16$; Δ WBC - CONT = $-00:04$ min, $p = 0.52$; Δ MAT - CONT = $-00:08$ min, $p = 0.16$) between the conditions.

Baseline fatigue markers. No significant differences between conditions were reported at BASELINE for any marker of fatigue.

Effects of MAT on sleep, temperature and fatigue markers

Polysomnography. Tables 11 and 12 provide an overview of the effects of the MAT condition on sleep architecture compared with the CONT condition. A significantly lower WASO ($\beta = -10.5$ min, $p < 0.01$) and a trend towards higher sleep efficiency ($\beta = +2.9\%$, $p = 0.11$) for the MAT condition compared with the CONT condition were observed (Table 11). A higher REM sleep proportion ($\beta = +2.8\%$, $p < 0.05$) was noted for MAT condition compared with the CONT condition (Table 12).

Table 10: Table that illustrates the internal and external match load variation from CONT (reference) for WBC and MAT

	Total distance (m)			LS running distance (m)			HS running distance (m)			Collisions (n)			sRPE (A.U.)		
	Est. (SE)	95% CI	p	Est. (SE)	95% CI	p	Est. (SE)	95% CI	p	Est. (SE)	95% CI	p	Est. (SE)	95% CI	p
Fixed effects															
(Intercept)	3643.0 (490.2)	2633.5 – 4652.5	<0.001	3416.8 (455.0)	2479.8 – 4353.9	<0.001	226.4 (54.5)	114.3 – 338.5	<0.001	16.2 (2.9)	10.2 – 22.2	<0.001	434.1 (65.4)	299.3 – 568.8	<0.001
CONT	Reference			Reference			Reference			Reference			Reference		
WBC	980.2 (468.9)	14.4 – 1946.1	0.05	899.0 (426.3)	21.1 – 1776.9	0.05	81.5 (57.8)	-37.4 – 200.5	0.17	4.4 (2.1)	-0.0 – 8.8	0.05	78.6 (59.4)	-43.9 – 201.0	0.20
MAT	304.4 (468.9)	-661.5 – 1270.2	0.52	279.2 (426.3)	-598.7 – 1157.1	0.52	25.0 (57.8)	-93.9 – 144.0	0.67	-0.6 (2.1)	-5.0 – 3.8	0.78	9.5 (59.4)	-112.9 – 131.9	0.87
Random part															
Ngrp	19			19			19			19			19		
Observation	46			46			46			46			46		

Table 11: Linear mixed-effects models evaluating the effect whole body cryotherapy (WBC) and high heat capacity mattress (MAT) on sleep quality, assessed using polysomnography, compared with CONT condition (reference).

	Total sleep time (min)			Sleep onset latency (SOL) (min)			Wake after sleep onset (WASO) (min)			Sleep Efficiency (SE) (%)		
	Est. (SE)	95% CI	p	Est. (SE)	95% CI	p	Est. (SE)	95% CI	p	Est. (SE)	95% CI	p
Fixed effects												
(Intercept)	438.9 (17.0)	403.2 – 474.5	<0.001	27.8 (10.6)	5.6 – 50.0	0.02	37.9 (6.2)	24.9 – 50.8	<0.001	86.6 (2.8)	80.8 – 92.3	<0.001
CONT	Reference			Reference			Reference			Reference		
WBC	-17.9 (13.4)	-46.0 – 10.3	0.20	-4.8 (8.8)	-23.2 – 13.6	0.59	-5.0 (3.9)	-13.1 – 3.2	0.22	-1.6 (1.9)	-5.6 – 2.5	0.43
MAT	-8.8 (12.3)	-34.5 – 16.9	0.48	-3.2 (8.1)	-20.1 – 13.8	0.70	-10.5 (3.5)	-17.8 – -3.3	0.01	2.9 (1.7)	-0.7 – 6.5	0.11
HS (km)	-4.5 (33.6)	-74.7 – 65.8	0.90	-6.4 (21.1)	-50.6 – 37.7	0.76	21.5 (11.1)	-1.8 – 44.8	0.07	-0.2 (5.2)	-11.1 – 10.8	0.98
Collisions (n)	0.3 (0.7)	-1.1 – 1.7	0.67	0.1 (0.4)	-0.8 – 0.9	0.85	-0.6 (0.2)	-1.1 – -0.1	0.03	0.0 (0.1)	-0.2 – 0.3	0.69
Random part												
N	18			18			18			18		
Observations	41			41			41			41		

Table 12: Linear mixed-effects models evaluating the effect of whole body cryotherapy (WBC) and high heat capacity mattress (MAT) on sleep architecture compared with a CONT condition (reference)

	Light sleep (%)			Slow wave sleep (%)			REM sleep (%)			NREM sleep (%)		
	Est. (SE)	95% CI	p	Est. (SE)	95% CI	p	Est. (SE)	95% CI	p	Est. (SE)	95% CI	p
Fixed effects												
(Intercept)	50.8 (2.6)	45.3 – 56.3	<0.001	27.7 (2.7)	22.0 – 33.3	<0.001	19.4 (1.9)	15.4 – 23.3	<0.001	80.6 (1.9)	76.6 – 84.6	<0.001
CONT	Reference			Reference			Reference			Reference		
WBC	-4.1 (2.6)	-9.6 – 1.4	0.13	2.2 (2.2)	-2.5 – 6.8	0.34	0.8 (1.3)	-1.9 – 3.4	0.56	-0.7 (1.3)	-3.4 – 1.9	0.56
MAT	-2.3 (2.5)	-7.4 – 2.9	0.37	-0.1 (2.0)	-4.4 – 4.1	0.95	2.8 (1.1)	0.4 – 5.2	0.02	-2.8 (1.1)	-5.2 – -0.4	0.02
HS (km)	-11.5 (5.3)	-22.5 – -0.5	0.04	11.1 (5.4)	-0.2 – 22.3	0.05	-1.0 (3.5)	-8.4 – 6.3	0.77	1.1 (3.5)	-6.3 – 8.5	0.76
Collisions (n)	0.3 (0.1)	0.1 – 0.5	0.01	-0.2 (0.1)	-0.4 – 0.0	0.09	0.1 (0.1)	-0.1 – 0.2	0.46	-0.1 (0.1)	-0.2 – 0.1	0.47
Random part												
N		18			18			18			18	
Observations		41			41			41			41	

Temperature, HR and HRV. A significant reduction in mean nocturnal CBT ($\beta = -0.135^{\circ}\text{C}$, $p < 0.001$) and mattress surface temperature ($\beta = -2.736^{\circ}\text{C}$, $p < 0.001$) were observed for the MAT condition compared with the CONT condition (Table 13). The two-way ANOVA revealed main effects for time and condition and for the interaction between time and condition ($p < 0.001$). Significant differences between the two conditions were observed at all-time points ($p < 0.05$), except at bedtime and 4 to 5 hours after bedtime (Figure 21). A higher nocturnal thermal comfort was perceived for the MAT ($\beta = +0.6$, 95% CI: 0.1 to 1.2, $p < 0.05$) condition compared with the CONT condition. The MAT use did not affect HR and HRV, compared with the CONT condition.

Table 13: Linear mixed-effects models evaluating the effect of whole body cryotherapy (WBC) and high heat capacity mattress (MAT) on mean core body temperature (CBT) and mattress temperature compared with CONT condition (reference).

	Core body temperature ($^{\circ}\text{C}$)			Mattress surface temperature ($^{\circ}\text{C}$)		
	Est. (SE)	95% CI	p	Est. (SE)	95% CI	p
Fixed effects						
(Intercept)	36.378 (0.043)	36.294 – 36.462	<0.001	34.857 (0.226)	34.427 – 35.286	<0.001
CONT	Reference			Reference		
WBC	0.041 (0.031)	-0.019 – 0.101	0.18	-0.030 (0.306)	-0.627 – 0.567	0.92
MAT	-0.135 (0.038)	-0.211 – -0.060	<0.001	-2.736 (0.298)	-3.315 – -2.156	<0.001
Random part						
N		14			18	
Observations		330			583	

Fatigue markers. No significant differences between MAT condition and the CONT condition for TQR scores, and the variations between BASELINE and D+1 of [CK] levels, CMJ-F, and DOMS were reported.

Effects of WBC on sleep, temperature and fatigue markers

Polysomnography. Whole-body cryotherapy did not affect any of the sleep variables compared with the CONT condition (Table 11 and 12).

Temperature, HR and HRV. No significant differences between the WBC and CONT conditions were observed for mean CBT (Table 13). However, WBC showed a higher nocturnal thermal

comfort ($\beta = +0.7$, 95% CI: 0.2 to 1.3, $p < 0.05$) and a colder sensation during the night ($\beta = -0.8$, 95% CI: -1.6 to -0.0, $p = 0.05$) than the CONT condition. Frequency domain analyses of HRV during the SWS sequences showed a higher normalized HF power for the WBC condition ($\beta = +9.3\%$, 95% CI: -0.1 to 18.7%, $p = 0.05$) suggesting an increased parasympathetic activity compared with the CONT condition.

Fatigue markers. No significant differences between WBC and the CONT condition for TQR scores, and the variations between BASELINE and D+1 of [CK] levels, CMJ-F, and DOMS were reported.

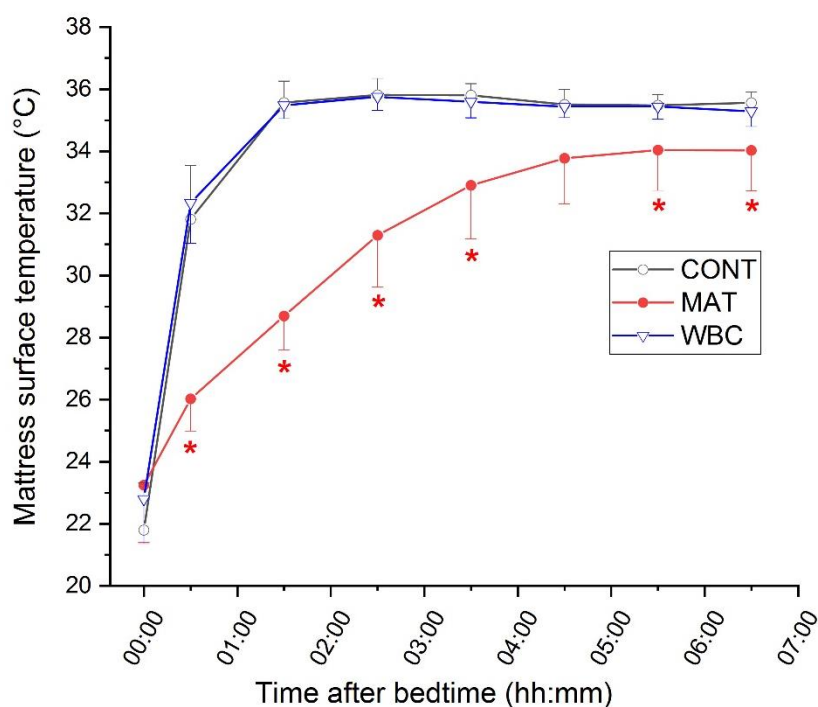


Figure 21: Changes in mattress surface temperature over 7 hours after bed time for CONT, MAT and WBC conditions (N=10). All data are presented as mean $\pm$ SD. Significantly different from CONT: * $p < 0.05$

Effects of match load covariates on sleep architecture and fatigue markers

Table 12 provides an overview of the potential relationships between match load covariates (HS and the number of collisions) and sleep architecture DVs. We observed a higher SWS proportion ($\beta = +1.1\%$, $p = 0.05$) and a lower light sleep proportion ($\beta = -1.2\%$, $p < 0.05$) for every 100-m increase in HS during the match. For every 10 supplementary collisions during the match, the SWS proportion decreased ($\beta = -1.9\%$, $p = 0.09$) and the light sleep proportion increased ($\beta = +2.9\%$, $p < 0.001$) (Table 12).

Relationships between the match load covariates (HS and number of collisions) and Δ [CK] and Δ DOMS were observed: for every 100-m increase in HS running distance, significantly higher Δ [CK] levels ($\beta = +78.0 \text{ IU}\cdot\text{L}^{-1}$, 95% CI: 35.6 to 120.3 $\text{IU}\cdot\text{L}^{-1}$, $p < 0.001$) and Δ DOMS ($\beta = +0.3 \text{ AU}$, 95% CI: 0.1 to 0.4 AU, $p < 0.001$) were observed. Additionally, for every 10 supplementary collisions during the match, a significantly higher Δ [CK] ($\beta = +112.6 \text{ IU}\cdot\text{L}^{-1}$, 95% CI: 33.7 to 191.5 $\text{IU}\cdot\text{L}^{-1}$, $p < 0.05$) was noted.

Discussion

The aim of the present study was to investigate the effects of a high-heat capacity mattress (MAT) and whole-body cryotherapy (WBC) intervention on sleep architecture and short-term recovery after an elite rugby union match. Main results showed: i) MAT use reduced mean nocturnal CBT, and had a positive impact on sleep architecture compared with the CONT condition; ii) WBC did not affect nocturnal CBT nor interfere with sleep architecture. High-speed running and the number of collisions experienced during the match had positive and negative influences on sleep architecture, respectively.

Effects of MAT on sleep, temperature and fatigue markers

The efficacy of MAT use on sleep after participation in a rugby union match was investigated. The upper layer of the MAT tested in the present study contained a high-heat capacity material, which remained cooler than the CONT mattress during the major part of the night (Figure 21). Decreasing CBT during sleep may enhance sleep quality (Krauchi et al., 2018; Togo et al., 2007). Our results showed significantly lower mean CBT ($-0.135 \text{ }^{\circ}\text{C}$) and mattress surface ($-2.736 \text{ }^{\circ}\text{C}$) temperatures during the MAT than the CONT condition. These findings are in agreement with studies using a similar high-heat capacity mattress (Herberger et al., 2019; Krauchi et al., 2018), and suggest an enhanced conductive body heat loss with MAT. Moreover, a significant improvement in subjective thermal comfort was reported when sleeping on the MAT. Sleeping on MAT significantly reduced WASO (-10.5 min) and increased REM sleep proportion ($+2.8\%$) compared with the CONT condition. Krauchi et al. (2018) used a similar cooling strategy and showed a higher SWS proportion (3.7%). These results suggest potential distinct positive effects for MAT use on sleep architecture, which could be explained by differences in the population studied and/or the experimental protocol. Moreover, the mean SWS proportion in our study during the CONT condition was higher (27.7 % vs 23.1%) and the REM sleep proportion was lower (19.4 % vs 22.1%) compared with Krauchi et al. (2018), which may reveal a ceiling or “maximum level of SWS in a single night” (Taylor et al., 1997), beyond which even MAT use cannot induce further increases in SWS. Wake after sleep onset is an indicator of sleep quality and is usually higher for elite athletes than for non-athletic

individuals (Dunican et al., 2019; Leeder et al., 2012). Our results showed significantly lower WASO for the MAT condition compared with the CONT condition (-10.5 min), suggesting better sleep continuity for MAT. The observed increase in REM sleep during MAT use may be related to the relatively low post-match REM proportion, coupled with increased sleep continuity. Despite positive effects on sleep architecture, MAT use did not affect the short-term neuromuscular and perceptual recovery compared with the CONT condition. Future studies are required to assess the interest of chronic use of MAT on sleep and recovery.

Effects of WBC on sleep, temperature and fatigue markers

The present study showed no difference for nocturnal CBT between WBC and CONT, which suggests that the slight decrease of CBT previously reported at 30 and 60min after the exposure (Costello et al., 2012; Zalewski et al., 2014) does not persist during the night. A previous study by Douzi et al. (2018) reported lower actigraphic nocturnal activity after WBC preceded by night-time running exercise. Discrepancies between studies may be explained by the different pre-intervention exercise type and timing, and the methodology of sleep assessment. One of the rationale for using WBC after exercise is to reduce sympathetic activity and increase vagal tone after the exposure (Schaal et al., 2013; Westerlund et al., 2006) and during subsequent sleep (Douzi et al., 2018). In the present study, we examined the sympathovagal balance during the first sequence of SWS (29) for WBC and CONT conditions. Our results showed increased parasympathetic activity during this period of SWS, as inferred by higher normalized HF power. This finding is consistent with previous studies that have assessed the effects of WBC on autonomic modulation (Douzi et al., 2018; Schaal et al., 2013). Nevertheless, as sleep architecture and short-term recovery were not affected after an acute WBC exposure, future studies should focus on its chronic effect on recovery, *e.g.* during an intensified training cycle.

Relationship between match load covariates and sleep architecture

Match loads in the present study were similar to those previously reported among elite U23 players (Lacome et al., 2018). To our knowledge, this is the first study to evaluate sleep architecture for a full night with PSG following a rugby match. Our results indicated that the number of collisions experienced by players during the match impaired subsequent sleep architecture. This result may be explained by the accumulation of metabolic waste in the brain, including beta-amyloid, following recurrent head impacts; such accumulation may then disrupt the inhibition of the noradrenergic signaling in the locus coeruleus and negatively impact sleep architecture (Asken et al., 2016). Conversely, increased HS running distance during the match improved SWS proportion during the

following night, which is in agreement with the hypothesis that higher diurnal activity is associated with increased SWS (Davenne, 2009).

Practical applications

The present study highlighted the importance of sleep environment and the optimization of nocturnal heat transfer via MAT for improved post-match sleep among elite athletes. Moreover, WBC did not interfere with post-match sleep. High-speed running and the number of collisions experienced during the match had positive and negative influences on sleep architecture, respectively. Consequently, practitioners should be aware of the importance of monitoring these activities and sleep after rugby union match to ensure adequate recovery.

Limitations

Due to the real-world sports setting examined in this study, controlling the match load for each player was not feasible, and the match load was found to be slightly higher for the WBC condition compared with the CONT condition. Linear mixed-effects models were, therefore, used to assess the difference between conditions with match load variables as covariates. Due to practical issues, fatigue states were monitored only the morning after the match. Future studies are required to assess the effects of the recovery strategies on the overall post-match recovery kinetics (*e.g.* up to 3 days after the game).

Synthèse de l'étude 3

Le rugby est un sport intermittent de haute intensité incluant des phases de combat et de collisions (Duthie et al., 2003). Suite à un match, les indicateurs subjectifs de la fatigue et les marqueurs de fatigue neuromusculaire nécessitent quatre jours et 48h, respectivement, pour retrouver des valeurs de repos (Tavares et al., 2017). Le sommeil est également souvent perturbé à la suite d'un match comparativement à une nuit suivant une journée d'entraînement (Eagles et al., 2014; Roberts et al., 2019b; Shearer et al., 2015). Par conséquent, au vu du calendrier chargé dans ce sport, impliquant des matchs toutes les semaines, il semble opportun de proposer des stratégies permettant d'améliorer la qualité de sommeil post match, dans le but d'assurer une récupération plus rapide. Le choix des stratégies proposées, *i.e.* la literie à haute conductivité thermique (MAT) et la cryothérapie corps entier (CCE), s'est appuyé sur la relation entre la thermorégulation, la régulation autonome et le sommeil (De Zambotti et al., 2018; Kräuchi & Deboer, 2010). En effet, l'effet recherché à travers la CCE était une légère diminution de la température centrale et une activation plus importante du système nerveux parasympathique au coucher (Costello et al., 2012; Louis et al., 2020). Cependant, l'utilisation du matelas avait comme objectif d'optimiser les échanges thermiques au cours de la nuit en facilitant le transfert de la chaleur du corps vers le matelas par conduction (Herberger et al., 2019; Krauchi et al., 2018). Cela réduirait la dépense énergétique associée à la régulation thermique au cours de la nuit et, assurerait par conséquent un sommeil plus continu et profond (Schmidt, 2014). En plus de l'étude de l'efficacité de ces deux stratégies pour améliorer la qualité de sommeil post match, le deuxième objectif de cette étude était d'évaluer l'influence des variables de charge du match (*i.e.* distance parcourue à haute intensité et nombre de collisions) sur l'architecture du sommeil.

Étant donné que la charge du match était légèrement supérieure dans la condition CCE comparativement à la condition contrôle, nous avons utilisé des modèles linéaires mixtes comprenant le joueur comme effet aléatoire et les variables les plus sensibles pour caractériser la fatigue neuromusculaire en rugby (Jones et al., 2014), *i.e.* le nombre de collisions et la distance parcourue à haute intensité, comme effets fixes (ou covariables). Le but était de comparer les conditions à charge de match équivalente. Aucune différence n'a toutefois été observée dans les scores du questionnaire NASA-TLX, témoignant d'une charge mentale équivalente entre les conditions. Le principal résultat de cette étude montre une réduction de la durée d'éveil intrasommeil (~ -11 min) et une augmentation de la proportion du sommeil paradoxal ($\sim +3$ %) pour MAT comparativement à CONT. Aucun effet de la CCE sur le sommeil n'a été rapporté dans cette étude. Le confort thermique évalué subjectivement était significativement supérieur pour CCE et MAT comparativement à CONT. Cependant, la sensation de froid était supérieure seulement

pour la condition CCE par rapport à CONT. Les résultats de cette étude ont également montré que l'augmentation du nombre de collisions au cours du match était accompagnée d'une réduction de la proportion de sommeil lent profond et une augmentation du sommeil léger. Des résultats similaires ont été rapportés en utilisant un modèle d'induction de légères lésions cérébrales traumatiques répétitives pour des rats (Petraglia et al., 2014). Les auteurs ont expliqué ces perturbations par la potentielle implication du système glymphatique, responsable de l'élimination des déchets métaboliques au cours de la nuit (Asken et al., 2016; Petraglia et al., 2014). D'autre part, l'augmentation de la distance parcourue à haute intensité au cours du match était accompagnée par une augmentation du sommeil lent profond et une réduction du sommeil lent léger. Ces résultats sont en adéquation avec le processus homéostatique du « two process model », qui suggère une augmentation du sommeil lent profond suite à un prolongement de la durée de veille et/ou à l'augmentation de l'activité au cours de la journée précédente (Borbély et al., 2016).

DISCUSSION GÉNÉRALE

DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif général de cette thèse était d'évaluer l'influence de certains facteurs de stress spécifiques aux sportifs de haut niveau sur leur sommeil et d'étudier l'effet de stratégies permettant d'améliorer sa qualité. La première étude a montré un sommeil insuffisant des jeunes sportifs de haut niveau par rapport aux recommandations de la *National Sleep Foundation*. Nous avons également observé un sommeil particulièrement perturbé pour les nageurs en comparaison aux autres sportifs. Parallèlement, les nageurs présentaient une charge d'entraînement interne, une perception des douleurs musculaires et de la fatigue générale plus élevées comparativement aux sportifs issus des autres disciplines. Indépendamment de la discipline, nos résultats ont montré que l'augmentation de la charge interne était accompagnée d'une avance de phase, d'une réduction du temps total de sommeil et de sa qualité perçue, et d'une augmentation de la fragmentation de sommeil. Dans la deuxième étude de cette thèse, nous avons observé que l'architecture du sommeil était négativement impactée suite à la réalisation d'un exercice de course à pied à haute intensité en soirée. Cette perturbation était plus marquée en première partie de la nuit. La température centrale et la fréquence cardiaque étaient également élevées lors des deux premiers cycles de sommeil comparativement à la condition sans exercice. D'autre part, les résultats de la dernière étude de cette thèse ont montré que l'utilisation d'un matelas à haute conductivité thermique à l'issue d'un match de rugby de haut niveau a augmenté la proportion de sommeil paradoxal et diminué la durée d'éveils intrasommeil. Par ailleurs, aucun effet de la cryothérapie corps entier sur la qualité de sommeil n'a été rapporté. Enfin, dans cette dernière étude, nous avons observé une relation négative entre le nombre de collisions et la qualité de sommeil.

1. Le sommeil des sportifs de haut niveau adolescents

Les résultats de la première étude de cette thèse ont montré une durée de sommeil d'environ 7 heures par nuit, ce qui est bien en dessous des recommandations pour une population d'adolescents (*i.e.* 9-10 heures) (Hirshkowitz et al., 2015). De plus, étant donné que les seules recommandations existantes à ce jour concernent la population générale, il serait opportun de penser que les sportifs de haut niveau auraient un besoin de sommeil plus élevé au vu de leur pratique physique importante (Davenne, 2009). Les résultats obtenus confirment ceux des travaux précédents sur le sujet et soulèvent un problème de fond qui est la conséquence des contraintes/calendriers imposés aux jeunes sportifs, associés à une récupération inadaptée, sur leur santé (risque de surmenage et/ou de blessure) et leur formation physiologique (Bergeron et al., 2015). En effet, comme nous l'avons abordé dans le premier chapitre, plusieurs fonctions physiologiques importantes se déroulent pendant le sommeil, telles que la maturation des circuits neuronaux, la consolidation de la mémoire et l'apprentissage (Ackermann & Rasch, 2014; Davenne, 2009). La dette chronique de sommeil des

jeunes sportifs pourrait donc impliquer des conséquences négatives dans ces différents domaines à plus long terme. Bien que les conséquences pourraient être majorées pour les sportifs, il convient toutefois de noter qu'un constat similaire a été observé à plus grande échelle pour les jeunes adolescents de la population générale (Leger et al., 2012). Ceci témoigne d'une importante part sociétale, qu'il est difficile de dissocier des contraintes sportives spécifiques (Halson, 2016). De plus, beaucoup d'adolescents sont confrontés à des modifications physiologiques majeures qui se manifestent par une décélération de l'accumulation de la pression de sommeil ainsi qu'un retard de phase de l'horloge biologique, induisant des heures de coucher plus tardifs (Crowley et al., 2018). Ces modifications ne sont malheureusement pas adaptées avec la nécessité de se réveiller très tôt pour aller étudier, ce qui explique la dette de sommeil chronique pour certains jeunes. Dans les récents travaux de Crowley et al. (2018), ces différents phénomènes concourent à « une parfaite tempête », ou « the perfect storm » en anglais. Une vraie réflexion devrait donc être menée sur les horaires de début des cours en général et l'aménagement de l'emploi du temps spécifique des jeunes sportifs adolescents, afin de limiter la dette de sommeil, d'améliorer la qualité de la récupération et de préserver leur santé.

2. Influence de la charge et des horaires de l'exercice sur le sommeil

Dans les trois études de cette thèse, l'effet de la charge de travail sur le sommeil a été évalué d'une manière aigue (suite à un entraînement, une compétition) ou bien chronique (enchaînement de séances d'entraînement). La nature du stress induit par l'exercice et/ou le contexte dans lequel l'exercice a été réalisé étaient différents entre les études. À la différence de la troisième étude, les deux premières étaient réalisées dans un contexte d'entraînement en s'affranchissant de l'anxiété liée à la compétition. Dans la première étude, le niveau de fatigue était évalué d'une manière subjective à travers la perception de l'intensité de l'effort, des douleurs musculaires et de la fatigue générale. Ce choix se justifie notamment par l'hétérogénéité des disciplines, qui rend difficile l'adoption d'une méthode objective et universelle de mesure de la charge interne ; la validité de la méthode de RPE-S pour caractériser la fatigue dans différents sports ; ainsi que le cadre écologique de réalisation de cette étude impliquant l'impossibilité, d'un point de vue pratique, de réaliser des mesures de fatigue spécifiques. Cette étude était donc observationnelle, avec le but de dégager des perspectives qui peuvent servir d'appui rationnel à de futurs travaux plus contrôlés. Nous avons toutefois recruté des jeunes sportifs ayant les mêmes contraintes sportives et académiques, et contrôlé l'âge et le sexe en les intégrant en tant qu'effets fixes des modèles statistiques utilisés. En effet, les besoins de sommeil sont différents entre les catégories d'âge (Hirshkowitz et al., 2015; Ohayon et al., 2017) et certains travaux ont rapporté un sommeil différent selon le sexe (Schaal et al., 2011). Nos résultats ont montré une moindre quantité et qualité de sommeil lorsque la charge d'entraînement est plus élevée. Ces mêmes résultats sont observés lorsqu'on enlève les nageurs qui

présentent la charge d'entraînement et les perturbations de sommeil les plus élevées. Si l'on s'appuie sur le processus homéostatique du « two process model » (Borbély et al., 2016), la réalisation d'une activité physique est censée induire un sommeil plus profond et moins fragmenté. Nos résultats confirment donc que pour des jeunes sportifs de haut niveau, le cumul du stress académique et celui de la fatigue induite par l'entraînement intense et répétitif impacteraient négativement la qualité du sommeil. Il existerait donc un seuil de fatigue physique et cognitive journalier au-dessus duquel le potentiel effet bénéfique sur le sommeil devient plutôt néfaste. Nos résultats confirment ceux obtenus dans une étude réalisée auprès de triathlons adultes bien entraînés, qui a montré que l'augmentation de 30% de la charge d'entraînement pendant trois semaines était accompagnée d'une diminution de l'efficacité de sommeil et du temps passé immobile (Hauswirth et al., 2014). L'un des résultats marquants de la première étude du présent projet de thèse était le sommeil particulièrement perturbé des nageurs comparativement aux autres sports. L'hypothèse majeure de cette perturbation consiste dans la moindre tolérance du stress de l'entraînement pour ce groupe. En effet, la charge interne de l'entraînement et la perception de la fatigue générale et des douleurs musculaires étaient plus élevées pour les nageurs comparativement aux autres sportifs. D'autre part, les nageurs étaient les plus représentés en chronotype du soir avec 43% des sportifs du groupe. Il a été précédemment rapporté que les sportifs tendent à choisir, et sont plus performants dans les disciplines dont les horaires d'entraînements sont adaptés à leur chronotype (Rae et al., 2015). Il est donc commun d'observer plus de profils du matin que du soir auprès des nageurs, triathlons ou cyclistes, contrairement à ce qui est observé dans les sports collectifs (Lastella et al., 2016). De ce fait, une hypothèse est que le chronotype inadapté soit l'un des facteurs explicatifs du sommeil perturbé des nageurs dans notre étude. Il est important de préciser que toutes les études évoquées dans cette section ont été réalisées par actimétrie, avec toutes les limites inhérentes à l'outil que nous avons évoquées auparavant, et que la littérature scientifique en sciences du sport manque à ce jour de travaux évaluant le sommeil par polysomnographie. La deuxième étude de ce travail de thèse a été réalisée dans un contexte plus contrôlé au laboratoire et avait comme principal apport l'évaluation du sommeil par polysomnographie pour des sportifs entraînés. Le but de cette étude était d'évaluer l'effet aigu de la réalisation d'un exercice intermittent à haute intensité en soirée sur l'architecture du sommeil la nuit suivante comparativement à une journée de repos. Pour ce faire, nous avons cette fois recruté une population adulte, plus amenée à réaliser des entraînements/compétitions en soirée. L'exercice de simulation de TRAIL a été choisi pour induire un niveau important de fatigue, et imposer des contraintes mécaniques connues pour créer des dommages musculaires (Hauswirth et al., 2011). Les réponses cardiaques à l'exercice

ainsi que l'évaluation du niveau de fatigue perçue à la fin de chaque bloc de 9 minutes témoignant d'un niveau de fatigue élevé induit par le TRAIL (figure 22).

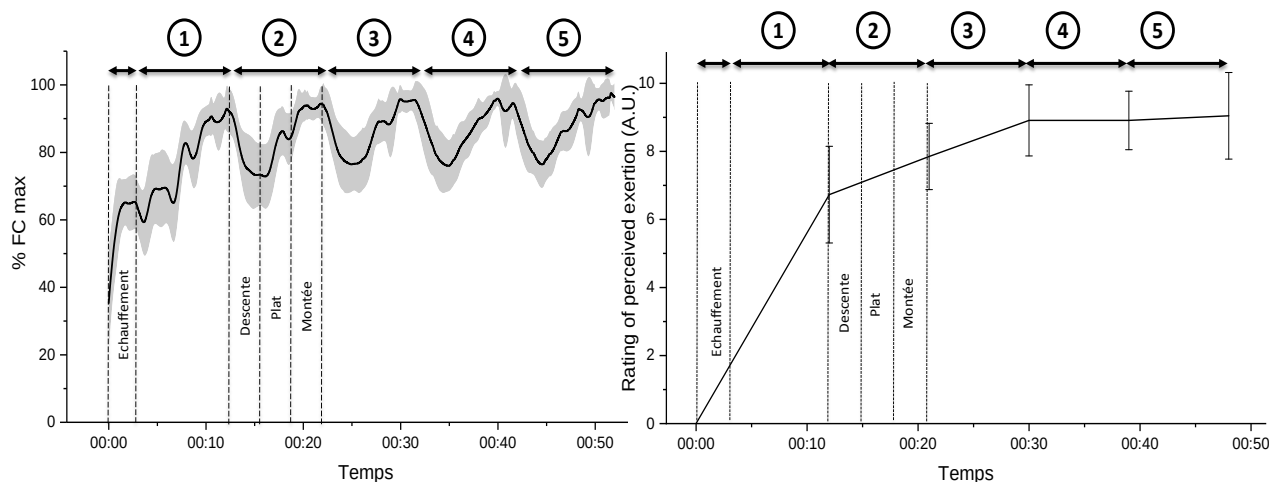


Figure 22: Réponses cardiaques et suivi de la perception de la fatigue au cours de la simulation de TRAIL

Concernant l'effet de l'exercice sur la structure des muscles extenseurs du genou, nos résultats rapportent la survenue de dommages musculaires modérés selon la classification de Paulsen et al. (2012). En comparaison à un jour de repos, la simulation de TRAIL en soirée a induit une large augmentation de la proportion de sommeil lent léger ($\sim +7\%$, $ES = 0,86$) et diminution du sommeil paradoxal ($\sim -4,5\%$, $ES = -0,87$), ainsi qu'une réduction modérée du sommeil lent profond ($\sim -3\%$, $ES = -0,52$). Ces effets sur le sommeil étaient plus marqués lors des 180 premières minutes de la nuit. Nos résultats sont en contradiction avec la seule étude qui a évalué le sommeil par polysomnographie auprès de sportifs entraînés à la suite d'un exercice de course à pied à haute intensité (6 x 5min à 90% de la VMA), et qui n'a rapporté aucune modification de l'architecture du sommeil (Thomas et al., 2020). Dans notre étude, l'heure de l'exercice et de coucher étaient plus tardifs (~ 75 et 120 min plus tard, respectivement) et le temps passé au lit était en moyenne plus réduit (~ -100 min) par rapport à l'étude de Thomas et al. (2020). Il est donc possible que le processus circadien ait été moins perturbé dans l'étude de Thomas et al. (2020) et/ou que les 100 min de sommeil supplémentaires aient permis un effet rebond plus marqué en deuxième partie de nuit, ce qui aurait influencé les résultats moyennés sur toute la nuit. Le niveau d'entraînement des deux populations et l'intensité des exercices utilisés dans les deux études étaient légèrement différents. L'autre différence entre les études est l'inclusion dans notre exercice de phases de course en descente, qui ont provoqué l'apparition de dommages musculaires modérés. Bien que l'état actuel des connaissances et le protocole que nous avons utilisé ne permettent pas de répondre spécifiquement à cette question, les différences observées entre les deux travaux suggèrent éventuellement l'implication des dommages musculaires dans la perturbation de l'architecture du

sommeil, et ouvrent un champ d'exploration intéressant à ce sujet. En s'appuyant sur un modèle de restriction/privation de sommeil, Dattilo et al. (2011) ont proposé l'hypothèse du rôle du sommeil dans la prolifération, la fusion et la différenciation des cellules satellites, impliquées dans le processus de remplacement des cellules musculaires endommagées. Cependant, l'approche abordée repose sur la quantité de sommeil, et il n'est pas possible à ce jour de savoir si, pour une même durée de sommeil, l'organisme répond positivement, par une augmentation du sommeil lent profond, connu par la sécrétion concomitante de l'hormone de croissance, également impliquée dans le processus de réparation tissulaire, ou bien dans le cas contraire, par une perturbation de la continuité de sommeil induite par les dommages musculaires et les potentiels douleurs associés. Notre étude ne nous a malheureusement pas permis de répondre à cette question avec précision étant donné qu'elle ne comprenait pas une condition avec un exercice induisant un même niveau de fatigue métabolique sans contraintes mécaniques. Cependant, plus spécifiquement sur les douleurs, nous avons exposé dans le premier chapitre de cette thèse la potentielle relation réciproque entre la perception de la douleur et la proportion du sommeil paradoxal (Moldofsky, 2001; Ohayon, 2009; Onen et al., 2001). Nous avons mis en relation la variation de perception de douleur musculaire, entre les valeurs d'avant l'exercice et celles du lendemain (H24), avec la proportion de sommeil paradoxal, et montré une corrélation négative (figure 23a). De même, une corrélation négative a été retrouvée entre la perception des douleurs et la qualité subjective de sommeil (figure 23b). Bien qu'une corrélation ne témoigne pas d'une relation de cause à effet, il semblerait qu'une meilleure qualité de sommeil permet de réduire la perception des douleurs et que le sommeil paradoxal soit impliqué dans les mécanismes de perception de la douleur (Ohayon, 2009).

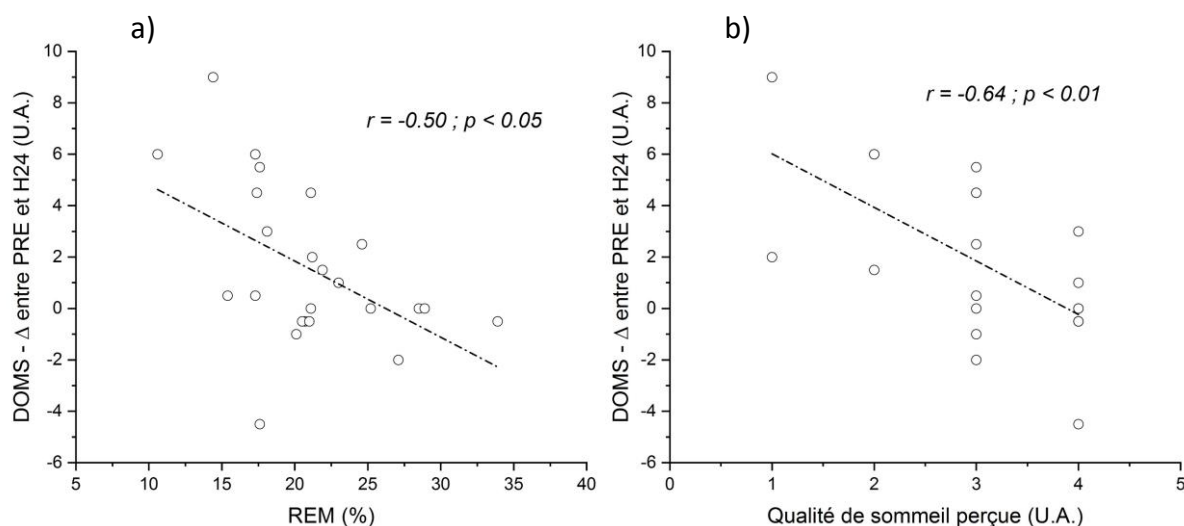


Figure 23: Régression linéaire entre la variation de la perception des douleurs musculaires de PRE à H24 et la proportion de REM (a) et la qualité de sommeil perçue (b)

En plus de la fatigue induite par l'exercice, ce dernier a été réalisé assez tardivement, ce qui aurait participé à la modification de l'architecture du sommeil, surtout observée en début de nuit. L'une des limites de cette étude est l'absence d'une condition dans laquelle un exercice de la même intensité est réalisé l'après-midi ou en fin de matinée afin d'isoler l'effet de l'horaire de l'exercice sur le sommeil. Cependant, en s'appuyant sur l'étude de Ramos-Campo et al. (2019) qui ont comparé le sommeil après la réalisation d'un exercice le matin (*i.e.* 10:00) et le soir (*i.e.* 20:00) pour des ultra-triathlons bien entraînés, quelle que soit l'intensité de l'exercice, le sommeil est perturbé suite à l'exercice réalisé le soir comparativement au matin. Il convient toutefois de noter que cette étude a évalué le sommeil par actimétrie et qu'une étude similaire avec l'utilisation de la polysomnographie serait d'un grand intérêt pour comprendre l'effet de l'heure de l'exercice et de son intensité sur la modification de l'architecture du sommeil.

Dans la troisième étude de cette thèse, le sommeil a été évalué dans un contexte compétitif. Nous avons donc utilisé le questionnaire NASA-TLX afin de quantifier la charge cognitive associée au match. Aucune relation n'a été observée entre la variation des scores de ce questionnaire et l'architecture du sommeil. En plus de la fatigue cognitive, nous avons évalué la relation entre l'architecture du sommeil et les activités de course et de combat au cours du match, ainsi que la perception de l'intensité de l'effort. Nos résultats montrent que l'augmentation de la distance parcourue à haute intensité était accompagnée d'une diminution de la proportion de sommeil lent léger et une élévation de celle du sommeil lent profond. Ce résultat est conforme avec le processus homéostatique de la régulation du sommeil (process S) (Davenne, 2009). Par ailleurs, nous avons observé que l'augmentation du nombre de collisions au cours du match était à l'origine d'une moindre activité des ondes lentes et un sommeil plus léger. Il semblerait donc que la perturbation du sommeil observée après les matchs de rugby serait en grande partie liée aux collisions. La particularité de ces actions de jeu consiste dans les chocs que subit le cerveau qui pourraient potentiellement expliquer la moindre qualité de sommeil (Asken et al., 2016). Bien que réalisée sur un modèle animal, l'étude de Petraglia et al. (2014) a rapporté les mêmes résultats que notre étude pour le groupe de rats ayant subis des chocs répétés au niveau de la tête. L'un des principaux mécanismes responsables de la moindre qualité de sommeil suite à des collisions serait la perturbation du fonctionnement du système glymphatique, dont le rôle est d'éliminer les déchets métaboliques au niveau de l'espace interstitiel du cerveau (Xie et al., 2013). La potentielle accumulation des déchets métaboliques (*e.g.* la bêta-amyloïde) associée aux collisions expliquerait donc l'impact négatif sur l'architecture du sommeil (Asken et al., 2016). Certains travaux ont également rapporté une moindre qualité de sommeil et un excès de somnolence diurne suite à une commotion cérébrale (Christensen, 2018; Halstead et al., 2010). D'une façon intéressante, une autre étude a rapporté que la position latérale permettait une meilleure efficacité du système glymphatique

et une élimination plus marquée des déchets métaboliques du milieu interstitiel pour des rats anesthésiés (Lee et al., 2015). Ces études sur le modèle animal suggèrent de futurs travaux afin de comprendre l'effet de la position du dormeur sur la prévention des perturbations de l'architecture sommeil après un exercice standardisé contenant des collisions.

Dans la deuxième étude de cette thèse, certains mécanismes physiologiques impliqués dans les réponses cardiovasculaires à l'exercice physique et dans la régulation du sommeil ont été évalués au cours de la nuit. Nous avons rapporté une augmentation de la température centrale et de la fréquence cardiaque en première partie de la nuit, qui étaient accompagnées d'un sommeil moins profond et une durée d'éveil intrasommeil plus importante pour la condition TRAIL comparativement à la condition de repos. Une corrélation positive a été observée entre la température centrale/la fréquence cardiaque moyenne en début de nuit et la quantité d'éveil intrasommeil (figure 24). Ces résultats confirment les théories de régulation du sommeil qui suggèrent une implication des mécanismes de thermorégulation (Kräuchi & Deboer, 2010; Togo et al., 2007) et du système nerveux autonome (De Zambotti et al., 2018; Okamoto-Mizuno & Mizuno, 2012) dans la continuité du sommeil.

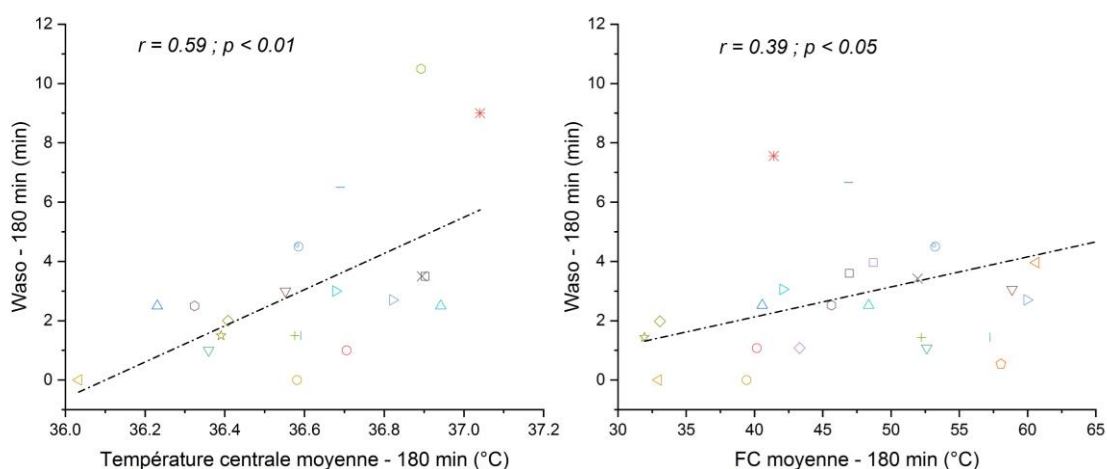


Figure 24: Régression linéaire entre la durée d'éveil intrasommeil et la fréquence cardiaque et la température centrale moyenne lors des 180 premières minutes du sommeil

3. Améliorer la qualité du sommeil en optimisant la régulation thermique et autonome

L'étude de l'effet d'une exposition thermique avant le coucher sur le sommeil repose aujourd'hui principalement sur deux théories (Nédélec et al., 2015b). La première théorie sur laquelle s'appuient les travaux évaluant l'effet de l'exposition au froid sur le sommeil est celle d'une réduction de la température centrale avant le coucher (process C). Cette théorie prendrait sens lorsqu'un exercice

physique est réalisée le jour de l'intervention, et particulièrement lorsque ce dernier a lieu en soirée. L'exposition au froid aurait donc pour but de diminuer plus rapidement la température centrale et musculaire afin d'éviter qu'elle ne soit élevée au coucher (Robey et al., 2013). Les premiers travaux visant à valider cette hypothèse ont évalué la qualité de sommeil suite à la réalisation d'une immersion en eau froide comparativement à une condition contrôle. La conclusion partagée par toutes ces études est que l'immersion en eau froide ne semble influencer ni la micro, ni la macroarchitecture du sommeil (Lastella et al., 2019; Robey et al., 2013; Tavares et al., 2019). Ces résultats s'expliqueraient principalement par une activation plus importante du système nerveux sympathique induite par la réalisation d'un bain froid, qui perturberait l'initiation et la continuité du sommeil (Nédélec et al., 2015b). Par conséquent, il est recommandé de réaliser le bain froid le plus proche possible de la fin de l'exercice, afin de bénéficier d'une action anti-inflammatoire (Brophy-Williams et al., 2011), et le plus éloigné possible de l'heure de coucher, afin de ne pas perturber le sommeil. La deuxième théorie qui pourrait servir de rationnel scientifique aux expositions thermiques dans le but d'améliorer la qualité du sommeil consiste à considérer dans toute sa complexité le processus de thermorégulation, et non uniquement la diminution de la température centrale (Krauchi et al., 2018; Raymann et al., 2008). En effet, une meilleure qualité de sommeil est obtenue lorsque la température centrale diminue en conséquence à une meilleure évacuation de la chaleur (Kräuchi & Deboer, 2010; Van Someren, 2006). Dans ce cas, les mécanismes de thermolyse sont majoritairement activés et le coût métabolique global est réduit (Schmidt, 2014), contrairement à ce qui se passe lorsque le corps lutte contre le froid en activant les mécanismes de thermogenèse après la réalisation d'un bain froid (Ihsan et al., 2016). Dans ce sens, l'exposition d'une partie ou bien de tout le corps au chaud a montré des résultats prometteurs sur l'amélioration de la qualité de sommeil (Haghighat et al., 2019). En s'appuyant sur la deuxième théorie, l'ensemble des effets recherchés devrait être une diminution de la température centrale, une légère augmentation de la température cutanée (une vasodilatation périphérique) et une meilleure évacuation de la chaleur vers le milieu extérieur (dont le marqueur principal est le gradient entre les régions cutanée proximale et distale) (Krauchi et al., 2018). D'un point de vue cardiovasculaire, cela se traduit par une vasodilatation périphérique assurée à travers une activation plus importante du SNP (Okamoto-Mizuno & Mizuno, 2012). Dans le cadre de nos travaux, le choix des interventions visant à améliorer la qualité de sommeil s'est appuyé sur la dernière théorie en différenciant les interventions avant l'endormissement, qui auraient une influence sur l'initiation de sommeil et sa continuité, surtout lors des premiers cycles, des interventions en continu au cours de la nuit. Notre choix d'intervention avant le coucher a donc porté sur la CCE, et non l'immersion en eau froide. En effet, la CCE induit une diminution de la température cutanée, qui revient aux valeurs de repos environ 60 minutes après l'exposition (Costello et al., 2012; Westerlund et al., 2003;

Zalewski et al., 2013). La température centrale continuerait à baisser durant l'heure qui suit l'exposition et peut atteindre une diminution allant jusqu'à 0,3°C (Costello et al., 2012). Cette réponse serait en adéquation avec la diminution de température centrale physiologique propice à l'endormissement (Krauchi, 2007; Okamoto-Mizuno & Mizuno, 2012). De plus, la CCE active, d'une façon significativement plus importante, le SNP comparativement à une condition contrôle (Hauswirth et al., 2013; Louis et al., 2020). Nos résultats n'ont toutefois pas montré d'effets positifs de la CCE sur l'architecture du sommeil malgré une activation plus importante du SNP pendant la première séquence de SLP du premier cycle de sommeil. De plus, la température centrale moyenne au cours de la nuit était identique entre les conditions CCE et contrôle. Il convient de noter qu'au vu du cadre écologique dans lequel la troisième étude de cette thèse a été réalisée, la charge de travail dans la condition CCE était légèrement supérieure à celle de la condition contrôle, rendant complexe de dissocier l'effet de la fatigue de celui de la technique de récupération évaluée. Nous avons toutefois utilisé une modélisation statistique permettant de prendre en compte la variation de la charge, et de comparer les conditions à charge égale. Pour ce faire, le modèle linéaire à effets mixtes comprenait les variables les plus sensibles (le nombre de collisions et la distance parcourue à haute intensité) pour caractériser la fatigue induite par un match de rugby comme effets fixes (ou covariables) du modèle. Malgré la validité de la méthodologie utilisée, il serait prématuré de conclure que la CCE n'est pas efficace pour améliorer la qualité de sommeil, étant donné que notre étude est la première à avoir évalué son effet en utilisant la polysomnographie. De futures études sont donc nécessaires pour confirmer ces résultats dans des conditions de laboratoire où la fatigue induite par l'exercice pourrait être mieux contrôlée. Le deuxième point important à considérer est l'effet chronique de la CCE sur le sommeil. En effet, les travaux ayant évalué l'influence de la CCE sur la régulation autonome ont montré une moindre efficacité après 5 jours (Louis et al., 2020) et 3 mois (Westerlund et al., 2006) d'exposition quotidienne. Les auteurs ont expliqué ce résultat par une adaptation de l'organisme au stress cardiovasculaire imposé. La seule étude ayant évalué l'effet chronique de la CCE sur la fatigue et le sommeil a été réalisée par Schaal et al. (2014) qui ont montré que la réalisation d'une séance de CCE quotidienne pendant une période de surcharge de 2 semaines - *i.e.* augmentation de 25% du volume d'entraînement - a permis de prévenir le surmenage fonctionnel, et par conséquent de mieux tolérer le stress de l'entraînement, comparativement à la récupération passive. Dans cette dernière étude, la CCE a également permis de limiter significativement les perturbations du sommeil observées dans la condition passive. Cependant, le sommeil a été évalué par actimétrie, ce qui n'a pas permis de rapporter l'influence sur l'architecture du sommeil. De ce fait, l'étude de l'effet chronique de la CCE sur le sommeil, évalué par polysomnographie, la fatigue et les adaptations à l'entraînement constitue l'un des axes majeurs des perspectives de ce travail de thèse. En effet, certains auteurs ont rapporté une possible interférence

de l'exposition au froid avec les adaptations à l'entraînement et particulièrement les séances à visée hypertrophique (Roberts et al., 2015).

En plus de l'exposition aiguë à la CCE avant le coucher, nous avons évalué l'effet de l'utilisation d'une literie à haute conductivité thermique sur le sommeil à l'issue d'un match officiel de rugby. Le fondement rationnel scientifique de l'utilisation de cette literie réside dans sa capacité à extraire la chaleur du corps par conduction pendant la majorité de la nuit. Notre hypothèse de départ était que la température centrale diminuerait, et que le sommeil lent profond augmenterait comparativement à une condition contrôle. Concernant la réponse thermique, notre hypothèse a été vérifiée étant donné que la température centrale a diminué et que la température en surface du matelas était significativement réduite par rapport au matelas classique, témoignant d'un échange thermique optimisé et continu durant la nuit entre le dormeur et le matelas. D'autre part, nos résultats ont montré une augmentation de la proportion de sommeil paradoxal ($\sim +3\%$) et une diminution de la durée d'éveil intrasommeil ($\sim -10,5$ min). Même si ces résultats témoignent d'une amélioration de la qualité du sommeil, le sommeil lent profond n'a pas été influencé comme c'était le cas dans les études de Krauchi et al. (2018) et de Herberger et al. (2019). Plusieurs hypothèses pourraient expliquer ces différents résultats, la première concerne la population étudiée et le protocole expérimental utilisé. En effet, nous avons évalué des sportifs de haut niveau après une compétition alors que les deux autres études ont été réalisées au repos et auprès de sujets jeunes en bonne santé. Indépendamment de l'effet de la literie, l'architecture de sommeil était différente entre les conditions contrôles des différents travaux. Par exemple, la proportion de SLP était supérieure (28% vs 23%), et celle du REM inférieure (22% vs 18%) dans notre étude comparativement à l'étude de Krauchi et al. (2018). Il est donc possible qu'il existe un seuil de SLP pendant une nuit qu'il n'est pas possible de dépasser suite à une augmentation de l'activité diurne (Shapiro, 1982; Taylor et al., 1997). Par ailleurs, il est très probable que l'augmentation du sommeil paradoxal et la meilleure continuité du sommeil observés dans notre étude soient liées à une meilleure thermorégulation. En effet, lors du sommeil paradoxal (REM), observé à la fin de chaque cycle de sommeil, les mécanismes de thermorégulation sont inhibés afin de consacrer les ressources énergétiques à d'autres fonctions biologiques (*e.g.* consolidation de la mémoire) (Schmidt, 2014). Quelles que soient les conditions thermiques, l'organisme n'engage donc aucune réponse thermophysologique (thermogenèse s'il fait froid ou thermolyse s'il fait chaud) pendant le REM. De ce fait, la fin des séquences de REM se caractérise souvent par un micro-éveil (si l'activation cérébrale dure moins de 15 sec) ou un éveil (si elle dure plus de 15 sec) associés à des comportements inconscients dont l'objectif est de réguler l'homéostasie thermique (American Sleep Association, 2020a; Schmidt, 2014). Ces derniers peuvent se manifester par des actions telles qu'enlever/remettre la couette, sortir les pieds du lit pour augmenter le gradient entre la température

cutanée proximale et distale, ou bien se frotter les pieds ou changer de position afin de générer de la chaleur. Ces mouvements sont scorés en polysomnographie comme de l'éveil intrasommeil. Une régulation thermique optimisée impliquerait donc moins d'éveils intrasommeil et des séquences de REM plus prolongées comme nous l'avons observé dans notre étude. Étant donné que la température ambiante, le niveau d'humidité et les couvertures étaient similaires entre les conditions, nous pouvons conclure que la meilleure thermorégulation serait associée au transfert thermique de la région cutanée proximale vers le matelas. En résumé, nos résultats suggèrent que l'utilisation de la literie à haute conductivité thermique semble une stratégie prometteuse pour améliorer la qualité du sommeil. En plus de son efficacité, cette solution est très pratique et permet d'économiser beaucoup de temps et d'argent comparativement à certaines autres stratégies tel que la cryothérapie corps entier. Cependant, de la même manière que pour la CCE, il serait prématuré de conclure d'une efficacité absolue du matelas sur la base d'une seule étude en sciences du sport, réalisée en aigu. De futurs travaux sont donc nécessaires pour confirmer nos résultats ainsi que pour étudier l'effet chronique de ce type de stratégie sur l'architecture du sommeil, et la qualité de la récupération, par exemple dans un contexte de préparation de pré-saison ou en période d'affûtage à l'approche d'une compétition majeure. De plus, ces travaux seraient réalisables dans des conditions écologiques grâce aux nouvelles technologies qui permettent d'accéder directement, ou par estimation, à l'architecture de sommeil.

4. Les nouvelles technologies au service du suivi quotidien de l'architecture du sommeil

Durant les cinq dernières années, une multitude d'outils technologiques d'analyse du sommeil ont vu le jour (Kelly et al., 2012; Muzet et al., 2016). Bien que l'apport de ces nouvelles technologies soit évident pour faciliter l'accès au sommeil des sportifs, il est important de noter que les algorithmes de traitement utilisés par beaucoup d'entre elles ne reposent pas sur un rationnel scientifique, et n'ont pas fait l'objet de travaux de validation (Halsen, 2019; Quante et al., 2015). Il est donc nécessaire de réaliser des études de validation rigoureuses, et d'orienter les sportifs vers des dispositifs valides pour leur utilisation quotidienne. L'un des outils récemment développés consiste en un bandeau conçu d'une manière très ergonomique, afin de gêner le moins possible le dormeur. Ce dernier contient des électrodes sèches qui permettent de recueillir en continu le signal EEG au niveau de la région frontale et occipitale, la fréquence cardiaque et le niveau d'activité (Arnal et al., 2019). Le scorage automatique, basé sur l'intelligence artificielle, a fait l'objet de nombreuses publications de validation par rapport à des scorages manuels de polysomnographie réalisés par des spécialistes, et a montré un niveau élevé de concordance (Arnal et al., 2019; Chambon et al., 2018). Il est également possible d'accéder aux données brutes de l'activité cérébrale sur une plateforme spécifique dédiée par le fabricant aux laboratoires de recherche. À notre avis,

ce type de dispositif présente une importante évolution pour les connaissances en matière de suivi chronique de l'architecture de sommeil. Un deuxième type d'outil repose sur le recueil des données de fréquence cardiaque par photo pléthysmographie, à l'aide d'un capteur LED, et du niveau d'activité, à travers un accéléromètre intégré. Ces données sont ensuite traitées par des algorithmes qui se basent sur l'analyse de la VFC, couplée à celles des mouvements nocturnes pour prédire/estimer les stades de sommeil (Fiorillo et al., 2019; Fonseca et al., 2017). Parmi les dispositifs permettant de réaliser ce type d'analyse on distingue le dispositif Oura, qui consiste en une bague légère ne gênant pas le dormeur (De Zambotti et al., 2019). Sur le plan scientifique, la première étude réalisée par une équipe de recherche indépendante a comparé les données obtenues par ce dispositif à celles de la PSG et a montré des résultats prometteurs (De Zambotti et al., 2019). Aucune différence n'a été observée entre les deux systèmes pour le temps total de sommeil (TST), la latence d'endormissement et la durée d'éveil intrasommeil (WASO). Cependant, une différence a été notée dans le WASO et le TST pour les sujets ayant un sommeil agité. Elle demeure tout de même inférieure au seuil clinique d'acceptabilité de la mesure, *i.e.* 30 minutes en moyenne, pour environ 85% des sujets pour les deux variables. Pour la comparaison époque par époque, la bague Oura a montré un niveau de sensibilité de 96% pour détecter le sommeil, une spécificité de 49% pour détecter l'éveil, et un niveau de concordance de 65%, 51% et 61% pour détecter le sommeil léger, profond et le REM, respectivement (De Zambotti et al., 2019). Le principal défi auquel sont confrontées ces méthodes est la distinction entre l'éveil et le REM et celle entre le sommeil léger et profond. En effet, la régulation autonome est très similaire entre ces états et stades. En utilisant la polysomnographie, il n'est possible de différencier le REM de l'éveil qu'à travers les mouvements oculaires rapides, caractéristiques du REM, couplés avec l'atonie musculaire évaluée par électromyographie de surface. Les transitions entre le sommeil léger et profond constituent les principales discordances entre les scoreurs en polysomnographie (Rosenberg & Van Hout, 2013). D'autres dispositifs utilisant le même principe ont également montré une validité satisfaisante telles que la bande EMFIT qui se place en dessous du matelas et capte la fréquence cardiaque et respiratoire par la technique de la ballistocardiographie (Kelly et al., 2012), ou bien le brassard Somno-art qui se porte au niveau de l'avant-bras (Muzet et al., 2016). En résumé, l'apport des nouvelles technologies aux connaissances sur le sommeil sera considérable à condition d'être vigilant quant à la performance de l'algorithme utilisé et à la validité scientifique de l'outil (De Zambotti et al., 2020).

APPLICATIONS PRATIQUES

APPLICATIONS PRATIQUES

Le sommeil assure un grand nombre de fonctions physiologiques et psychologiques fondamentales pour le processus de récupération (Nédélec et al., 2015a). Il joue également un rôle important dans la croissance physiologique des jeunes (Gronfier et al., 1996). Une bonne quantité et qualité de sommeil est nécessaire pour être en bonne santé (Drew et al., 2018). L'un des résultats de nos travaux suggère un temps de sommeil réduit (*i.e.* environ 7 heures par nuit) pour les jeunes sportifs de haut niveau. Dans une étude de Milewski (2014), il a été rapporté que le risque de blessure était 1,7 fois plus important pour les jeunes qui présentent une durée de sommeil <8h par rapport à ceux qui bénéficiaient de ≥ 8 h de sommeil. Les entraîneurs devraient donc être conscients que la planification des horaires de l'entraînement peut impacter directement le temps de sommeil et influencer la période de récupération et la santé des sportifs. Dans la première étude de cette thèse, nous avons également rapporté une durée de sommeil plus réduite pour les hommes comparativement aux femmes. Cependant, les femmes présentaient plus de perturbation du sommeil en réponses aux situations stressantes. Ces résultats suggèrent l'importance de procéder à une évaluation objective, subjective et clinique du sommeil à différentes phases de la saison afin de détecter les sportifs vulnérables, et proposer les stratégies adaptées pour les accompagner. Par exemple, lorsque le sommeil est perturbé en période compétitive, il serait d'une grande importance de proposer un programme de préparation mentale centré sur la gestion du stress et la régulation des émotions dans le but d'optimiser le sommeil dans cette phase, où la qualité de la récupération joue un rôle important dans la performance (Juliff et al., 2014).

Nos travaux ont également rapporté un sommeil perturbé suite à la réalisation d'un exercice intermittent à haute intensité en soirée. Pourtant, les sportifs recrutés pour l'étude avaient l'habitude de s'entraîner le soir. Il est donc conseillé de privilégier, lorsque c'est possible, la réalisation des séances d'entraînements à basse intensité le soir, et d'éloigner les séances intenses le plus possible de l'heure de coucher.

Nous avons rapporté une meilleure qualité de sommeil avec l'utilisation d'une literie à haute conductivité thermique, ce qui témoigne de l'importance d'optimiser l'environnement de sommeil. Bien que l'effet chronique ne soit pas encore étudié à ce jour, cette stratégie semble prometteuse et il serait opportun de la mettre en place dans les centres sportifs, surtout au vu de son coût relativement abordable en comparaison avec un investissement dans l'achat d'un système de cryothérapie corps entier. Par ailleurs, nos résultats n'ont pas rapporté d'effet de la cryothérapie corps entier sur le sommeil.

Le dernier résultat de ce travail de thèse a montré une relation négative entre le nombre de collisions et la qualité du sommeil évaluée par polysomnographie. Il serait intéressant d'intégrer cette variable, en plus d'autres marqueurs de la charge du match et de la fatigue, dans un modèle individualisé du suivi des cinétiques de récupération post-match.

CONCLUSION & PERSPECTIVES

CONCLUSION & PERSPECTIVES

L'objectif principal de ce travail de thèse était de comprendre l'influence de certains facteurs de stress spécifiques au sport de haut niveau, *i.e.* l'augmentation de la charge d'entraînement, la compétition, l'exercice à haute intensité en soirée, sur la qualité et la quantité du sommeil. La deuxième partie de ces travaux avait comme objectif d'évaluer l'efficacité de deux stratégies, *i.e.* l'utilisation d'une literie à haute conductivité thermique et la cryothérapie corps entier, sur l'amélioration de la qualité du sommeil suite à un match de rugby.

Le travail expérimental réalisé au cours cette thèse a permis d'obtenir les résultats suivants :

1. Les jeunes sportifs de haut niveau présentent une quantité et qualité de sommeil, évaluées objectivement et subjectivement, insuffisantes en comparaison aux recommandations de la *National Sleep Foundation* pour leur catégorie d'âge.
2. Les nageurs présentent un sommeil plus fragmenté comparativement aux sportifs issus d'autres disciplines. Parallèlement, la charge interne ainsi que la perception des douleurs et de la fatigue générale sont plus élevées dans cette discipline.
3. Indépendamment du sport pratiqué, l'augmentation de la charge interne est accompagnée d'une avance de phase, d'une réduction du temps total de sommeil et de sa qualité perçue ainsi que d'une augmentation de la fragmentation de sommeil.
4. La quantité de sommeil est inférieure pour les jeunes garçons comparativement aux jeunes filles, alors que les filles rapportent une moindre qualité de sommeil en réponse au stress.
5. La réalisation d'un exercice de haute intensité en soirée impacte négativement l'architecture du sommeil, particulièrement en première partie de la nuit, pour des coureurs à pied bien entraînés.
6. La température centrale et la fréquence cardiaque sont plus élevées pendant la nuit à l'issue d'un exercice à haute intensité réalisé tardivement comparativement à une condition de repos. Cette augmentation est plus marquée pendant les 180 premières minutes.
7. La durée d'éveil intrasommeil lors des 180 premières minutes de sommeil est significativement corrélée à la température centrale et à la fréquence cardiaque moyennes pour la même période.
8. L'utilisation d'une literie à haute conductivité thermique (MAT) réduit la durée d'éveil intrasommeil et augmente la proportion de sommeil paradoxal à l'issue d'un match de rugby.
9. L'exposition à la cryothérapie corps entier (CCE) deux heures avant le coucher n'influence pas l'architecture du sommeil suite à un match officiel de rugby.

10. Un meilleur confort thermique est rapporté pour CCE et MAT comparativement à la condition contrôle, alors qu'une sensation plus froide est observée seulement pour CCE.
11. L'augmentation du nombre de collisions au cours d'un match de rugby est accompagnée d'une diminution de la proportion de sommeil lent profond et d'une élévation de celle du sommeil lent léger.
12. L'augmentation de la distance parcourue à haute intensité est accompagnée d'une diminution de la proportion de sommeil lent léger et d'une élévation de celle du sommeil lent profond.

Ce travail de thèse avait donc comme principal apport d'évaluer l'architecture du sommeil pour une population de sportifs bien entraînés suite à un exercice intense en soirée et de joueurs de rugby de haut niveau suite à un match officiel. De plus, nous avons pu évaluer les habitudes de sommeil par actimétrie et questionnaires auprès d'une large cohorte de sportifs en conditions écologiques. Outre les résultats obtenus et les réponses apportées, nos travaux suggèrent les futures perspectives de travail suivantes :

1. Évaluer l'architecture de sommeil des nageurs lors de différentes phases de la saison (*e.g.* surcharge, affûtage) afin de comprendre l'interaction entre l'augmentation du volume d'entraînement, le niveau de fatigue associé, le sommeil et la qualité de la récupération.
2. Étudier l'effet à long terme d'une restriction quotidienne d'1 à 2 heure(s) de sommeil sur la récupération post-exercice, et éventuellement le lien potentiel avec le risque de blessure.
3. Évaluer l'amplitude du rythme circadien de la température centrale des nageurs et son influence sur la qualité de sommeil.
4. Différencier l'effet de l'intensité de celui du volume et de l'horaire de la réalisation d'un exercice sur l'architecture du sommeil.
5. Évaluer l'effet chronique de l'utilisation de la literie à haute conductivité thermique, ou plus globalement de l'optimisation de l'environnement de sommeil, sur l'architecture du sommeil et la tolérance du stress de l'entraînement lors d'une phase de préparation/surcharge.
6. Évaluer l'effet chronique de l'utilisation de la cryothérapie corps entier sur l'architecture du sommeil et l'interaction avec les adaptations à l'entraînement.
7. Mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à la modification de l'architecture du sommeil impliquée par les collisions et proposer des stratégies permettant de limiter les conséquences négatives à court et à long terme.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abaidia, A. E., Lamblin, J., Delecroix, B., Leduc, C., McCall, A., *et al.* (2017). Recovery From Exercise-Induced Muscle Damage: Cold-Water Immersion Versus Whole-Body Cryotherapy. *Int J Sports Physiol Perform*, 12(3): 402-409.
- Abdelmalek, S., Souissi, N., Chtourou, H., Denguezli, M., Aouichaoui, C., *et al.* (2013). Effects of partial sleep deprivation on proinflammatory cytokines, growth hormone, and steroid hormone concentrations during repeated brief sprint interval exercise. *Chronobiology International*, 30(4): 502-509.
- Ackermann, S., & Rasch, B. (2014). Differential effects of non-REM and REM sleep on memory consolidation? *Current neurology and neuroscience reports*, 14(2): 430.
- Agnew, J. H. W., Webb, W. B., & Williams, R. L. (1966). The First Night Effect: An EEG Study of Sleep. *Psychophysiology*, 2(3): 263-266.
- Åkerstedt, T., & Gillberg, M. (1990). Subjective and Objective Sleepiness in the Active Individual. *International Journal of Neuroscience*, 52(1-2): 29-37.
- Allen, D. G., Lamb, G. D., & Westerblad, H. (2008). Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev*, 88(1): 287-332.
- American Sleep Association. (2020a). Hot or Cold: What's the Best Temperature for Sleep? Retrieved from <https://www.sleepassociation.org/blog-post/best-temperature-for-sleep/>
- American Sleep Association. (2020b). Sleep hygiene tips. Retrieved from <https://www.sleepassociation.org/about-sleep/sleep-hygiene-tips/>
- Araujo, C. G., & Scharhag, J. (2016). Athlete: a working definition for medical and health sciences research. *Scand J Med Sci Sports*, 26(1): 4-7.
- Arias, P., Madinabeitia-Mancebo, E., Santiago, M., Corral-Bergantinos, Y., & Robles-Garcia, V. (2016). Effects of early or late-evening fatiguing physical activity on sleep quality in non-professional sportsmen. *J Sports Med Phys Fitness*, 56(5): 597-605.
- Arnal, P. J., Drogou, C., Sauvet, F., Regnauld, J., Dispersyn, G., *et al.* (2016). Effect of Sleep Extension on the Subsequent Testosterone, Cortisol and Prolactin Responses to Total Sleep Deprivation and Recovery. *J Neuroendocrinol*, 28(2): 1-6.
- Arnal, P. J., Thorey, V., Ballard, M. E., Hernandez, A. B., Guillot, A., *et al.* (2019). The Dreem Headband as an Alternative to Polysomnography for EEG Signal Acquisition and Sleep Staging. *BioRxiv*: 662734.
- Aschoff, J. (1983). Circadian control of body temperature. *Journal of Thermal Biology*, 8(1-2): 143-147.
- Asken, B. M., Sullan, M. J., Snyder, A. R., Houck, Z. M., Bryant, V. E., *et al.* (2016). Factors Influencing Clinical Correlates of Chronic Traumatic Encephalopathy (CTE): a Review. *Neuropsychol Rev*, 26(4): 340-363.
- Axelsson, J., Kecklund, G., Åkerstedt, T., Donofrio, P., Lekander, M., & Ingre, M. (2008). Sleepiness and performance in response to repeated sleep restriction and subsequent recovery during semi- laboratory conditions. *Chronobiology International*, 25(2-3): 297-308.
- Azboy, O., & Kaygisiz, Z. (2009). Effects of sleep deprivation on cardiorespiratory functions of the runners and volleyball players during rest and exercise. *Acta physiologica Hungarica*, 96(1): 29.
- Baehr, E. K., Revelle, W., & Eastman, C. I. (2000). Individual differences in the phase and amplitude of the human circadian temperature rhythm: with an emphasis on morningness-eveningness. *Journal of sleep research*, 9(2): 117-127.
- Bailey, D. M., Erith, S. J., Griffin, P. J., Dowson, A., Brewer, D. S., *et al.* (2007). Influence of cold-water immersion on indices of muscle damage following prolonged intermittent shuttle running. *J Sports Sci*, 25(11): 1163-1170.
- Bailey, S. L., & Heitkemper, M. M. (2001). Circadian rhythmicity of cortisol and body temperature: morningness-eveningness effects. *Chronobiology International*, 18(2): 249-261.
- Baker, F. C., Maloney, S., & Driver, H. S. (1999). A comparison of subjective estimates of sleep with objective polysomnographic data in healthy men and women. *Journal of psychosomatic research*, 47(4): 335-341.
- Banfi, G., Lombardi, G., Colombini, A., & Melegati, G. (2010). Whole-body cryotherapy in athletes. *Sports Med*, 40(6): 509-517.
- Banfi, G., Melegati, G., Barassi, A., Dogliotti, G., Melzi d'Eril, G., *et al.* (2009). Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes. *Journal of Thermal Biology*, 34(2): 55-59.
- Barbiche, E. (2006). La cryothérapie corps entier. (Thèse de Médecine générale), Université de Rouen Normandie.
- Bastien, C. H., Vallières, A., & Morin, C. M. (2001). Validation of the Insomnia Severity Index as an outcome measure for insomnia research. *Sleep medicine*, 2(4): 297-307.
- Baumert, P., Lake, M. J., Stewart, C. E., Drust, B., & Erskine, R. M. (2016a). Genetic variation and exercise-induced muscle damage: implications for athletic performance, injury and ageing. *Eur J Appl Physiol*, 116(9): 1595-1625.

- Baumert, P., Lake, M. J., Stewart, C. E., Drust, B., & Erskine, R. M. (2016b).** Inter-individual variability in the response to maximal eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol*, 116(10): 2055-2056.
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2016).** Neuroscience: exploring the brain. *Jones & Bartlett Learning, LLC*.
- Belenky, G., Wesensten, N. J., Thorne, D. R., Thomas, M. L., Sing, H. C., et al. (2003).** Patterns of performance degradation and restoration during sleep restriction and subsequent recovery: A sleep dose- response study. *Journal of sleep research*, 12(1): 1-12.
- Bender, A. M., Lawson, D., Werthner, P., & Samuels, C. H. (2018).** The clinical validation of the athlete sleep screening questionnaire: an instrument to identify athletes that need further sleep assessment. *Sports Med Open*, 4(1): 23.
- Berger, R. J., & Phillips, N. H. (1995).** Energy conservation and sleep. *Behavioural brain research*, 69(1-2): 65-73.
- Bergeron, M. F., Mountjoy, M., Armstrong, N., Chia, M., Cote, J., et al. (2015).** International Olympic Committee consensus statement on youth athletic development. *Br J Sports Med*, 49(13): 843-851.
- Berry, R. B., Brooks, R., Gamaldo, C. E., Harding, S. M., Lloyd, R. M., et al. (2017).** AASM scoring manual updates for 2017 (Version 2.4). *J Clin Sleep Med*, 13(4): 665-666.
- Biggins, M., Purtill, H., Fowler, P., Bender, A., Sullivan, K. O., et al. (2019).** Sleep in elite multi-sport athletes: Implications for athlete health and wellbeing. *Phys Ther Sport*, 39: 136-142.
- Bishop, P. A., Jones, E., & Woods, A. K. (2008).** Recovery From Training: A Brief Review. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 22(3): 1015-1024.
- Bleakley, C. M., Bieuzen, F., Davison, G. W., & Costello, J. T. (2014).** Whole-body cryotherapy: empirical evidence and theoretical perspectives. *Open Access J Sports Med*, 5: 25-36.
- Bongers, C. C. W. G., Daanen, H. A. M., Bogerd, C. P., Hopman, M. T. E., & Eijssvogels, T. M. H. (2018).** Validity, Reliability, and Inertia of Four Different Temperature Capsule Systems. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 50(1): 169-175.
- Bonnet, M. H. (1985).** Effect of sleep disruption on sleep, performance, and mood. *Sleep*, 8(1): 11-19.
- Bonnet, M. H., & Arand, D. L. (1997).** Heart rate variability: sleep stage, time of night, and arousal influences. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 102(5): 390-396.
- Borbély, A. A. (1982).** A two process model of sleep regulation. *Human neurobiology*, 1(3): 195-204.
- Borbély, A. A., Daan, S., Wirz-Justice, A., & Deboer, T. (2016).** The two-process model of sleep regulation: a reappraisal. *Journal of sleep research*, 25(2): 131-143.
- Borg, G. A. (1982).** Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(5): 377-381.
- Bouzigon, R., Ravier, G., Dugue, B., & Grappe, F. (2014).** The use of whole-body cryostimulation to improve the quality of sleep in athletes during high level standard competitions. *Br J Sports Med*, 48(7): 572.
- Brancaccio, P., Maffulli, N., Buonauro, R., & Limongelli, F. M. (2008).** Serum enzyme monitoring in sports medicine. *Clin Sports Med*, 27(1): 1-18, vii.
- Brand, S., Beck, J., Gerber, M., Hatzinger, M., & Holsboer-Trachsler, E. (2010).** Evidence of favorable sleep-EEG patterns in adolescent male vigorous football players compared to controls. *The world journal of biological psychiatry*, 11(2-2): 465-475.
- Brandenberger, G., Buchheit, M., Ehrhart, J., Simon, C., & Piquard, F. (2005).** Is slow wave sleep an appropriate recording condition for heart rate variability analysis? *Auton Neurosci*, 121(1-2): 81-86.
- Brandt, R., Bevilacqua, G. G., & Andrade, A. (2017).** Perceived sleep quality, mood states, and their relationship with performance among Brazilian elite athletes during a competitive period. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(4): 1033-1039.
- Broatch, J. R., Poignard, M., Hausswirth, C., Bishop, D. J., & Bieuzen, F. (2019).** Whole-body cryotherapy does not augment adaptations to high-intensity interval training. *Sci Rep*, 9(1): 1-11.
- Brophy-Williams, N., Landers, G., & Wallman, K. (2011).** Effect of immediate and delayed cold water immersion after a high intensity exercise session on subsequent run performance. *J Sports Sci Med*, 10(4): 665-670.
- Bulbulian, R., Heaney, J., Leake, C., Sucec, A., & Sjöholm, N. (1996).** The effect of sleep deprivation and exercise load on isokinetic leg strength and endurance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 73(3-4): 273-277.
- Bulckaert, A., Exadaktylos, V., Haex, B., De Valck, E., Verbraecken, J., & Berckmans, D. (2011).** Elevated variance in heart rate during slow-wave sleep after late-night physical activity. *Chronobiology International*, 28(3): 282-284.
- Burgess, H. J., Holmes, A. L., & Dawson, D. (2001).** The Relationship Between Slow-wave Activity, Body Temperature, and Cardiac Activity During Nighttime Sleep. *Sleep*, 24(3): 343-349.
- Buyse, D. J., Reynolds, C. F., 3rd, Monk, T. H., Berman, S. R., & Kupfer, D. J. (1989).** The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Res*, 28(2): 193-213.

- Caia, J., Halson, S. L., Scott, T. J., & Kelly, V. G. (2017a).** Intra-individual variability in the sleep of senior and junior rugby league athletes during the competitive season. *Chronobiology International*, 34(9): 1239-1247.
- Caia, J., Scott, T. J., Halson, S. L., & Kelly, V. G. (2017b).** Do players and staff sleep more during the pre- or competitive season of elite rugby league? *Eur J Sport Sci*, 17(8): 964-972.
- Caia, J., Scott, T. J., Halson, S. L., & Kelly, V. G. (2018).** The influence of sleep hygiene education on sleep in professional rugby league athletes. *Sleep Health*, 4(4): 364-368.
- Carriço, S., Skorski, S., Duffield, R., Mendes, B., Calvete, F., & Meyer, T. (2017).** Post-match sleeping behavior based on match scheduling over a season in elite football players. *Science and Medicine in Football*, 2(1): 9-15.
- Cassirame, J. (2015).** Intérêts et limites de l'utilisation de l'analyse de la variabilité de la fréquence cardiaque pour la pratique sportive. (Thèse de doctorat), *Université de Franche Comté*
- Chambon, S., Galtier, M. N., Arnal, P. J., Wainrib, G., & Gramfort, A. (2018).** A deep learning architecture for temporal sleep stage classification using multivariate and multimodal time series. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(4): 758-769.
- Chennaoui, M., Arnal, P. J., Sauvet, F., & Léger, D. (2015).** Sleep and exercise: a reciprocal issue? *Sleep medicine reviews*, 20: 59-72.
- Chennaoui, M., Bougard, C., Drogou, C., Langrume, C., Miller, C., et al. (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: 94.
- Chennaoui, M., Gomez-Merino, D., Duclos, M., & Guézennec, C. (2004).** La fatigue: mécanismes et conséquences. *Science & Sports*, 19(5): 270-279.
- Chennaoui, M., Leger, D., & Gomez-Merino, D. (2019).** Sleep and the GH/IGF-1 axis: Consequences and countermeasures of sleep loss/disorders. *Sleep medicine reviews*, 49: 101223.
- Chesterton, L. S., Foster, N. E., & Ross, L. (2002).** Skin temperature response to cryotherapy. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 83(4): 543-549.
- Cheung, K., Hume, P., & Maxwell, L. (2003).** Delayed onset muscle soreness : treatment strategies and performance factors. *Sports Med*, 33(2): 145-164.
- Christensen, J. (2018).** Mild traumatic brain injury, sleep, and pain in adolescence
- Claustrat, B. (2009).** Mélatonine et troubles du rythme veille-sommeil. *Médecine du Sommeil*, 6(1): 12-24.
- Cohen, J. (1988).** Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). *L. Erlbaum Associates*.
- Costello, J. T., Culligan, K., Selfe, J., & Donnelly, A. E. (2012).** Muscle, skin and core temperature after -110 degrees c cold air and 8 degrees c water treatment. *PLoS ONE*, 7(11): e48190.
- Costello, J. T., Donnelly, A. E., Karki, A., & Selfe, J. (2014).** Effects of whole body cryotherapy and cold water immersion on knee skin temperature. *Int J Sports Med*, 35(1): 35-40.
- Crowley, S. J., Wolfson, A. R., Tarokh, L., & Carskadon, M. A. (2018).** An update on adolescent sleep: New evidence informing the perfect storm model. *Journal of adolescence*, 67: 55-65.
- Cunniffe, B., Hore, A. J., Whitcombe, D. M., Jones, K. P., Baker, J. S., & Davies, B. (2010).** Time course of changes in immuneoendocrine markers following an international rugby game. *Eur J Appl Physiol*, 108(1): 113-122.
- Dattilo, M., Antunes, H. K., Medeiros, A., Monico Neto, M., Souza, H. S., et al. (2011).** Sleep and muscle recovery: endocrinological and molecular basis for a new and promising hypothesis. *Med Hypotheses*, 77(2): 220-222.
- Davenne, D. (2009).** Sleep of athletes – problems and possible solutions. *Biological Rhythm Research*, 40(1): 45-52.
- De Pauw, K., Roelands, B., Cheung, S. S., de Geus, B., Rietjens, G., & Meeusen, R. (2013).** Guidelines to Classify Subject Groups in Sport-Science Research. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(2): 111-122.
- De Zambotti, M., Cellini, N., Menghini, L., Sarlo, M., & Baker, F. C. (2020).** Sensors Capabilities, Performance, and Use of Consumer Sleep Technology. *Sleep Medicine Clinics*, 15(1): 1-30.
- De Zambotti, M., Rosas, L., Colrain, I. M., & Baker, F. C. (2019).** The Sleep of the Ring: Comparison of the OURA Sleep Tracker Against Polysomnography. *Behav Sleep Med*, 17(2): 124-136.
- De Zambotti, M., Trinder, J., Silvani, A., Colrain, I. M., & Baker, F. C. (2018).** Dynamic coupling between the central and autonomic nervous systems during sleep: A review. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 90: 84-103.
- Doguet, V., Jubeau, M., Dorel, S., Couturier, A., Lacourpaille, L., et al. (2016a).** Time-Course of Neuromuscular Changes during and after Maximal Eccentric Contractions. *Frontiers in physiology*, 7: 137.
- Doguet, V., Nosaka, K., Plautard, M., Gross, R., Guilhem, G., et al. (2016b).** Neuromuscular Changes and Damage after Isoload versus Isokinetic Eccentric Exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(12): 2526-2535.

- Douzi, W., Dupuy, O., Tanneau, M., Boucard, G., Bouzigon, R., & Dugue, B. (2018).** 3-min whole body cryotherapy/cryostimulation after training in the evening improves sleep quality in physically active men. *Eur J Sport Sci*, 19(6): 860-867.
- Douzi, W., Dupuy, O., Theurot, D., Boucard, G., & Dugue, B. (2019).** Partial-body cryostimulation after training improves sleep quality in professional soccer players. *BMC research notes*, 12(1): 141.
- Drake, C., Richardson, G., Roehrs, T., Scofield, H., & Roth, T. (2004).** Vulnerability to stress-related sleep disturbance and hyperarousal. *Sleep*, 27(2): 285-291.
- Drew, M., Vlahovich, N., Hughes, D., Appaneal, R., Burke, L. M., et al. (2018).** Prevalence of illness, poor mental health and sleep quality and low energy availability prior to the 2016 Summer Olympic Games. *Br J Sports Med*, 52(1): 47-53.
- Drewes, A. M., Nielsen, K. D., Arendt-Nielsen, L., Birket-Smith, L., & Hansen, L. M. (1997).** The effect of cutaneous and deep pain on the electroencephalogram during sleep--an experimental study. *Sleep*, 20(8): 632-640.
- Driller, M. W., Lastella, M., & Sharp, A. P. (2019).** Individualized sleep education improves subjective and objective sleep indices in elite cricket athletes: A pilot study. *J Sports Sci*, 37(17): 2121-2125.
- Dumortier, J., Mariman, A., Boone, J., Delesie, L., Tobback, E., et al. (2018).** Sleep, training load and performance in elite female gymnasts. *Eur J Sport Sci*, 18(2): 151-161.
- Dunican, I. C., & Eastwood, P. R. (2017).** Sleep is an important factor when considering rugby union player load. *Br J Sports Med*, 51(22): 1640-1640.
- Dunican, I. C., Higgins, C. C., Jones, M. J., Clarke, M. W., Murray, K., et al. (2018).** Caffeine use in a Super Rugby game and its relationship to post-game sleep. *Eur J Sport Sci*, 18(4): 513-523.
- Dunican, I. C., Martin, D. T., Halson, S. L., Reale, R. J., Dawson, B. T., et al. (2017).** The Effects of the Removal of Electronic Devices for 48 Hours on Sleep in Elite Judo Athletes. *J Strength Cond Res*, 31(10): 2832-2839.
- Dunican, I. C., Walsh, J., Higgins, C. C., Jones, M. J., Maddison, K., et al. (2019).** Prevalence of sleep disorders and sleep problems in an elite super rugby union team. *J Sports Sci*, 37(8): 950-957.
- Duthie, G., Pyne, D., & Hooper, S. (2003).** Applied physiology and game analysis of rugby union. *Sports Med*, 33(13): 973-991.
- Dworak, M., Wiater, A., Alfer, D., Stephan, E., Hollmann, W., & Struder, H. K. (2008).** Increased slow wave sleep and reduced stage 2 sleep in children depending on exercise intensity. *Sleep medicine*, 9(3): 266-272.
- Eagles, A., Mclellan, C., Hing, W., Carlross, N., & Lovell, D. (2014).** Changes in sleep quantity and efficiency in professional rugby union players during home based training and match-play. *J Sports Med Phys Fitness*.
- Easthope, C. S., Hausswirth, C., Louis, J., Lepers, R., Vercruyssen, F., & Brisswalter, J. (2010).** Effects of a trail running competition on muscular performance and efficiency in well-trained young and master athletes. *Eur J Appl Physiol*, 110(6): 1107-1116.
- Easthope, C. S., Nosaka, K., Caillaud, C., Vercruyssen, F., Louis, J., & Brisswalter, J. (2014).** Reproducibility of performance and fatigue in trail running. *J Sci Med Sport*, 17(2): 207-211.
- Edwards, B. J., & Waterhouse, J. (2009).** Effects of one night of partial sleep deprivation upon diurnal rhythms of accuracy and consistency in throwing darts. *Chronobiology International*, 26(4): 756-768.
- Ehrlenspiel, F., Erlacher, D., & Ziegler, M. (2018).** Changes in subjective sleep quality before a competition and their relation to competitive anxiety. *Behav Sleep Med*, 16(6): 553-568.
- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2016).** Translating Fatigue to Human Performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(11): 2228-2238.
- Erlacher, D., Ehrlenspiel, F., Adegbesan, O. A., & El-Din, H. G. (2011).** Sleep habits in German athletes before important competitions or games. *J Sports Sci*, 29(8): 859-866.
- Eston, R. G., Mickleborough, J., & Baltzopoulos, V. (1995).** Eccentric activation and muscle damage: biomechanical and physiological considerations during downhill running. *Br J Sports Med*, 29(2): 89-94.
- Fiorillo, L., Puiatti, A., Papandrea, M., Ratti, P. L., Favaro, P., et al. (2019).** Automated sleep scoring: A review of the latest approaches. *Sleep medicine reviews*, 48: 101204.
- Flausino, N. H., Da Silva Prado, J. M., de Queiroz, S. S., Tufik, S., & de Mello, M. T. (2012).** Physical exercise performed before bedtime improves the sleep pattern of healthy young good sleepers. *Psychophysiology*, 49(2): 186-192.
- Fonseca, P., van Gilst, M. M., Radha, M., Ross, M., Moreau, A., et al. (2020).** Automatic sleep staging using heart rate variability, body movements, and recurrent neural networks in a sleep disordered population. *Sleep*.
- Fonseca, P., Weysen, T., Goelema, M. S., Most, E. I. S., Radha, M., et al. (2017).** Validation of Photoplethysmography-Based Sleep Staging Compared With Polysomnography in Healthy Middle-Aged Adults. *Sleep*, 40(7).
- Foster, C. (1998).** Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30: 1164-1168.

- Foster, C., Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., et al. (2001).** A new approach to monitoring exercise training. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 15(1): 109-115.
- Fowler, P., Duffield, R., Waterson, A., & Vaile, J. (2014).** Effects of Regular Away Travel on Training Loads, Recovery and Injury Rates in Professional Australian Soccer Players. *Int J Sports Physiol Perform*, 10(5): 546-552.
- Fox, J. L., Scanlan, A. T., Stanton, R., & Sargent, C. (2020).** Insufficient Sleep in Young Athletes? Causes, Consequences, and Potential Treatments. *Sports Med*, 50(3): 461-470.
- Frank, M. G. (2006).** The mystery of sleep function: current perspectives and future directions. *Reviews in the Neurosciences*, 17(4): 375-392.
- Fullagar, H. H., Duffield, R., Skorski, S., White, D., Bloomfield, J., et al. (2016a).** Sleep, Travel, and Recovery Responses of National Footballers During and After Long-Haul International Air Travel. *Int J Sports Physiol Perform*, 11(1): 86-95.
- Fullagar, H. H., Skorski, S., Duffield, R., Hammes, D., Coutts, A. J., & Meyer, T. (2015).** Sleep and athletic performance: the effects of sleep loss on exercise performance, and physiological and cognitive responses to exercise. *Sports Med*, 45(2): 161-186.
- Fullagar, H. H., Skorski, S., Duffield, R., Julian, R., Bartlett, J., & Meyer, T. (2016b).** Impaired sleep and recovery after night matches in elite football players. *J Sports Sci*, 34(14): 1333-1339.
- Fuller, K. L., Juliff, L., Gore, C. J., Peiffer, J. J., & Halson, S. L. (2017).** Software thresholds alter the bias of actigraphy for monitoring sleep in team-sport athletes. *J Sci Med Sport*, 20(8): 756-760.
- Gandevia, S. C. (2001).** Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev*, 81(4): 1725-1789.
- Giandolini, M., Horvais, N., Rossi, J., Millet, G. Y., Morin, J. B., & Samozino, P. (2016).** Acute and delayed peripheral and central neuromuscular alterations induced by a short and intense downhill trail run. *Scand J Med Sci Sports*, 26(11): 1321-1333.
- Gronfier, C., Luthringer, R., Follenius, M., Schaltenbrand, N., Macher, J. P., et al. (1996).** A Quantitative Evaluation of the Relationships Between Growth Hormone Secretion and Delta Wave Electroencephalographic Activity During Normal Sleep and After Enrichment in Delta Waves. *Sleep*, 19(10): 817-824.
- Gudmundsdottir, S. L. (2020).** Training Schedule and Sleep in Adolescent Swimmers. *Pediatric exercise science*, 32(1): 16-22.
- Gupta, L., Morgan, K., & Gilchrist, S. (2016).** Does Elite Sport Degrade Sleep Quality? A Systematic Review. *Sports Med*, 47(7): 1317-1333.
- Haack, M., & Mullington, J. M. (2005).** Sustained sleep restriction reduces emotional and physical well-being. *Pain*, 119(1-3): 56-64.
- Haghighy, S., Khoshnevis, S., Smolensky, M. H., Diller, K. R., & Castriotta, R. J. (2019).** Before-bedtime passive body heating by warm shower or bath to improve sleep: A systematic review and meta-analysis. *Sleep medicine reviews*, 46: 124-135.
- Hainline, B., Derman, W., Vernec, A., Budgett, R., Deie, M., et al. (2017).** International Olympic Committee consensus statement on pain management in elite athletes. *Br J Sports Med*, 51(17): 1245-1258.
- HajSalem, M., Chtourou, H., Aloui, A., Hammouda, O., & Souissi, N. (2013).** Effects of partial sleep deprivation at the end of the night on anaerobic performances in judokas. *Biological Rhythm Research*, 44(5): 815-821.
- Halsen, S. L. (2008).** Nutrition, sleep and recovery. *Eur J Sport Sci*, 8(2): 119-126.
- Halsen, S. L. (2011).** Does the time frame between exercise influence the effectiveness of hydrotherapy for recovery? *Int J Sports Physiol Perform*, 6(2): 147-159.
- Halsen, S. L. (2014).** Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Med*, 44 Suppl 2: S139-147.
- Halsen, S. L. (2016).** Stealing sleep: is sport or society to blame? *Br J Sports Med*, 50(7): 381-381.
- Halsen, S. L. (2019).** Sleep monitoring in athletes: motivation, methods, miscalculations and why it matters. *Sports Med*, 49(10): 1487-1497.
- Halsen, S. L., & Juliff, L. E. (2017).** Sleep, sport, and the brain. *Prog Brain Res*, 234: 13-31.
- Halstead, M. E., Walter, K. D., & the Council on Sports, M. F. (2010).** Clinical report -- Sport-related concussion in children and adolescents. *The American Academy of Pediatrics*, 126(3): 597-615.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988).** Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research Advances in psychology (Vol. 52, pp. 139-183). *Elsevier*.
- Hauswirth, C. (2010).** Récupération et performance en sport: S'améliorer à haut-niveau par la récupération. *INSEP*.
- Hauswirth, C., Louis, J., Aubry, A., Bonnet, G., Duffield, R., & Le Meur, Y. (2014).** Evidence of Disturbed Sleep and Increased Illness in Overreached Endurance Athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 46(5): 1036-1045.

- Hauswirth, C., Louis, J., Bieuzen, F., Pournot, H., Fournier, J., et al. (2011).** Effects of whole-body cryotherapy vs. far-infrared vs. passive modalities on recovery from exercise-induced muscle damage in highly-trained runners. *PLoS ONE*, 6(12): e27749.
- Hauswirth, C., & Mujika, I. (2013).** Recovery for Performance in Sport. *Human Kinetics*.
- Hauswirth, C., Schaal, K., Le Meur, Y., Bieuzen, F., Filliard, J. R., et al. (2013).** Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation. *PLoS ONE*, 8(8): e72658.
- Hayashi, Y., Nishihira, Y., Higashiura, T., & Usui, S. (2014).** The effects of different intensities of exercise on night sleep. *Advances in exercise and sports physiology*, 20(1): 19-24.
- Hecksteden, A., Pitsch, W., Julian, R., Pfeiffer, M., Kellmann, M., et al. (2017).** A new method to individualize monitoring of muscle recovery in athletes. *Int J Sports Physiol Perform*, 12(9): 1137-1142.
- Herberger, S., Kräuchi, K., Glos, M., Lederer, K., Assmus, L., et al. (2019).** Effects of sleep on a high-heat capacity mattress on sleep stages, EEG power spectra, cardiac interbeat intervals and body temperatures in healthy middle-aged men. *Sleep*, 43(5).
- Hirshkowitz, M., Whiton, K., Albert, S. M., Alessi, C., Bruni, O., et al. (2015).** National Sleep Foundation's updated sleep duration recommendations: final report. *Sleep Health*, 1(4): 233-243.
- Hooper, S. L., & Mackinnon, L. T. (1995).** Monitoring overtraining in athletes. Recommendations. *Sports Med*, 20(5): 321-327.
- Horder, M., Jorgensen, P. J., Hafkenschied, J. C., Carstensen, C. A., Bachmann, C., et al. (1991).** Creatine kinase determination: a European evaluation of the creatine kinase determination in serum, plasma and whole blood with the Reflotron system. *European journal of clinical chemistry and clinical biochemistry : journal of the Forum of European Clinical Chemistry Societies*, 29(10): 691-696.
- Horne, J., Brass, C., & Petitt, A. (1980).** Circadian performance differences between morning and evening 'types'. *Ergonomics*, 23(1): 29-36.
- Horne, J. A., & Ostberg, O. (1976).** A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *Int J Chronobiol*, 4(2): 97-110.
- Howatson, G., & Van Someren, K. A. (2008).** The prevention and treatment of exercise-induced muscle damage. *Sports Med*, 38(6): 483-503.
- Ibanez, V., Silva, J., & Cauli, O. (2018).** A survey on sleep questionnaires and diaries. *Sleep medicine*, 42: 90-96.
- Ihsan, M., Watson, G., & Abbiss, C. R. (2016).** What are the Physiological Mechanisms for Post-Exercise Cold Water Immersion in the Recovery from Prolonged Endurance and Intermittent Exercise? *Sports Med*, 46(8): 1095-1109.
- Impellizzeri, F. M., Rampinini, E., Coutts, A. J., Sassi, A., & Marcora, S. M. (2004).** Use of RPE-based training load in soccer. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(6): 1042-1047.
- Jarraya, S., Jarraya, M., Chtourou, H., & Souissi, N. (2013).** Effect of time of day and partial sleep deprivation on the reaction time and the attentional capacities of the handball goalkeeper. *Biological Rhythm Research*, 45(2): 183-191.
- Johns, M. W. (1991).** A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. *Sleep*, 14(6): 540-545.
- Jones, M. J., Dawson, B., Gucciardi, D. F., Eastwood, P. R., Miller, J., et al. (2019).** Evening electronic device use and sleep patterns in athletes. *J Sports Sci*, 37(8): 864-870.
- Jones, M. R., West, D. J., Harrington, B. J., Cook, C. J., Bracken, R. M., et al. (2014).** Match play performance characteristics that predict post-match creatine kinase responses in professional rugby union players. *BMC Sports Sci Med Rehabil*, 6(1): 38.
- Juliff, L., Peiffer, J. J., & Halson, S. (2017).** Night Games: Physiological, Neuroendocrine and Psychometric Mechanisms to Explain Poor Sleep. *Int J Sports Physiol Perform*: 1-22.
- Juliff, L. E., Halson, S. L., Hebert, J. J., Forsyth, P. L., & Peiffer, J. J. (2018a).** Longer Sleep Durations Are Positively Associated With Finishing Place During a National Multiday Netball Competition. *J Strength Cond Res*, 32(1): 189-194.
- Juliff, L. E., Halson, S. L., & Peiffer, J. J. (2014).** Understanding sleep disturbance in athletes prior to important competitions. *J Sci Med Sport*, 18(1): 13-18.
- Juliff, L. E., Peiffer, J. J., & Halson, S. L. (2018b).** Night Games: Physiological, Neuroendocrine and Psychometric Mechanisms to Explain Poor Sleep. *Int J Sports Physiol Perform*, 13(7): 867-873.
- Karni, A., Tanne, D., Rubenstein, B. S., Askenasy, J., & Sagi, D. (1994).** Dependence on REM sleep of overnight improvement of a perceptual skill. *Science*, 265(5172): 679-682.
- Kayashima, S., Ohno, H., Fujioka, T., Taniguchi, N., & Nagata, N. (1995).** Leucocytosis as a marker of organ damage induced by chronic strenuous physical exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 70(5): 413-420.
- Kelly, J. M., Strecker, R. E., & Bianchi, M. T. (2012).** Recent developments in home sleep-monitoring devices. *ISRN neurology*, 2012: 768-794.

- Kenttä, G., & Hassmén, P. (1998). Overtraining and recovery. A conceptual model. *Sports Med*, 26(1): 1-16.
- Kern, W., Perras, B., Wodick, R., Fehm, H. L., & Born, J. (1995). Hormonal secretion during nighttime sleep indicating stress of daytime exercise. *Journal of Applied Physiology*, 79(5): 1461-1468.
- Killer, S. C., Svendsen, I. S., Jeukendrup, A. E., & Gleeson, M. (2017). Evidence of disturbed sleep and mood state in well-trained athletes during short-term intensified training with and without a high carbohydrate nutritional intervention. *J Sports Sci*, 35(14): 1402-1410.
- Knufinke, M., Nieuwenhuys, A., Geurts, S. A. E., Coenen, A. M. L., & Kompier, M. A. J. (2018a). Self-reported sleep quantity, quality and sleep hygiene in elite athletes. *Journal of sleep research*, 27(1): 78-85.
- Knufinke, M., Nieuwenhuys, A., Geurts, S. A. E., Most, E. I. S., Maase, K., et al. (2018b). Train hard, sleep well? Perceived training load, sleep quantity and sleep stage distribution in elite level athletes. *J Sci Med Sport*, 21(4): 427-432.
- Knufinke, M., Nieuwenhuys, A., Maase, K., Moen, M. H., Geurts, S. A. E., et al. (2018c). Effects of natural between-days variation in sleep on elite athletes' psychomotor vigilance and sport-specific measures of performance. *J Sports Sci Med*, 17(4): 515.
- Kolling, S., Duffield, R., Erlacher, D., Venter, R., & Halson, S. L. (2019). Sleep-Related Issues for Recovery and Performance in Athletes. *Int J Sports Physiol Perform*, 14(2): 144-148.
- Kolling, S., Steinacker, J. M., Endler, S., Ferrauti, A., Meyer, T., & Kellmann, M. (2016a). The longer the better: Sleep-wake patterns during preparation of the World Rowing Junior Championships. *Chronobiology International*, 33(1): 73-84.
- Kolling, S., Wiewelhove, T., Raeder, C., Endler, S., Ferrauti, A., et al. (2016b). Sleep monitoring of a six-day microcycle in strength and high-intensity training. *Eur J Sport Sci*, 16(5): 507-515.
- Krauchi, K. (2007). The thermophysiological cascade leading to sleep initiation in relation to phase of entrainment. *Sleep medicine reviews*, 11(6): 439-451.
- Kräuchi, K. (2007). The human sleep-wake cycle reconsidered from a thermoregulatory point of view. *Physiology & Behavior*, 90(2-3): 236-245.
- Kräuchi, K., Cajochen, C., Werth, E., & Wirz-Justice, A. (2000). Functional link between distal vasodilation and sleep-onset latency? *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 278(3): 741-748.
- Kräuchi, K., Cajochen, C., & Wirz-Justice, A. (1998). Circadian and homeostatic regulation of core body temperature and alertness in humans: what is the role of melatonin. *Circadian Clocks and Entrainment*, 7: 131-146.
- Kräuchi, K., & Deboer, T. (2010). The interrelationship between sleep regulation and thermoregulation. *Frontiers in bioscience : a journal and virtual library*, 15: 604-625.
- Krauchi, K., Fattori, E., Giordano, A., Falbo, M., Iadarola, A., et al. (2018). Sleep on a high heat capacity mattress increases conductive body heat loss and slow wave sleep. *Physiology & Behavior*, 185: 23-30.
- Lacome, M., Carling, C., Hager, J. P., Dine, G., & Piscione, J. (2018). Workload, Fatigue, and Muscle Damage in an Under-20 Rugby Union Team Over an Intensified International Tournament. *Int J Sports Physiol Perform*, 13(8): 1059-1066.
- Lacome, M., Peeters, A., Mathieu, B., Bruno, M., Christopher, C., & Piscione, J. (2019). Can we use GPS for assessing sprinting performance in rugby sevens? A concurrent validity and between-device reliability study. *Biology of Sport*, 36(1): 25-29.
- Lacome, M., Piscione, J., Hager, J. P., & Carling, C. (2017). Fluctuations in running and skill-related performance in elite rugby union match-play. *Eur J Sport Sci*, 17(2): 132-143.
- Lalor, B. J., Halson, S. L., Tran, J., Kemp, J. G., & Cormack, S. J. (2020). A Complex Relationship: Sleep, External Training Load, and Well-Being in Elite Australian Footballers. *Int J Sports Physiol Perform*: 1-11.
- Lang, C., Kalak, N., Brand, S., Holsboer-Trachsler, E., Pühse, U., & Gerber, M. (2016). The relationship between physical activity and sleep from mid adolescence to early adulthood. A systematic review of methodological approaches and meta-analysis. *Sleep medicine reviews*, 28: 32-45.
- Larsen, P., Marino, F., Melehan, K., Guelfi, K. J., Duffield, R., & Skein, M. (2019). Evening high-intensity interval exercise does not disrupt sleep or alter energy intake despite changes in acylated ghrelin in middle-aged men. *Exp Physiol*, 104(6): 826-836.
- Lastella, M., Lovell, G. P., & Sargent, C. (2014a). Athletes' precompetitive sleep behaviour and its relationship with subsequent precompetitive mood and performance. *Eur J Sport Sci*, 14(sup1): S123-S130.
- Lastella, M., Memon, A. R., & Vincent, G. E. (2020a). Global Research Output on Sleep Research in Athletes from 1966 to 2019: A Bibliometric Analysis. *Clocks & Sleep*, 2(2): 99-119.
- Lastella, M., Roach, G. D., Halson, S. L., Martin, D. T., West, N. P., & Sargent, C. (2014b). Sleep/wake behaviour of endurance cyclists before and during competition. *J Sports Sci*, 33(3): 293-299.
- Lastella, M., Roach, G. D., Halson, S. L., & Sargent, C. (2014c). Sleep/wake behaviours of elite athletes from individual and team sports. *Eur J Sport Sci*, 15(2): 94-100.

- Lastella, M., Roach, G. D., Halson, S. L., & Sargent, C. (2016).** The Chronotype of Elite Athletes. *J Hum Kinet*, 54(1): 219-225.
- Lastella, M., Roach, G. D., Halson, S. L., & Sargent, C. (2019).** The effects of cold water immersion on the amount and quality of sleep obtained by elite cyclists during a simulated hill climbing tour. *Sport Sciences for Health*, 15(1): 223-228.
- Lastella, M., Roach, G. D., Vincent, G. E., Scanlan, A. T., Halson, S. L., & Sargent, C. (2020b).** The Impact of Training Load on Sleep During a 14-Day Training Camp in Elite, Adolescent, Female Basketball Players. *Int J Sports Physiol Perform*, 15(5): 724-730.
- Lattier, G., Millet, G. Y., Martin, A., & Martin, V. (2004).** Fatigue and recovery after high-intensity exercise part I: neuromuscular fatigue. *Int J Sports Med*, 25(6): 450-456.
- Le Meur, Y., Skein, M., & Duffield, R. (2013).** Le sommeil. In C. Hausswirth (Ed.), *Améliorer sa récupération en sport* (2nd ed.). INSEP.
- Lee, H., Xie, L., Yu, M., Kang, H., Feng, T., et al. (2015).** The Effect of Body Posture on Brain Glymphatic Transport. *J Neurosci*, 35(31): 11034-11044.
- Leeder, J., Glaister, M., Pizzoferrero, K., Dawson, J., & Pedlar, C. (2012).** Sleep duration and quality in elite athletes measured using wristwatch actigraphy. *J Sports Sci*, 30(6): 541-545.
- Leger, D., Beck, F., Richard, J.-B., & Godeau, E. (2012).** Total sleep time severely drops during adolescence. *PLoS ONE*, 7(10): e45204.
- Léger, D., Massuel, M. A., Metlaine, A., & Group, T. S. S. (2006).** Professional Correlates of Insomnia. *Sleep*, 29(2): 171-178.
- Lepers, R., Hausswirth, C., Maffiuletti, N., Brisswalter, J., & van Hoecke, J. (2000).** Evidence of neuromuscular fatigue after prolonged cycling exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(11): 1880-1886.
- Leung, A. W. S., Chan, C. C. H., Lee, A. H. S., & Lam, K. W. H. (2004).** Visual Analogue Scale Correlates of Musculoskeletal Fatigue. *Perceptual and motor skills*, 99(1): 235-246.
- Lombardi, G., Ziemann, E., & Banfi, G. (2017).** Whole-Body Cryotherapy in Athletes: From Therapy to Stimulation. An Updated Review of the Literature. *Frontiers in physiology*, 8: 258.
- Louis, J., Schaal, K., Bieuzen, F., Le Meur, Y., Filliard, J. R., et al. (2015).** Head Exposure to Cold during Whole-Body Cryostimulation: Influence on Thermal Response and Autonomic Modulation. *PLoS ONE*, 10(4): e0124776.
- Louis, J., Theurot, D., Filliard, J. R., Volondati, M., Dugue, B., & Dupuy, O. (2020).** The use of whole-body cryotherapy: time- and dose-response investigation on circulating blood catecholamines and heart rate variability. *Eur J Appl Physiol*.
- Luo, J., Phan, T. X., Yang, Y., Garelick, M. G., & Storm, D. R. (2013).** Increases in cAMP, MAPK activity, and CREB phosphorylation during REM sleep: implications for REM sleep and memory consolidation. *J Neurosci*, 33(15): 6460-6468.
- Mah, C. D. (2008).** Extended sleep and the effects on mood and athletic performance in collegiate swimmers. *Sleep*, 31(Suppl.): A128.
- Mah, C. D., Kezirian, E. J., Marcello, B. M., & Dement, W. C. (2018).** Poor sleep quality and insufficient sleep of a collegiate student-athlete population. *Sleep Health*, 4(3): 251-257.
- Mah, C. D., Mah, K. E., Kezirian, E. J., & Dement, W. C. (2011).** The effects of sleep extension on the athletic performance of collegiate basketball players. *Sleep*, 34(7): 943-950.
- Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009).** Mental fatigue impairs physical performance in humans. *J Appl Physiol*, 106(3): 857-864.
- Martin, B. J. (1981).** Effect of sleep deprivation on tolerance of prolonged exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 47(4): 345-354.
- Martin, B. J., & Chen, H. I. (1984).** Sleep loss and the sympathoadrenal response to exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 16(1): 56-59.
- Mathieu, B., Peeters, A., Piscione, J., & Lacome, M. (2017).** Usefulness of typical tests of short-duration maximal effort used to assess players readiness to perform. *Science Performance and Science Reports*.
- McLean, B. D., Coutts, A. J., Kelly, V., McGuigan, M. R., & Cormack, S. J. (2010).** Neuromuscular, endocrine, and perceptual fatigue responses during different length between-match microcycles in professional rugby league players. *Int J Sports Physiol Perform*, 5(3): 367-383.
- McLellan, C. P., Lovell, D. I., & Gass, G. C. (2011a).** Biochemical and endocrine responses to impact and collision during elite rugby league match play. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(6): 1553-1562.
- McLellan, C. P., Lovell, D. I., & Gass, G. C. (2011b).** Markers of postmatch fatigue in professional rugby league players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(4): 1030-1039.

- Mejri, M. A., Hammouda, O., Zouaoui, K., Chaouachi, A., Chamari, K., et al. (2014).** Effect of two types of partial sleep deprivation on Taekwondo players' performance during intermittent exercise. *Biological Rhythm Research*, 45(1): 17-26.
- Metzger, D., Zwingmann, C., Protz, W., & Jackel, W. H. (2000).** Whole-body cryotherapy in rehabilitation of patients with rheumatoid diseases -- pilot study. *Die Rehabilitation*, 39(2): 93-100.
- Mezick, E. J., Matthews, K. A., Hall, M., Kamarck, T. W., Buysse, D. J., et al. (2009).** Intra-individual variability in sleep duration and fragmentation: associations with stress. *Psychoneuroendocrinology*, 34(9): 1346-1354.
- Milewski. (2014).** Chronic lack of sleep is associated with increased sports injuries in adolescent athletes. *J Pediatr Orthop*, 34(2): 129-133.
- Milewski, M. D., Skaggs, D. L., Bishop, G. A., Pace, J. L., Ibrahim, D. A., et al. (2014).** Chronic Lack of Sleep is Associated With Increased Sports Injuries in Adolescent Athletes. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 34(2): 129-133
- Miller, D. J., Sargent, C., Roach, G. D., Scanlan, A. T., Vincent, G. E., & Lastella, M. (2020).** Moderate-intensity exercise performed in the evening does not impair sleep in healthy males. *Eur J Sport Sci*, 20(1): 80-89.
- Miller, D. J., Sargent, C., Vincent, G. E., Roach, G. D., Halson, S. L., & Lastella, M. (2017).** Sleep/wake behaviours in elite athletes from three different football codes. *J Sports Sci Med*, 16(4): 604-605.
- Millet, G. Y., & Lepers, R. (2004).** Alterations of neuromuscular function after prolonged running, cycling and skiing exercises. *Sports Med*, 34(2): 105-116.
- Millet, G. Y., Martin, V., Lattier, G., & Ballay, Y. (2003).** Mechanisms contributing to knee extensor strength loss after prolonged running exercise. *Journal of Applied Physiology*, 94(1): 193-198.
- Moldofsky, H. (2001).** Sleep and pain. *Sleep medicine reviews*, 5(5): 385-396.
- Mougin, F., Davenne, D., Simon-Rigaud, M., Renaud, A., Garnier, A., & Magnin, P. (1989).** Disturbance of sports performance after partial sleep deprivation. *Comptes rendus des seances de la Societe de biologie et de ses filiales*, 183(5): 461-466.
- Mougin, F., Simon-Rigaud, M., Davenne, D., Renaud, A., Garnier, A., et al. (1991).** Effects of sleep disturbances on subsequent physical performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 63(2): 77-82.
- Mujika, I., Halson, S., Burke, L. M., Balague, G., & Farrow, D. (2018).** An Integrated, Multifactorial Approach to Periodization for Optimal Performance in Individual and Team Sports. *Int J Sports Physiol Perform*, 13(5): 538-561.
- Muzet, A., Werner, S., Fuchs, G., Roth, T., Saoud, J. B., et al. (2016).** Assessing sleep architecture and continuity measures through the analysis of heart rate and wrist movement recordings in healthy subjects: comparison with results based on polysomnography. *Sleep medicine*, 21: 47-56.
- Myllymaki, T., Kyrolainen, H., Savolainen, K., Hokka, L., Jakonen, R., et al. (2011).** Effects of vigorous late-night exercise on sleep quality and cardiac autonomic activity. *Journal of sleep research*, 20(1 Pt 2): 146-153.
- Myllymaki, T., Rusko, H., Syvaaja, H., Juuti, T., Kinnunen, M. L., & Kyrolainen, H. (2012).** Effects of exercise intensity and duration on nocturnal heart rate variability and sleep quality. *Eur J Appl Physiol*, 112(3): 801-809.
- Nédélec, M., Aloulou, A., Duforez, F., Meyer, T., & Dupont, G. (2018).** The Variability of Sleep Among Elite Athletes. *Sports Med Open*, 4(1): 34.
- Nédélec, M., Dawson, B., & Dupont, G. (2019).** Influence of night soccer matches on sleep in elite players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 33(1): 174-179.
- Nédélec, M., Halson, S., Abaidia, A. E., Ahmaidi, S., & Dupont, G. (2015a).** Stress, Sleep and Recovery in Elite Soccer: A Critical Review of the Literature. *Sports Med*, 45(10): 1387-1400.
- Nédélec, M., Halson, S., Delecroix, B., Abaidia, A. E., Ahmaidi, S., & Dupont, G. (2015b).** Sleep Hygiene and Recovery Strategies in Elite Soccer Players. *Sports Med*, 45(11): 1547-1559.
- Nédélec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., & Dupont, G. (2012).** Recovery in soccer: part I - post-match fatigue and time course of recovery. *Sports Med*, 42(12): 997-1015.
- Nédélec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., & Dupont, G. (2013).** Recovery in soccer : part ii-recovery strategies. *Sports Med*, 43(1): 9-22.
- Nédélec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., & Dupont, G. (2014).** The influence of soccer playing actions on the recovery kinetics after a soccer match. *J Strength Cond Res*, 28(6): 1517-1523.
- Noon, M. R., James, R. S., Clarke, N. D., Akubat, I., & Thake, C. D. (2015).** Perceptions of well-being and physical performance in English elite youth footballers across a season. *J Sports Sci*, 33(20): 2106-2115.
- O'Connor, P. J., Breus, M. J., & Youngstedt, S. D. (1998).** Exercise-induced increase in core temperature does not disrupt a behavioral measure of sleep. *Physiology & Behavior*, 64(3): 213-217.
- O'Donnell, S., Bird, S., Jacobson, G., & Driller, M. (2018).** Sleep and stress hormone responses to training and competition in elite female athletes. *Eur J Sport Sci*, 18(5): 611-618.

- O'Donnell, S., & Driller, M. W. (2017). Sleep-hygiene education improves sleep indices in elite female athletes. *International journal of exercise science*, 10(4): 522.
- Obal, F., Jr., & Krueger, J. M. (2004). GHRH and sleep. *Sleep medicine reviews*, 8(5): 367-377.
- Oda, S., & Shirakawa, K. (2014). Sleep onset is disrupted following pre-sleep exercise that causes large physiological excitement at bedtime. *Eur J Appl Physiol*, 114(9): 1789-1799.
- Ohayon, M., Wickwire, E. M., Hirshkowitz, M., Albert, S. M., Avidan, A., et al. (2017). National Sleep Foundation's sleep quality recommendations: first report. *Sleep Health*, 3(1): 6-19.
- Ohayon, M. M. (2009). Pain sensitivity, depression, and sleep deprivation: links with serotonergic dysfunction. *Journal of psychiatric research*, 43(16): 1243-1245.
- Öhrström, E., & Skånberg, A. (2004). Sleep disturbances from road traffic and ventilation noise—laboratory and field experiments. *Journal of Sound and Vibration*, 271(1-2): 279-296.
- Okamoto-Mizuno, K., & Mizuno, K. (2012). Effects of thermal environment on sleep and circadian rhythm. *J Physiol Anthropol*, 31: 14.
- Okamoto-Mizuno, K., Tsuzuki, K., Mizuno, K., & Iwaki, T. (2005). Effects of partial humid heat exposure during different segments of sleep on human sleep stages and body temperature. *Physiology & Behavior*, 83(5): 759-765.
- Oliver, S. J., Costa, R. J., Laing, S. J., Bilzon, J. L., & Walsh, N. P. (2009). One night of sleep deprivation decreases treadmill endurance performance. *Eur J Appl Physiol*, 107(2): 155-161.
- OMS. (2010). Recommendations mondiales en matière d'activité physique pour la santé. Retrieved from https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44436/9789242599978_fre.pdf?ua=1
- Onen, S. H., Alloui, A., Jourdan, D., Eschalié, A., & Dubray, C. (2001). Effects of rapid eye movement (REM) sleep deprivation on pain sensitivity in the rat. *Brain Research*, 900(2): 261-267.
- Paffenbarger, R. S., Jr., & Lee Jr, I.-M. (1998). A natural history of athleticism, health and longevity. *J Sports Sci*, 16(sup1): 31-45.
- Pallesen, S., Gundersen, H. S., Kristoffersen, M., Bjorvatn, B., Thun, E., & Harris, A. (2017). The effects of sleep deprivation on soccer skills. *Perceptual and motor skills*, 124(4): 812-829.
- Patel, K., Bakshi, N., Freehill, M. T., & Awan, T. M. (2019). Whole-Body Cryotherapy in Sports Medicine. *Current Sports Medicine Reports*, 18(4): 136-140.
- Paulsen, G., Benestad, H. B., Strom-Gundersen, I., Morkrid, L., Lappegaard, K. T., & Raastad, T. (2005). Delayed leukocytosis and cytokine response to high-force eccentric exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(11): 1877-1883.
- Paulsen, G., Cramer, R., Benestad, H. B., Fjeld, J. G., Morkrid, L., et al. (2010). Time course of leukocyte accumulation in human muscle after eccentric exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(1): 75-85.
- Paulsen, G., Mikkelsen, U. R., Raastad, T., & Peake, J. M. (2012). Leucocytes, cytokines and satellite cells: what role do they play in muscle damage and regeneration following eccentric exercise? *Exerc Immunol Rev*, 18: 42-97.
- Perrey, S., Racinais, S., Saimouaa, K., & Girard, O. (2010). Neural and muscular adjustments following repeated running sprints. *Eur J Appl Physiol*, 109(6): 1027-1036.
- Petraglia, A. L., Plog, B. A., Dayawansa, S., Chen, M., Dashnaw, M. L., et al. (2014). The spectrum of neurobehavioral sequelae after repetitive mild traumatic brain injury: a novel mouse model of chronic traumatic encephalopathy. *J Neurotrauma*, 31(13): 1211-1224.
- Pitchford, N. W., Robertson, S. J., Sargent, C., Cordy, J., Bishop, D. J., & Bartlett, J. D. (2017). Sleep Quality but Not Quantity Altered With a Change in Training Environment in Elite Australian Rules Football Players. *Int J Sports Physiol Perform*, 12(1): 75-80.
- Pober, D. M., Braun, B., & Freedson, P. S. (2004). Effects of a single bout of exercise on resting heart rate variability. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(7): 1140-1148.
- Pournot, H., Bieuzen, F., Louis, J., Mounier, R., Fillard, J. R., et al. (2011). Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PLoS ONE*, 6(7): e22748.
- Quante, M., Kaplan, E. R., Rueschman, M., Cailler, M., Buxton, O. M., & Redline, S. (2015). Practical considerations in using accelerometers to assess physical activity, sedentary behavior, and sleep. *Sleep Health*, 1(4): 275-284.
- Quarrie, K. L., Raftery, M., Blackie, J., Cook, C. J., Fuller, C. W., et al. (2017). Managing player load in professional rugby union: a review of current knowledge and practices. *Br J Sports Med*, 51(5): 421-427.
- Radha, M., Fonseca, P., Moreau, A., Ross, M., Cerny, A., et al. (2019). Sleep stage classification from heart-rate variability using long short-term memory neural networks. *Sci Rep*, 9(1): 14149.
- Rae, D. E., Stephenson, K. J., & Roden, L. C. (2015). Factors to consider when assessing diurnal variation in sports performance: the influence of chronotype and habitual training time-of-day. *Eur J Appl Physiol*, 115(6): 1339-1349.

- Ramos-Campo, D. J., Avila-Gandia, V., Luque, A. J., & Rubio-Arias, J. A. (2019).** Effects of hour of training and exercise intensity on nocturnal autonomic modulation and sleep quality of amateur ultra-endurance runners. *Physiology & Behavior*, 198: 134-139.
- Raymann, R. J., Swaab, D. F., & Van Someren, E. J. (2005).** Cutaneous warming promotes sleep onset. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 288(6): R1589-1597.
- Raymann, R. J., Swaab, D. F., & Van Someren, E. J. (2008).** Skin deep: enhanced sleep depth by cutaneous temperature manipulation. *Brain*, 131(Pt 2): 500-513.
- Reardon, C. L., Hainline, B., Aron, C. M., Baron, D., Baum, A. L., et al. (2019).** Mental health in elite athletes: International Olympic Committee consensus statement (2019). *Br J Sports Med*, 53(11): 667-699.
- Reilly, T., & Deykin, T. (1983).** Effects of partial sleep loss on subjective states, psychomotor and physical performance tests. *Journal of Human Movement Studies*, 9(1): 157-170.
- Reilly, T., & Piercy, M. (1994).** The effect of partial sleep deprivation on weight-lifting performance. *Ergonomics*, 37(1): 107-115.
- Reyner, L. A., & Horne, J. A. (2013).** Sleep restriction and serving accuracy in performance tennis players, and effects of caffeine. *Physiology & Behavior*, 120: 93-96.
- Richmond, L. K., Dawson, B., Stewart, G., Cormack, S., Hillman, D. R., & Eastwood, P. R. (2007).** The effect of interstate travel on the sleep patterns and performance of elite Australian Rules footballers. *J Sci Med Sport*, 10(4): 252-258.
- Roberts, L. A., Nosaka, K., Coombes, J. S., & Peake, J. M. (2014).** Cold water immersion enhances recovery of submaximal muscle function after resistance exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 307(8): R998-R1008.
- Roberts, L. A., Raastad, T., Markworth, J. F., Figueiredo, V. C., Egner, I. M., et al. (2015).** Post-exercise cold water immersion attenuates acute anabolic signalling and long-term adaptations in muscle to strength training. *J Physiol*, 593(18): 4285-4301.
- Roberts, R. E., Roberts, C. R., & Duong, H. T. (2009).** Sleepless in adolescence: prospective data on sleep deprivation, health and functioning. *Journal of adolescence*, 32(5): 1045-1057.
- Roberts, S. S. H., Teo, W. P., Aisbett, B., & Warmington, S. A. (2019a).** Extended Sleep Maintains Endurance Performance Better than Normal or Restricted Sleep. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 51(12): 2516-2523.
- Roberts, S. S. H., Teo, W. P., & Warmington, S. A. (2019b).** Effects of training and competition on the sleep of elite athletes: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med*, 53(8): 513-522.
- Robey, E., Dawson, B., Halson, S., Gregson, W., Goodman, C., & Eastwood, P. (2014).** Sleep quantity and quality in elite youth soccer players: a pilot study. *Eur J Sport Sci*, 14(5): 410-417.
- Robey, E., Dawson, B., Halson, S., Gregson, W., King, S., et al. (2013).** Effect of evening postexercise cold water immersion on subsequent sleep. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 45(7): 1394-1402.
- Romanovsky, A. A. (2018).** The thermoregulation system and how it works. *Handb Clin Neurol*, 156: 3-43.
- Rosenberg, R. S., & Van Hout, S. (2013).** The American Academy of Sleep Medicine inter-scorer reliability program: sleep stage scoring. *Journal of clinical sleep medicine : JCSM : official publication of the American Academy of Sleep Medicine*, 9(1): 81-87.
- Sadeh, A. (2011).** The role and validity of actigraphy in sleep medicine: an update. *Sleep medicine reviews*, 15(4): 259-267.
- Saidi, O., Dore, E., Maso, F., Mack-Inocentio, D., Walrand, S., et al. (2019).** Acute effect of an intensified exercise program on subsequent sleep, dietary intake, and performance in junior rugby players. *Eur J Appl Physiol*, 119(9): 2075-2082.
- Samuels, C. (2008).** Sleep, recovery, and performance: the new frontier in high-performance athletics. *Neurol Clin*, 26(1): 169-180.
- Sargent, C., Halson, S., & Roach, G. D. (2014a).** Sleep or swim? Early-morning training severely restricts the amount of sleep obtained by elite swimmers. *Eur J Sport Sci*, 14 Suppl 1: S310-315.
- Sargent, C., Lastella, M., Halson, S. L., & Roach, G. D. (2014b).** The impact of training schedules on the sleep and fatigue of elite athletes. *Chronobiology International*, 31(10): 1160-1168.
- Sargent, C., Lastella, M., Halson, S. L., & Roach, G. D. (2016).** The validity of activity monitors for measuring sleep in elite athletes. *J Sci Med Sport*, 19(10): 848-853.
- Sargent, C., Schmidt, W. F., Aughey, R. J., Bourdon, P. C., Soria, R., et al. (2013).** The impact of altitude on the sleep of young elite soccer players (ISA3600). *Br J Sports Med*, 47 Suppl 1: i86-92.
- Sassin, J., Parker, D., Mace, J., Gotlin, R., Johnson, L., & Rossman, L. (1969).** Human growth hormone release: relation to slow-wave sleep and sleep-waking cycles. *Science*, 165(3892): 513-515.
- Saw, A. E., Main, L. C., & Gastin, P. B. (2016).** Monitoring the athlete training response: subjective self-reported measures trump commonly used objective measures: a systematic review. *Br J Sports Med*, 50(5): 281-291.
- Schaal, K., Le Meur, Y., Bieuzen, F., Petit, O., Hellard, P., et al. (2013).** Effect of recovery mode on postexercise vagal reactivation in elite synchronized swimmers. *Appl Physiol Nutr Metab*, 38(2): 126-133.

- Schaal, K., Le Meur, Y., Louis, J., Filliard, J. R., Hellard, P., *et al.* (2014). Whole-Body Cryostimulation Limits Overreaching in Elite Synchronized Swimmers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 47(7): 1416-1425.
- Schaal, K., Tafflet, M., Nassif, H., Thibault, V., Pichard, C., *et al.* (2011). Psychological balance in high level athletes: gender-based differences and sport-specific patterns. *PLoS ONE*, 6(5): e19007.
- Schmidt, M. H. (2014). The energy allocation function of sleep: a unifying theory of sleep, torpor, and continuous wakefulness. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 47: 122-153.
- Schwartz, J., & Simon, R. D., Jr. (2015). Sleep extension improves serving accuracy: A study with college varsity tennis players. *Physiology & Behavior*, 151: 541-544.
- Shapiro, C., & Flanigan, M. (1993). ABC of sleep disorders. Function of sleep. *British Medical Journal*, 306(6874): 383.
- Shapiro, C. M. (1982). Energy expenditure and restorative sleep. *Biol Psychol*, 15(3-4): 229-239.
- Shearer, D. A., Jones, R. M., Kilduff, L. P., & Cook, C. J. (2015). Effects of competition on the sleep patterns of elite rugby union players. *Eur J Sport Sci*, 15(8): 681-686.
- Silber, M. H., Ancoli-Israel, S., Bonnet, M. H., Chokroverty, S., Grigg-Damberger, M. M., *et al.* (2007). The visual scoring of sleep in adults. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 3(02): 22-22.
- Simpson, N. S., Scott-Sutherland, J., Gautam, S., Sethna, N., & Haack, M. (2018). Chronic exposure to insufficient sleep alters processes of pain habituation and sensitization. *Pain*, 159(1): 33-40.
- Sinnerton, S., & Reilly, T. (1992). Effects of sleep loss and time of day in swimmers. *Biomechanics and medicine in swimming: swimming science VI*: 399-404.
- Skein, M., Duffield, R., Edge, J., Short, M. J., & Mundel, T. (2011). Intermittent-sprint performance and muscle glycogen after 30 h of sleep deprivation. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(7): 1301-1311.
- Skein, M., Duffield, R., Minett, G. M., Snape, A., & Murphy, A. (2013). The effect of overnight sleep deprivation after competitive rugby league matches on postmatch physiological and perceptual recovery. *Int J Sports Physiol Perform*, 8(5): 556-564.
- Skorski, S., Mujika, I., Bosquet, L., Meeusen, R., Coutts, A. J., & Meyer, T. (2019). The Temporal Relationship Between Exercise, Recovery Processes, and Changes in Performance. *Int J Sports Physiol Perform*, 14(8): 1015-1021.
- Smith, C., & MacNeill, C. (1994). Impaired motor memory for a pursuit rotor task following Stage 2 sleep loss in college students. *Journal of sleep research*, 3(4): 206-213.
- Smith, M. R., Coutts, A. J., Merlini, M., Deprez, D., Lenoir, M., & Marcora, S. M. (2015a). Mental Fatigue Impairs Soccer-Specific Physical and Technical Performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(2): 267-276.
- Smith, M. R., Marcora, S. M., & Coutts, A. J. (2015b). Mental Fatigue Impairs Intermittent Running Performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 47(8): 1682-1690.
- Song, M. K., Ha, J. H., Ryu, S. H., Yu, J., & Park, D. H. (2012). The effect of aging and severity of sleep apnea on heart rate variability indices in obstructive sleep apnea syndrome. *Psychiatry investigation*, 9(1): 65-72.
- Souissi, N., Chtourou, H., Aloui, A., Hammouda, O., Dogui, M., *et al.* (2013). Effects of time-of-day and partial sleep deprivation on short-term maximal performances of judo competitors. *J Strength Cond Res*, 27(9): 2473-2480.
- Souissi, N., Sesboue, B., Gauthier, A., Larue, J., & Davenne, D. (2003). Effects of one night's sleep deprivation on anaerobic performance the following day. *Eur J Appl Physiol*, 89(3-4): 359-366.
- Souissi, N., Souissi, M., Souissi, H., Chamari, K., Tabka, Z., *et al.* (2008). Effect of Time of Day and Partial Sleep Deprivation on Short- Term, High- Power Output. *Chronobiology International*, 25(6): 1062-1076.
- Stutz, J., Eiholzer, R., & Spengler, C. M. (2018). Effects of Evening Exercise on Sleep in Healthy Participants: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med*, 49(2): 269-287.
- Suppiah, H. T., Low, C. Y., & Chia, M. (2015). Effects of sports training on sleep characteristics of Asian adolescent athletes. *Biological Rhythm Research*, 46(4): 523-536.
- Suppiah, H. T., Low, C. Y., & Chia, M. (2016). Effects of Sport-Specific Training Intensity on Sleep Patterns and Psychomotor Performance in Adolescent Athletes. *Pediatr Exerc Sci*, 28(4): 588-595.
- Surda, P., Putala, M., Siarnik, P., Walker, A., De Rome, K., *et al.* (2019). Sleep in elite swimmers: prevalence of sleepiness, obstructive sleep apnoea and poor sleep quality. *BMJ Open Sport Exerc Med*, 5(1): e000673.
- Swann, C., Moran, A., & Piggott, D. (2015). Defining elite athletes: Issues in the study of expert performance in sport psychology. *Psychology of Sport and Exercise*, 16: 3-14.
- Swinbourne, R., Gill, N., Vaile, J., & Smart, D. (2016). Prevalence of poor sleep quality, sleepiness and obstructive sleep apnoea risk factors in athletes. *Eur J Sport Sci*, 16(7): 850-858.
- Symons, J. D., VanHelder, T., & Myles, W. S. (1988). Physical performance and physiological responses following 60 hours of sleep deprivation. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 20(4): 374-380.
- Szymusiak, R. (2018). Body temperature and sleep. *Handb Clin Neurol*, 156: 341-351.
- Taheri, M., & Arabameri, E. (2012). The effect of sleep deprivation on choice reaction time and anaerobic power of college student athletes. *Asian J Sports Med*, 3(1): 15.

- Takahashi, Y., Kipnis, D., & Daughaday, W. (1968).** Growth hormone secretion during sleep. *The Journal of clinical investigation*, 47(9): 2079-2090.
- Takarada, Y. (2003).** Evaluation of muscle damage after a rugby match with special reference to tackle plays. *Br J Sports Med*, 37(5): 416-419.
- Takeuchi, L., Davis, G. M., Plyley, M., Goode, R., & Shephard, R. J. (1985).** Sleep deprivation, chronic exercise and muscular performance. *Ergonomics*, 28(3): 591-601.
- Tamaki, M., Bang, J. W., Watanabe, T., & Sasaki, Y. (2014).** The first-night effect suppresses the strength of slow-wave activity originating in the visual areas during sleep. *Vision Res*, 99: 154-161.
- Tan, C. L., & Knight, Z. A. (2018).** Regulation of Body Temperature by the Nervous System. *Neuron*, 98(1): 31-48.
- Task Force. (1996).** Heart rate variability: standards of measurements, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. *Circulation*, 93(5): 1043-1065.
- Tavares, F., Beaven, M., Teles, J., Baker, D., Healey, P., et al. (2019).** Effects of Chronic Cold-Water Immersion in Elite Rugby Players. *Int J Sports Physiol Perform*, 14(2): 156-162.
- Tavares, F., Smith, T., & Driller, M. (2017).** Fatigue and recovery in rugby: a review. *Sports Med*, 47(8): 1515-1530.
- Taylor, L., Chrismas, B. C., Dascombe, B., Chamari, K., & Fowler, P. M. (2016).** The Importance of Monitoring Sleep within Adolescent Athletes: Athletic, Academic, and Health Considerations. *Frontiers in physiology*, 7: 101.
- 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 & Science in Sports & Exercise*, 29(5): 688-693.
- Temesi, J., Arnal, P. J., Davranche, K., Bonnefoy, R., Levy, P., et al. (2013).** Does central fatigue explain reduced cycling after complete sleep deprivation? *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 45(12): 2243-2253.
- Teng, E., Lastella, M., Roach, G., & Sargent, C. (2011).** The effect of training load on sleep quality and sleep perception in elite male cyclists. *Little Clock, Big Clock: Molecular to Physiological Clocks*, eds G. Kennedy and C. Sargent. (Melbourne: Australasian Chronobiology Society, Victoria University): 5-10.
- Terry, P. C., Lane, A. M., & Fogarty, G. J. (2003).** Construct validity of the Profile of Mood States — Adolescents for use with adults. *Psychology of Sport and Exercise*, 4(2): 125-139.
- Thayer, J. F., & Sternberg, E. (2006).** Beyond heart rate variability: vagal regulation of allostatic systems. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1088(1): 361-372.
- Thomas, C., Jones, H., Whitworth-Turner, C., & Louis, J. (2020).** High-intensity exercise in the evening does not disrupt sleep in endurance runners. *Eur J Appl Physiol*, 120(2): 359-368.
- Thompson, D., Nicholas, C. W., & Williams, C. (1999).** Muscular soreness following prolonged intermittent high-intensity shuttle running. *J Sports Sci*, 17(5): 387-395.
- Thornton, H. R., Delaney, J. A., Duthie, G. M., & Dascombe, B. J. (2018).** Effects of preseason training on the sleep characteristics of professional rugby league players. *Int J Sports Physiol Perform*, 13(2): 176-182.
- Thornton, H. R., Duthie, G. M., Pitchford, N. W., Delaney, J. A., Benton, D. T., & Dascombe, B. J. (2017).** Effects of a 2-week high-intensity training camp on sleep activity of professional rugby league athletes. *Int J Sports Physiol Perform*, 12(7): 928-933.
- Togo, F., Aizawa, S., Arai, J.-i., Yoshikawa, S., Ishiwata, T., et al. (2007).** Influence on human sleep patterns of lowering and delaying the minimum core body temperature by slow changes in the thermal environment. *Sleep*, 30(6): 797-802.
- Troynikov, O., Watson, C. G., & Nawaz, N. (2018).** Sleep environments and sleep physiology: A review. *J Therm Biol*, 78: 192-203.
- Tuomilehto, H., Vuorinen, V. P., Penttila, E., Kivimaki, M., Vuorenmaa, M., et al. (2016).** Sleep of professional athletes: Underexploited potential to improve health and performance. *J Sports Sci*, 35(7): 704-710.
- Uchida, S., Shioda, K., Morita, Y., Kubota, C., Ganeko, M., & Takeda, N. (2012).** Exercise effects on sleep physiology. *Frontiers in neurology*, 3: 48.
- Van Erp, T., Foster, C., & De Koning, J. J. (2019).** Relationship between various training-load measures in elite cyclists during training, road races, and time trials. *Int J Sports Physiol Perform*, 14(4): 493-500.
- Van Ryswyk, E., Weeks, R., Bandick, L., O'Keefe, M., Vakulin, A., et al. (2017).** A novel sleep optimisation programme to improve athletes' well-being and performance. *Eur J Sport Sci*, 17(2): 144-151.
- Van Someren, E. J. (2006).** Mechanisms and functions of coupling between sleep and temperature rhythms. *Prog Brain Res*, 153: 309-324.
- VanSomeren, E. J. (2000).** More than a marker: interaction between the circadian regulation of temperature and sleep, age-related changes, and treatment possibilities. *Chronobiology International*, 17(3): 313-354.

- Venter, R. E. (2014). Perceptions of team athletes on the importance of recovery modalities. *Eur J Sport Sci*, 14(Suppl 1): S69-76.
- Versace, F., Mozzato, M., De Min Tona, G., Cavallero, C., & Stegagno, L. (2003). Heart rate variability during sleep as a function of the sleep cycle. *Biol Psychol*, 63(2): 149-162.
- Viola, A. U., Brandenberger, G., Buchheit, M., Geny, B., Ehrhart, J., *et al.* (2004). Sleep as a tool for evaluating autonomic drive to the heart in cardiac transplant patients. *Sleep*, 27(4): 641-647.
- Vitale, J. A., Banfi, G., Galbiati, A., Ferini-Strambi, L., & La Torre, A. (2019a). Effect of a Night Game on Actigraphy-Based Sleep Quality and Perceived Recovery in Top-Level Volleyball Athletes. *Int J Sports Physiol Perform*, 14(2): 265-269.
- Vitale, J. A., Bonato, M., Galasso, L., La Torre, A., Merati, G., *et al.* (2017). Sleep quality and high intensity interval training at two different times of day: A crossover study on the influence of the chronotype in male collegiate soccer players. *Chronobiology International*, 34(2): 260-268.
- Vitale, J. A., Roveda, E., Montaruli, A., Galasso, L., Weydahl, A., *et al.* (2015). Chronotype influences activity circadian rhythm and sleep: differences in sleep quality between weekdays and weekend. *Chronobiology International*, 32(3): 405-415.
- Vitale, K. C., Owens, R., Hopkins, S. R., & Malhotra, A. (2019b). Sleep Hygiene for Optimizing Recovery in Athletes: Review and Recommendations. *Int J Sports Med*, 40(8): 535-543.
- Von Rosen, P., Frohm, A., Kottorp, A., Friden, C., & Heijne, A. (2016). Too little sleep and an unhealthy diet could increase the risk of sustaining a new injury in adolescent elite athletes. *Scand J Med Sci Sports*, 27(11): 1364-1371.
- Warren, G. L., Lowe, D. A., & Armstrong, R. B. (1999). Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury. *Sports Med*, 27(1): 43-59.
- Watson, A., Brickson, S., Brooks, A., & Dunn, W. (2017). Subjective well-being and training load predict in-season injury and illness risk in female youth soccer players. *Br J Sports Med*, 51(3): 194-199.
- Wehr, T., Aeschbach, D., & Duncan Jr, W. (2001). Evidence for a biological dawn and dusk in the human circadian timing system. *J Physiol*, 535(3): 937-951.
- Westerlund, T., Oksa, J., Smolander, J., & Mikkelsen, M. (2003). Thermal responses during and after whole-body cryotherapy (-110°C). *J Therm Biol*, 28(8): 601-608.
- Westerlund, T., Uusitalo, A., Smolander, J., & Mikkelsen, M. (2006). Heart rate variability in women exposed to very cold air (-110°C) during whole-body cryotherapy. *Journal of Thermal Biology*, 31(4): 342-346.
- Whitworth-Turner, C., Di Michele, R., Muir, I., Gregson, W., & Drust, B. (2018). A comparison of sleep patterns in youth soccer players and non-athletes. *Science and Medicine in Football*, 2(1): 3-8.
- Wong, S. N., Halaki, M., & Chow, C.-M. (2013). The effects of moderate to vigorous aerobic exercise on the sleep need of sedentary young adults. *J Sports Sci*, 31(4): 381-386.
- Wozniak, A., Wozniak, B., Drewa, G., Mila-Kierzenkowska, C., & Rakowski, A. (2007). The effect of whole-body cryostimulation on lysosomal enzyme activity in kayakers during training. *Eur J Appl Physiol*, 100(2): 137-142.
- Xie, L., Kang, H., Xu, Q., Chen, M. J., Liao, Y., *et al.* (2013). Sleep drives metabolite clearance from the adult brain. *Science*, 342(6156): 373-377.
- Yamauchi, T. (1989). Whole-body cryotherapy is a method of extreme cold -175 °C treatment initially used for rheumatoid arthritis. *Z Phys Med Baln Med Klin*, 15: 311.
- Youngstedt, S. D., O'connor, P. J., & Dishman, R. K. (1997). The effects of acute exercise on sleep: a quantitative synthesis. *Sleep*, 20(3): 203-214.
- Zalewski, P., Bitner, A., Słomko, J., Szrajda, J., Klawe, J. J., *et al.* (2014). Whole-body cryostimulation increases parasympathetic outflow and decreases core body temperature. *Journal of Thermal Biology*, 45: 75-80.
- Zalewski, P., Klawe, J. J., Pawlak, J., Tafil-Klawe, M., & Newton, J. (2013). Thermal and hemodynamic response to whole-body cryostimulation in healthy subjects. *Cryobiology*, 66(3): 295-302.
- Zhang, Y., & Zhao, R. (2008). Overall thermal sensation, acceptability and comfort. *Building and Environment*, 43(1): 44-50.

Titre : Le sommeil du sportif de haut niveau : du stress de l'exercice à l'optimisation des stratégies de récupération

Mots clés : fatigue, polysomnographie, actimétrie, performance, architecture de sommeil, thermorégulation

Résumé : Le sommeil est considéré comme l'une des stratégies de récupération les plus importantes pour le sportif de haut niveau. Plusieurs fonctions physiologiques impliquées dans la récupération post-exercice sont perturbées à la suite d'une restriction et/ou privation de sommeil. L'objectif de la première partie de ce travail de thèse était de décrire le sommeil des sportifs, et de comprendre l'influence de certains facteurs de stress spécifiques au sport de haut niveau sur le sommeil.

Dans la première étude, nous avons observé que les jeunes sportifs impliqués dans un double projet, i.e. académique et sportif, dormaient en moyenne environ 7 heures par nuit lors d'une période d'entraînement. Cette quantité de sommeil est bien en dessous des 9-10 heures recommandées par la *National Sleep Foundation* pour leur catégorie d'âge (12-21 ans). Les questionnaires subjectifs ont également révélé une mauvaise qualité de sommeil perçue pour un grand nombre de sportifs. De plus, cette étude a rapporté un sommeil, évalué par actimétrie, particulièrement perturbé pour les nageurs comparativement aux sportifs issus des autres disciplines. Parallèlement, ce groupe de nageurs présentait une charge d'entraînement interne et des niveaux de douleurs musculaires et de fatigue générale perçus plus élevés que ceux des autres disciplines. Indépendamment de la discipline, l'augmentation de la charge interne était accompagnée d'une avance de phase, une réduction du temps total de sommeil et de sa qualité perçue, et une augmentation de la fragmentation de sommeil. Ces résultats confirment donc un lien entre l'augmentation de la charge de l'entraînement et la dégradation du sommeil du sportif de haut niveau.

La deuxième étude de cette thèse a montré que l'architecture du sommeil était négativement impactée suite à la réalisation d'un exercice à haute intensité en soirée pour des coureurs à pied bien entraînés.

Ces perturbations étaient plus marquées en début de nuit (180 premières minutes) à travers une diminution de la proportion de sommeil paradoxal et une augmentation de la proportion de sommeil lent léger et des éveils intrasommeil. La première partie de la nuit était également marquée par une température centrale et une fréquence cardiaque plus élevées en comparaison à une condition de repos, sans exercice. Ces résultats suggèrent que la réalisation d'un exercice intense tardivement (i.e. 21h00) impacterait négativement l'architecture du sommeil, et que la thermorégulation et la régulation autonome seraient impliquées dans cette perturbation.

L'objectif de la deuxième partie de cette thèse était ensuite d'évaluer l'efficacité de deux stratégies visant à améliorer la qualité du sommeil en s'appuyant sur la relation entre le sommeil, la thermorégulation et la régulation autonome. Les interventions proposées dans la troisième étude avaient donc comme but d'optimiser les échanges thermiques au cours de la nuit et/ou d'activer plus rapidement le système nerveux parasympathique afin d'améliorer la qualité de sommeil à l'issue d'un match de rugby. La cryothérapie corps entier - stratégie d'exposition thermique aiguë avant le coucher - et une literie à haute conductivité thermique - stratégie d'optimisation des échanges thermiques continue au cours de la nuit - ont été évaluées. Les résultats de cette étude ont montré une réduction de la durée des éveils intrasommeil et une augmentation de la proportion de sommeil paradoxal avec la literie comparativement à la condition contrôle, i.e. sans intervention après le match. Il serait donc opportun de mener de futurs travaux évaluant l'effet chronique de cette stratégie sur le sommeil et la récupération pendant une phase de préparation.

Title: Sleep of high-level athletes: from exercise-induced stress to recovery strategies optimization

Keywords: fatigue, polysomnography, actigraphy, performance, sleep architecture, thermoregulation

Abstract: Sleep is considered as one of the most important recovery strategy for high-level athletes. A number of important physiological functions that are relevant to the recovery process are disturbed when sleep deprived/restricted. The main objective of the first part of this project was to provide a better comprehension of the influence of sport-specific stressors on sleep among high-level athletes.

The first descriptive study showed a total sleep time of around 7 hours in average for adolescent athletes during a classical in-season training context, which is far below the 9-10 hours recommended by the *National Sleep Foundation* for their age category (12-21 years). Subjective questionnaires also showed low sleep quality scores for most of the athletes. Moreover, swimmers involved in this study showed increased sleep fragmentation compared with participants involved in other sports. At the same time, swimmers exhibited higher perceived training loads and reported increased perceived muscle soreness and general fatigue compared with participants involved in other sports. Independently of any sport-specific effects, higher daily training loads induced earlier sleep time median, reduced total sleep time and perceived sleep quality, and increased sleep fragmentation. These results confirmed the potential link between higher training loads and impaired sleep.

The second study showed a negative effect of night-time, high-intensity exercise on sleep architecture among well-trained runners. The first part of the night (first 180 min) was mostly affected, as rapid eye movement proportion decreased and light sleep proportion and wake after sleep onset increased. In the first part of the night, higher core body temperature and heart rate were observed in the exercise condition compared with the rest condition, which suggests a potential implication of these physiological mechanisms to explain sleep impairment.

The aim of the second part of the project was to assess the effectiveness of two recovery strategies based on the thermoregulation, autonomic regulation and sleep rationale. The two interventions used in the third study aimed to optimize thermal exchange during the night and/or activate the parasympathetic nervous system in order to enhance sleep quality after a rugby match. We investigated the effect of whole body cryotherapy (WBC) – an acute cooling intervention straight before the night – and a high heat capacity mattress (MAT) – a cooling strategy throughout the night – on sleep architecture. Main results of this study showed lower wake after sleep onset and higher rapid eye movement sleep proportion for MAT compared with a control condition. Future studies should be conducted to evaluate the chronic effect of these strategies during an overload period.