



HAL
open science

Sommeil du cycliste de haut niveau et stratégies de gestion du décalage horaire pour optimiser la performance

Lucas Garbellotto

► **To cite this version:**

Lucas Garbellotto. Sommeil du cycliste de haut niveau et stratégies de gestion du décalage horaire pour optimiser la performance. Santé. Université Bourgogne Franche-Comté, 2022. Français. NNT : 2022UBFCE018 . tel-04207028

HAL Id: tel-04207028

<https://theses.hal.science/tel-04207028>

Submitted on 14 Sep 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE

École doctorale « Environnements-Santé »

EA3920 – Marqueurs pronostiques et facteurs de régulation des pathologies cardiaques et vasculaires
Fédération Française de Cyclisme

THESE

En vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ

Discipline « Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives »

SOMMEIL DU CYCLISTE DE HAUT NIVEAU ET STRATÉGIES DE GESTION DU DÉCALAGE HORAIRE POUR OPTIMISER LA PERFORMANCE

Présentée et soutenue publiquement par

Lucas GARBELLOTO

Le 18 novembre 2022

Composition du Jury :

Rapporteurs :

Pascale DUCHÉ PU, Université de Toulon
Antoine GAUTHIER PU, Université de Caen Normandie

Examineurs :

Guillaume MILLET PU, Université de Saint-Étienne
Xavier BIGARD PU-PH, Directeur Médical Union Cycliste Internationale

Membres invités :

Emmanuel BRUNET Responsable Recherche & Performance, Fédération Française de Cyclisme
Hubert BOURDIN Praticien Hospitalier, CHU Besançon

Directeur de thèse :

Fabienne MOUGIN MCU-HDR, Université de Bourgogne Franche-Comté

Codirecteur de thèse :

Elisabeth PETIT PRAG, Dr en STAPS, Université de Bourgogne Franche-Comté

RÉSUMÉ

Titre : Sommeil du cycliste de haut niveau et stratégies de gestion du décalage horaire pour optimiser la performance

De nombreuses études établissent un lien entre le sommeil et les performances sportives de haut niveau. Un bon sommeil réduit le risque de surentraînement, de blessures, stimule le système immunitaire, consolide les apprentissages techniques, augmente la concentration et surtout favorise la récupération physique et mentale du sportif. Pourtant, compte tenu des exigences d'entraînement auxquels les athlètes sont confrontés, leur besoin de sommeil n'est pas toujours respecté. La littérature rapporte en effet que les athlètes de haut niveau sont sujets à des troubles du sommeil. Toutefois, à notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée au sommeil des cyclistes, de surcroît, professionnels. L'objectif de la première étude a donc été d'évaluer, objectivement et subjectivement, le sommeil de 13 cyclistes professionnels, spécialistes du VTT cross-country olympique (XCO). Les résultats ont montré que ces athlètes, majoritairement « du matin », dormaient en moyenne 8 h par nuit, avaient une bonne qualité de sommeil, sans aucun trouble du sommeil. Ces résultats sont très probablement liés à leurs caractéristiques et pratique sportive. Leur discipline sportive aérobie, individuelle, pratiquée souvent à l'extérieur, donc à la lumière naturelle, expliquent en grande partie les résultats différents de ceux retrouvés dans plusieurs études.

Le sommeil des sportifs de haut niveau peut être perturbé par de nombreux facteurs parmi lesquels les vols long-courriers avec franchissement de plusieurs fuseaux horaires. Le « Jet Lag » provoque des symptômes de désynchronisation et notamment des troubles du sommeil. Si de nombreuses études ont expérimenté des stratégies de préparation au décalage horaire en laboratoire, aucune ne s'est intéressée à évaluer de telles stratégies en condition écologique, de surcroît chez des sportifs professionnels, en vue d'une compétition internationale. La seconde étude s'est donc intéressée à évaluer, chez des cyclistes spécialistes du XCO, les effets, sur le sommeil, le rythme de la température interne (TI), les aptitudes physiques et cognitives, d'une stratégie d'avance de phase progressive, de l'horaire du sommeil (30 min par jour durant 6 jours), à domicile, couplée à une prise vespérale de mélatonine (0,5 mg, 2 h avant l'heure du coucher) et à de la luminothérapie au réveil (20 min à 1500 lux), avant un vol transméri dien vers l'Est (France-Japon, comportant 7 fuseaux horaires), suivie d'une stratégie de resynchronisation active à destination. En post-vol, la posologie de la mélatonine a été augmentée à 2 mg et la luminothérapie a été conservée. Les résultats ont montré que l'architecture et la quantité de sommeil n'ont pas été modifiées durant l'avance de phase et à destination tandis que la batyphase de la TI était déjà avancée de 2 h 30 au moment du vol et s'est rapidement resynchronisée à destination. Les performances physiques et cognitives ont été maintenues.

Ce protocole a été comparé à une seconde stratégie de gestion du décalage horaire et a fait l'objet de la 3^{ème} étude. Cette stratégie a été conduite chez des cyclistes professionnels spécialistes de la route, pour lesquels une prise de 2 mg de mélatonine combinée à de la luminothérapie a été proposée uniquement à destination, durant 5 jours. Les résultats ont montré qu'à destination, la batyphase de TI des vététistes était resynchronisée après 5 jours alors que celle des routiers avait encore un retard de plus 80 minutes. Cette resynchronisation, plus lente, s'est accompagnée d'un sommeil plus fragmenté et de moins bonne qualité.

Ces travaux mettent en évidence l'intérêt, chez le cycliste professionnel, d'une stratégie d'avance du rythme veille-sommeil à domicile avant vol vers l'Est, afin de minimiser les effets délétères du décalage en réduisant le délai de resynchronisation des rythmes biologiques à destination, en retrouvant un sommeil de qualité sur place et en maintenant les performances physiques et cognitives.

Mots clés : Cyclisme, Décalage horaire, Sommeil, Rythmes circadiens, Température interne, Luminothérapie, Mélatonine

ABSTRACT

Title: Sleep in high-level cyclists and strategies for managing jet lag to optimize performance.

Numerous studies established a link between sleep quantity/quality and high-level sport performances. Good sleep reduces risk of overtraining, injuries, stimulates immune system, consolidates technical skills, increases attention and especially promotes physical and mental recovery. However, literature reported that many athletes suffer from poor sleep quality and quantity and this insufficient sleep may be due to training scheduling constraints and relative priority accorded to sleep demands, compared to training constraints. Nevertheless, to the best of our knowledge, there haven't been any studies on professional cyclists in individual sports yet. Thus, the aim of the first study was to present observational data regarding objective and subjective sleep variables in ecological setting, in 13 professional cross-country Olympic (XCO) mountain bikers (MTB). The results showed that these athletes, for most of all "morning chronotype", sleep on average 8 hours per night, have a normal distribution of sleep stages with a good sleep efficiency and considering themselves as good sleepers. These results are probably related to their aerobic and individual sport, practiced outside, in natural light, and explain the discrepancies with those found in several studies. Sleep in high-level athletes can also be disrupted by many factors, including rapid airline travel across several times zones, which induces jet lag. The latter causes sleep disorders and can negatively affect performance of athletes. Although many studies were performed in laboratory conditions to evaluate a phase advance and to anticipate a transmeridian travel, very limited field studies have investigated such strategies, especially in professional cyclists, preceding real international travel to the East. The purpose of the second study was to assess, in elite MTB XCO athletes, the effects on sleep, physical and cognitive performances, of a gradual phase advance of sleep at home (30-min/day for 6 days), before a long-haul flight (7 h eastward; France to Japan) with evening melatonin (0.5 mg, 2 h before bedtime), morning bright light upon waking (20 min at 1500 Lux), and at destination, an active strategy of synchronization also with evening melatonin (2 mg) and morning bright light (20 min at 1500 Lux). Results showed that sleep structure and sleep duration have not been modified during strategy. Batyphase of CBT was advanced by 2 h 30 after 6 days and was quickly resynchronized at destination. Physical and cognitive performances were maintained compared to those measured at home.

This modality was compared to a second strategy during which professional road cyclists were exposed to 2 mg of melatonin combined with light exposure only for 5 days at destination. After 5 days at destination, batyphase of CBT in mountain bikers was resynchronized while it was delayed by 80 minutes in road cyclists yet. This slower resynchronization was accompanied by a fragmented sleep and a lower quality of sleep. In this study, performance was not studied.

In conclusion, we showed that a gradual advance of sleep-wake schedules, by a phase adjustment with evening melatonin and bright light exposure upon waking, to prepare athletes before an eastward flight, is beneficial to minimize jet lag, reduce resynchronization delay of biological rhythms at destination, quickly recover sleep quality at destination and maintain physical and cognitive performances.

Keywords: Cycling, Jet lag, Sleep, Circadian rhythms, Core body temperature, Bright light, Melatonin

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué au bon déroulement de ce travail de thèse.

Aux Professeurs Pascale DUCHE et Antoine GAUTHIER. Merci de me faire l'honneur d'être rapporteur de cette thèse.

Aux Professeurs Xavier BIGARD et Guillaume MILLET. Merci d'avoir accepté d'examiner ces travaux et de prendre part à ce jury.

Au Docteur Hubert BOURDIN. Merci pour vos précieux conseils et d'avoir accepté d'examiner mes travaux.

À Emmanuel BRUNET, Manager Recherche & Performance au sein de la Fédération Française de Cyclisme. Merci d'avoir accepté de prendre part à ce jury mais aussi pour la confiance et l'autonomie que tu m'as accordées tout en étant toujours disponible. Tu m'as placé dans les meilleures dispositions possibles, tant pour la réussite de cette thèse, que pour les missions qui m'ont été confiées au sein de la fédération.

À mes directrices et co-directrice de thèse, les Docteurs Fabienne MOUGIN-GUILLAUME et Elisabeth PETIT-CHANTEAU. Merci pour votre investissement sans faille, votre rigueur scientifique, votre soutien et vos conseils que vous m'avez apportés tout au long de ces 4 années de thèse. Vous avez été les principales actrices de la réussite de cette thèse.

Aux membres du Comité de Suivi de Thèse, les Professeurs Nicolas TORDI et Damien DAVENNE. Merci pour votre bienveillance, votre investissement et votre éclairage qui m'ont permis de prendre du recul sur mon travail.

Au Professeur Siamak DAVANI, à toute l'équipe de l'EA3920 et en particulier Fiona ECARNOT. Merci de m'avoir accueilli au sein de votre Unité de Recherche et m'avoir donné l'occasion de communiquer et de publier mes travaux. Merci à Fiona ECARNOT pour son efficacité, sa réactivité dans les relectures des articles et pour son suivi des dossiers administratifs.

À l'ensemble des collègues de la Fédération Française de Cyclisme. Je remercie Christophe MANIN et Cédric CHAUMOND qui ont permis la réalisation de cette thèse en format CIFRE au sein de la Direction Technique Nationale.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des cadres avec qui j'ai pu collaborer, échanger et qui m'ont transmis leur expertise, Yvan CLOLUS, Bruno LECKI, Julien SASTRE, Julien THOLLET, Paul BROUSSE, Sandrine GUIRRONNET, Dr Jacky MAILLOT, Steven HENRY, Samuel MONNERAIS, Mathieu NADAL, Philippe CHANTEAU, Emilian BROE, Florian ROUSSEAU, etc.

Enfin, je souhaite remercier, mes collègues doctorants, Iris SACHET et Quentin ROUSSEAU, pour les échanges et les différentes missions que nous avons pu partager.

Merci au Professeur Gilles CAPELLIER, au Docteur Valérie GILLET et à toute l'équipe du Centre Médical Santé Sommeil (Ellipse). Merci Mr CAPELLIER de m'avoir accueilli au sein du Don Du Souffle. Merci Valérie de m'avoir reçu avec grand enthousiasme. Je te remercie aussi pour ta disponibilité, le partage de tes connaissances et tout le soutien logistique que tu nous as apporté. Merci à Fanny CAPELLIER pour le temps que tu m'as consacré afin de me former à la pose et à l'analyse de la polysomnographie.

Au Docteur Silvio GALLI du laboratoire du sommeil du CHRU de Besançon. Merci pour m'avoir apporté votre expertise et vos conseils avisés dans ces travaux de recherche.

Aux enseignants de l'UFR STAPS, qui m'ont formé durant mon cursus universitaire et qui m'ont inculqué les connaissances indispensables à la réussite de cette thèse, les Professeurs Nicolas TORDI, Alain GROSLAMBERT ainsi que les Docteurs Laurent MOUROT, Fred GRAPPE, Gilles RAVIER, Sidney GROSPRETRE et Philippe GIMENEZ.

Au Docteur Johan CASSIRAME. Merci pour ton aide précieuse dans la rédaction de la dernière publication de cette thèse.

À mes collègues doctorants, Philémon, Théo, Jeanne, Pauline, Thibaud, Joris et Chloé. Merci pour tous les échanges scientifiques ou extrascientifiques, le partage, l'entraide et tous les bons moments passés en votre compagnie.

À tous les athlètes qui ont participé aux différentes études. J'ai beaucoup appris par nos échanges et leur partage d'expérience. Un grand merci pour leur investissement et toute la confiance qu'ils m'ont accordée.

À l'ensemble des cyclistes avec qui j'ai pu collaborer depuis le début de mon cursus universitaire, merci de m'avoir accordé votre confiance. Je ressors grandi de chacune de ces collaborations. J'ai une attention toute particulière pour Clément, merci de m'avoir accordé ta confiance en tant qu'entraîneur et surtout pour les nombreux tests, expérimentations, protocoles et analyses que nous avons réalisés ensemble sur ces 9 dernières années.

À mes amis, merci pour votre soutien et la motivation que vous m'avez apportés dans les bons moments, mais surtout dans les périodes plus difficiles. À ma meilleure amie, Jessie, toujours présente durant toutes ces années. À Anthony, Julien, Romain et Arnaud, vous m'avez ouvert la voie, vous représentez une grande source d'inspiration pour moi. À Paul, Salomé, Solène, Laura, merci de votre présence.

À ma famille. Merci infiniment à mes parents, de m'avoir soutenu, accompagné et inculqué les vraies valeurs de la vie. Vous m'avez toujours placé dans les meilleures dispositions pour réussir. Merci à ma sœur Maurane, de m'avoir toujours soutenu.

À Emmanuelle, mon épouse, merci d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir aidé et soutenu dans toutes mes décisions qui impactent notre vie de couple.

TABLES DES MATIÈRES

TABLES DES MATIÈRES	1
LISTE DES PUBLICATIONS	4
LISTE DES COMMUNICATIONS	5
TABLE DES ABRÉVIATIONS	7
TABLE DES TABLEAUX	9
TABLE DES FIGURES	10
PRÉAMBULE	12
INTRODUCTION	14
CONTEXTE SCIENTIFIQUE	17
LE SOMMEIL FACTEUR CLE DE LA RECUPERATION DU SPORTIF	18
1. Composition du sommeil nocturne	18
2. Rôle du sommeil nocturne	20
2.1 Restauration des dépenses énergétiques	20
2.2 Consolidation du système immunitaire.....	21
2.3 Apprentissage et mémoire	22
3. Régulation de la veille et du sommeil	23
4. Paramètres permettant l'étude des rythmes circadiens.....	29
4.1 Mélatonine.....	29
4.2 Température interne	31
LE SOMMEIL DU SPORTIF DE HAUT NIVEAU	33
1. Caractérisation du sommeil de l'athlète par des méthodes subjectives	33
2. Caractérisation du sommeil de l'athlète au moyen de méthodes objectives.....	35
3. Facteurs pouvant perturber le sommeil.....	40
ÉVALUATION DU SOMMEIL	45
1. La polysomnographie	45
2. L'actimétrie.....	50
3. L'agenda du sommeil.....	52
4. Les dispositifs grand public de suivi du sommeil.....	53
5. Évaluation du chronotype, de la somnolence et de la qualité subjective du sommeil. ..	55

5.1	Questionnaire de Horne et Östberg	55
5.2	Échelle de somnolence d'Epworth	55
5.3	Index de qualité du sommeil de Pittsburgh (PSQI).....	56
5.4	« Athlete sleep Screening Questionnaire »	56
6.	Nouveaux dispositifs.....	57
6.1	Dispositif Dreem	57
6.2	Dispositif Somno-Art.....	58
DECALAGE HORAIRE CHEZ LE SPORTIF DE HAUT NIVEAU		60
1.	Effets du voyage en avion.....	62
2.	Désynchronisation des rythmes circadiens	62
3.	Direction du vol et nombre de fuseaux horaires traversés.....	64
4.	Caractéristiques des voyageurs	65
5.	Vol transméri dien et sportif de haut niveau	66
5.1	Expérimentations en décalage horaire simulé	66
5.2	Expérimentations en décalage horaire réel.....	67
5.2.1.	Effets sur le rythme veille-sommeil	67
5.2.2.	Effets sur les performances physiques et cognitives.....	68
5.2.3.	Symptômes subjectifs du décalage horaire	71
6.	Gestion de la fatigue et du décalage horaire chez les athlètes de haut niveau	71
6.1	Réponse à la lumière	72
6.2	Réponse à l'administration exogène de mélatonine.....	72
6.3	Réponse à l'activité physique	73
6.4	Interventions avant un vol transméri dien	74
6.5	Interventions après un vol transméri dien	75
CONTRIBUTIONS PERSONNELLES.....		78
PUBLICATION N°1		81
1.	Rationnel.....	82
2.	Matériels et méthodes	83
2.1	Évaluation du chronotype.....	83
2.2	Évaluation du sommeil	84
2.3	Évaluation de la somnolence	87
3.	Analyses statistiques	87
4.	Résultats	87
5.	Discussion	91
PUBLICATION N°2		102
1.	Rationnel.....	103

2. Matériels et méthodes	104
2.1 Design de l'étude	104
2.2 Paramètres recueillis	107
3. Analyses statistiques	112
4. Résultats	112
5. Discussion	116
PUBLICATION N°3	127
1. Rationnel.....	128
2. Matériels et méthodes	129
2.1 Design de l'étude	129
2.2 Paramètres recueillis	130
3. Analyses statistiques	131
4. Résultats	132
5. Discussion	136
DISCUSSION GENERALE.....	162
CONCLUSION	168
PERSPECTIVES.....	170
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	172
PUBLICATION ANNEXE	196
ANNEXES	212

LISTE DES PUBLICATIONS

Publications dans des revues à comité de lecture

1. **Garbellotto L**, Petit E, Brunet E, Gillet V, Bourdin H, Mougins F. *Complete sleep evaluation of top professional cross-country mountain bikers' athletes*. J. Sports Med. Phys. Fitness, 2022, Feb; 62(2):265-272
2. **Garbellotto L**, Petit E, Brunet E, Guirronnet S, Clolus Y, Gillet V, Bourdin H, Mougins F. *Gradual advance of sleep-wake schedule before an eastward flight and phase adjustment after flight in elite cross-country mountain bikers: effects on sleep and performance*. J. Strength Cond. Res. – Sous presse
3. **Garbellotto L**, Petit E, Brunet E, Gillet V, Bourdin H, Cassirame J, Mougins F. *Comparison of two strategies to minimize jet lag after an Eastward flight in Olympic cyclists: effects on sleep and core body temperature* – Soumis dans Res. Q. Exerc. Sport.
4. Petit E, Nakamura Y, **Garbellotto L**, Maeda S, Mougins F. *Measures to counteract the effects of jet lag on athletic performance*. J. Health Phys. Educ. Recr. 2018, 68, 11, 1-4 (Japanese language)

Publications dans des revues de vulgarisation

1. **Garbellotto L**, Brunet E, Sommeil et performance. La France Cycliste, Numéro 31, mars 2021 (joint en annexe 2)
2. Brunet E, **Garbellotto L**, Sachet I, Planifier l'entraînement et organiser les séances. La France Cycliste, Numéro 36, juillet 2022.

LISTE DES COMMUNICATIONS

Communications orales

- CO1. **Garbellotto L**, Petit E, Isacco L, Brunet E, Mougin F. *Gestion du décalage horaire*. Colloque médical de la Fédération Française de Cyclisme, 10 novembre 2018, Besançon, France.
- CO2. **Garbellotto L**, Mougin F. *Les outils connectés, alliés de la santé du grand public et leur influence sur le rythme veille/sommeil*. Révolution numérique du sport à la santé, 3 avril 2019, Besançon, France.
- CO3. **Garbellotto L**, Petit E, Isacco L, Brunet E, Gillet V, Mougin F. *Evaluation du sommeil des athlètes de haut-niveau en vue de la préparation des prochains Jeux Olympiques*. Séminaire Jeunes chercheurs, 13 - 14 juin 2019, Dijon, France.
- CO4. **Garbellotto L**, Petit E, Isacco L, Brunet E, Bourdin H, Mougin F. *Stratégies de gestion du décalage horaire à la Fédération Française de Cyclisme en vue des Jeux Olympiques de Tokyo*. Ateliers ReSCI, Ma recherche j'en parle. Sport et innovation, les sciences au service de la performance sportive, 1 juillet 2019, Paris, France.
- CO5. **Garbellotto L**, Petit E, Isacco L, Brunet E, Gillet V, Mougin F. *Evaluation du sommeil de cyclistes de très haut niveau*. Rencontre Sport Science & Aquatics Data, 6 septembre 2019, Paris, France.
- CO6. **Garbellotto L**, Petit E, Isacco L, Brunet E, Gillet V, Mougin F. *Évaluation du sommeil de cyclistes de très haut niveau*, Congrès International de l'Association des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives, 29-31 octobre 2019, Paris, France.

- CO7. **Garbellotto L**, Petit E, Isacco L, Brunet E, Bourdin H, Mougin F. *Sommeil, performance et décalage horaire*. Séminaire des entraîneurs et cadres techniques de la Fédération Française de Cyclisme. 8 - 9 novembre 2019, Dijon.
- CO8. **Garbellotto L**, Petit E, Isacco L, Brunet E, Bourdin H, Mougin F. *Impact of jet lag strategies on quantity of sleep in highly trained athletes*. L'UPFR des Sports à l'International, 21 novembre 2019, Besançon.
- CO9. **Garbellotto L**, Petit E, Isacco L, Brunet E, Bourdin H, Mougin F. *Sommeil et gestion du décalage horaire des Jeux Olympiques*. Ateliers ReSCI, « Ma recherche j'en parle ». Sport et innovation, Les Sciences au Service de la Performance Sportive, 2 décembre 2019, Besançon.

Communications affichées

- CA1. **Garbellotto L**, Petit E, Isacco L, Brunet E, Bourdin H, Mougin F. *Effets d'une stratégie de gestion du décalage horaire vers l'Est sur le sommeil et les performances de cyclistes de très haut niveau*. Séminaire : La Recherche au Service de la Performance, 21 mars 2019, Paris, France
- CA2. **Garbellotto L**, Petit E, Brunet E, Gillet V, Bourdin H, Mougin F. *Effects of an eastward flight with a synchronization strategy at destination, on sleep-wake and core body temperature rhythms in professional road cyclists*. Congrès International de l'Association des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives, 28 octobre 2021, Montpellier, France

TABLE DES ABRÉVIATIONS

- √ AASM, American Academy of Sleep Medicine
- √ ADAMS, Anti-Doping Administration et Management System
- √ AMA, Agence Mondiale Antidopage
- √ ANRT, Association Nationale de la Recherche et de la Technologie
- √ ASSQ, Athlete Sleep Screening Questionnaire
- √ ATP, adénosine triphosphate
- √ CIFRE, Convention Industrielle de Formation par la Recherche
- √ CMJ, countermovement jump
- √ DLMO, Dim Light Melatonin Onset
- √ DTN, Direction Technique Nationale
- √ ECG, électrocardiogramme
- √ EEG, électroencéphalogramme
- √ EMG, électromyogramme
- √ EOG, électro-oculogramme
- √ ES, efficacité de sommeil
- √ FC, fréquence cardiaque
- √ FFC, Fédération Française de Cyclisme
- √ GH, growth hormone
- √ IL-1 β , interleukines 1 β
- √ INSEP, Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance
- √ IRM, Imagerie par Résonance Magnétique
- √ JASP, Jeffrey's Amazing Statistics Program
- √ JO, Jeux Olympiques
- √ N-REM, sommeil Non-REM
- √ N1, sommeil de stade 1
- √ N2, sommeil de stade 2
- √ N3, sommeil de stade 3
- √ Nm, nanomètre
- √ NSC, noyaux supra-chiasmatiques

- √ PSG, polysomnographie
- √ R, somme de stade paradoxal
- √ REM, Rapid Eye Movement
- √ SpO2, saturation pulsée en oxygène
- √ TEE, temps d'éveil après endormissement
- √ TNF- α , tumor necrosis factor α
- √ TPL, temps passé au lit
- √ TTN1, temps total de sommeil en stade 1
- √ TTN2, temps total de sommeil en stade 2
- √ TTN3, temps total de sommeil en stade 3
- √ TTR, temps total de sommeil en stade paradoxal
- √ TTS, temps total de sommeil
- √ WASO, Wake After Sleep Onset
- √ XCO, cross-country format olympique

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse de différentes études évaluant de manière subjective le sommeil de l'athlète de haut niveau.	34
Tableau 2 : Synthèse de différentes études évaluant le sommeil de l'athlète de haut niveau par PSG.	37
Tableaux 3 A et 3 B : Synthèse de différentes études évaluant le sommeil de l'athlète de haut niveau par actimétrie.	38
Tableau 4 : Caractéristiques physiques, physiologiques et d'entraînements des athlètes.	89
Tableau 5 : Paramètres du sommeil obtenus à partir de l'actimétrie.	89
Tableau 6 : Paramètres du sommeil enregistrés par polysomnographie.	90
Tableau 7 : Qualité subjective du sommeil et score de somnolence évalués PSQI et ESS.	90
Tableau 8 : Paramètres du sommeil (enregistrés par PSG) lors de la période de référence (J1), durant l'avance de phase (J9) et sur la période de resynchronisation à destination (J11 et J13).	114
Tableau 9 : Paramètres du sommeil (mesuré par actimétrie) pendant la période de référence (J1 à J3), lors de l'avance de phase (J9), le voyage (J10) et la resynchronisation à destination (J11 à J13).	116
Tableau 10 : Caractéristiques physiques, paramètres du sommeil et température interne des deux groupes d'athlètes sur la période de référence.	134
Tableau 11 : Données du sommeil et de la température interne dans les deux stratégies, de J-5 à J5 pour G_{PAPA} et de J0 à J5 pour G_{PA} , comparées aux valeurs de la période de référence.	135

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Activité EEG, EOG, EMG et ECG au cours des différents stades de sommeil.....	19
Figure 2 : Processus ultradien avec l'alternance du sommeil NREM / REM d'après Borbély (2001).	20
Figure 3 : Modèle de consolidation systémique au cours du sommeil. Adapté de Born et al. (2006).	23
Figure 4 : Modèle de régulation de l'alternance veille-sommeil à deux processus, processus homéostatique S et processus circadien C. D'après Borbély et al. (2016).	24
Figure 5 : Boucle d'oscillation moléculaire de l'horloge moléculaire circadienne.....	25
Figure 6 : Structure du système de synchronisation des rythmes circadiens.....	26
Figure 7 : Méthodes de mesure du rythme circadien de la mélatonine. D'après Benloucif et al. (2008).....	30
Figure 8 : Caractéristiques d'un rythme. Emprunté à Cornelissen (2014).....	32
Figure 9 : Facteurs à l'origine de perturbations du sommeil chez les athlètes de haut niveau. D'après Walsh et al. (2020).	44
Figures 10 A et B : Images illustrant le positionnement des électrodes utilisées sur les dérivations recommandés (A) et alternatives (B) pour l'enregistrement de l'électroencéphalogramme (EEG) au cours d'une polysomnographie.	46
Figures 11 A et B : Dérivations recommandées (A) et dérivations alternatives (B) pour l'électro-oculogramme (EOG).	46
Figure 12 : Positionnement des électrodes sur le menton pour l'enregistrement de l'electromyogramme (EMG).....	47
Figure 13: Positionnement des électrodes sur le muscle tibial antérieur pour l'enregistrement des mouvements des jambes.....	48
Figure 14 : Sujet équipé d'un système PSG Morpheus (Micromed SAS, France).	50
Figure 15 : Exemple d'un agenda du sommeil (réseau Morphée).....	53
Figure 16 : Bandeau Dreem (Dreem SAS, Paris, France).....	58
Figure 17 : Brassard Somno-Art (PPRS, Colmar, France).....	59
Figure 18 : Modèle multifactoriel de la fatigue due au voyage et du décalage horaire. D'après Janse Van Rensburg et al., (2021).	61

Figures 19 A et B : Désynchronisation entre l'horloge biologique et le rythme veille-sommeil immédiatement après la traversée de 8 fuseaux horaires vers l'Ouest (A) et vers l'Est (B). ..	63
Figures 20 A et B : Resynchronisation de l'horloge biologique à l'heure locale après la traversée de 8 fuseaux horaires vers l'Ouest (A) et vers l'Est (B). D'après Roach et al. (2019).	64
Figure 21 : Courbe de phase-réponse (PRC en anglais : phase response curve) suite à une exposition à la lumière ou à l'administration de mélatonine. D'après par Burgess et al., (2009).	73
Figure 22 : Cyclistes de haut niveau ayant participé aux 3 études.	79
Figure 23 : Actigraph® WGT3X-BT et logiciel Actilife 6.	84
Figure 24 : Protocole expérimental pour un athlète se couchant à 22h et se levant à 7h....	106
Figure 25 : Système Metamax 3B-R2 avec la ceinture Polar H7.	109
Figure 26 : Gélule e-Celsius®, boîtier d'activation et moniteur e-Viewer.	111
Figure 27 : Temps de réaction et nombre d'erreurs enregistrés lors de la période de référence (J1 et J3), après l'avance de phase (J10) et à destination (J12 et J14) grâce au « psychomotor vigilance task ».	114
Figures 28 A et B : Protocole expérimental pour un athlète se couchant à 22 h et se levant à 7 h.	130
Figure 29 : Rythme veille-sommeil suivi par actimétrie (en bleu, représentant les heures du coucher et de lever et la durée totale de sommeil moyennées) et batyphase de la température interne enregistrée grâce à la capsule e-Celsius (représentée par les traits verticaux en jaune), durant la stratégie 1 effectuée par les cyclistes spécialistes du VTT XCO.	165
Figure 30 : résumé des 3 études réalisées au cours de ce travail de thèse.	167

PRÉAMBULE

Ce travail de thèse fut initié dans l'objectif de conduire un projet alliant recherche clinique et recherche de terrain, orienté sur des stratégies de préparation à des déplacements transméridiens chez des athlètes de très haut niveau. Ce projet intéressait la Fédération Française de Cyclisme (FFC), en collaboration étroite avec l'Unité de Recherche EA3920

« Marqueurs pronostiques et facteurs de régulation des pathologies cardiaques et vasculaires » de l'Université Bourgogne Franche-Comté, en partenariat avec le laboratoire d'Exploration du Sommeil et de la Vigilance du CHU de Besançon (Dr H. Bourdin), le Centre Médical Santé Sommeil « Ellipse » de Besançon (Dr V. Gillet), l'Unité de Recherche EA7370 « Sport Expertise et Performance » de l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance » (INSEP), ainsi qu'avec la plateforme « Exercice Performance Santé Innovation » (EPSI) de Besançon. Ce travail a débuté grâce à un financement du Ministère des Sports, *via* l'INSEP, suite à un appel à projet « Recherche et Développement appliqué au Sport de Haut Niveau » dont une des thématiques comprenait « l'athlète dans son environnement ». Ce financement nous a été octroyé pour 3 années consécutives (2018 à 2021). L'objectif du projet était d'apporter des connaissances scientifiques incluant la chronobiologie afin d'optimiser la performance et la récupération des athlètes, pressentis pour les Jeux Olympiques (JO) de Tokyo et de concevoir ainsi des stratégies optimales de préparation à un vol transméridien. Par ailleurs, en septembre 2018, et pour conduire ce travail dans des conditions optimales, une demande de Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) auprès de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) a été réalisée et a permis l'obtention d'un contrat de travail à durée déterminée (avril 2019 à septembre 2022), sur un poste de chargé de mission « Recherche & Performance » au sein de la cellule Recherche & Performance de la Direction Technique Nationale (DTN) de la Fédération Française de Cyclisme (FFC).

L'originalité de ce travail de thèse réside à la fois dans une approche scientifique et écologique dans l'environnement du cyclisme de haut niveau. Pour ce faire, il fut nécessaire de concilier une méthodologie rigoureuse de la recherche scientifique tout en prenant en compte les spécificités du milieu sportif.

Sur le plan international, une collaboration avec le Département de Médecine du Sport de l'Université de Tsukuba (Maeda Laboratory, Japon), qui s'intéresse aussi aux liens existants entre sommeil et performances des athlètes, a été établie et nous avons pu bénéficier d'une contribution logistique pour les expérimentations conduites à Izu (Japon) en vue des JO de Tokyo. Cette collaboration a aussi permis l'accueil d'une étudiante Japonaise, Mademoiselle Yuki Nakamura, au sein de notre Unité de Recherche. Au cours de son séjour, elle a contribué à la rédaction d'une revue systématique concernant les stratégies existantes pour contrer les effets du décalage horaire sur les performances sportives, publiée dans un journal Japonais « Science of Physical Education », à laquelle nous avons été associé. Cet article, publié en japonais, est présenté en langue anglaise (Publication annexe) pour faciliter sa lecture.

Toutefois, la pandémie du COVID-19 a eu un impact considérable sur les différentes études prévues durant cette thèse. En effet, des expérimentations, qui devaient avoir lieu lors de déplacements internationaux ont dû être suspendues en raison de l'annulation de nombreuses compétitions sportives. De ce fait, mais aussi dans le but d'étendre les compétences de la cellule Recherche & Performance de la FFC, nous avons été sollicité sur des projets annexes, mais toujours liés à la performance sportive en cyclisme. Ces demandes, mêlant des compétences scientifiques, que nous avons pu acquérir tout au long de notre parcours universitaire, étaient parfois à la marge de notre thématique de thèse. Elles incluaient l'analyse du sommeil d'athlètes à l'occasion de stages en altitude, la formation de cadres techniques sur la thématique du sommeil ainsi que la réalisation de tests d'évaluation de la performance ou d'aérodynamisme pour les cyclistes de la FFC. Ces missions ont fait l'objet de rapports et de réunions au sein de la FFC.

INTRODUCTION

Si de nombreux paramètres sont impliqués dans l'amélioration de la performance sportive (nouveaux matériels, nouveaux matériaux, outils connectés, affinement des connaissances sur l'entraînement, etc.) et dans les techniques de récupération des athlètes (cryothérapie, pressothérapie, massages, compression, bains froids, etc.), les entraîneurs et athlètes sont désormais convaincus que le sommeil influe considérablement sur la capacité à récupérer, s'entraîner, et *in fine* à se surpasser en compétition. Pourtant, durant leur carrière, les sportifs sont souvent confrontés à des situations influençant négativement la qualité et quantité de leur sommeil. En effet, le manque de sommeil, qu'il soit provoqué par des périodes d'entraînement intensives, un voyage, une soirée de match très tardif ou un décalage horaire, augmente les symptômes de fatigue [diminution du glycogène, dommages musculaires, douleurs (Nedelec et al. 2015)], le risque de blessures (Luke *et al.* 2011 ; Milewski *et al.* 2014) et de surentraînement (Hauswirth *et al.* 2014), altère le système immunitaire (Cohen *et al.* 2009), compromet la consolidation des apprentissages techniques (Varga *et al.* 2014), diminue la concentration ainsi que la récupération physique et mentale. Le manque de sommeil augmente aussi la perception de l'effort (Temesi *et al.* 2013), conduisant à une détérioration de la performance de type aérobie (Mougin *et al.* 1991) ou anaérobie (Souissi *et al.* 2013), à une perturbation de l'humeur (Belenky *et al.* 2003), à une augmentation des troubles visuels, et enfin à une désorientation spatio-temporelle (Van Dongen *et al.* 2003).

Le nombre croissant de publications scientifiques, au cours de cette dernière décennie, sur les relations existantes entre sommeil et sport de haut niveau, atteste de l'intérêt porté aux processus chronobiologiques impliqués dans la performance des athlètes. Quel est le chronotype des athlètes ? Leurs entraînements sont-ils placés en phase avec leur chronotype ? Combien de temps dorment-ils par nuit ? De combien d'heures de sommeil ont-ils besoin ? Sont-ils en restriction chronique de sommeil ? Toutes ces questions préoccupent, désormais, l'encadrement sportif pour envisager une préparation optimale aux compétitions.

Alors que l'importance du sommeil se fait particulièrement ressentir chez les sportifs, chez lesquels on constate un besoin accru de sommeil, la littérature indique que les athlètes de haut niveau sont sujets à des troubles du sommeil, avec une prévalence de l'insomnie

allant de 30 à 70%, ce pourcentage variant selon qu'il s'agit d'un sport individuel ou d'équipe (Schaal et al. 2011; Bleyer et al. 2015; Durán Agüero et al. 2015). Pour autant, il est important de souligner que, parmi toutes les études, très peu d'entre elles se sont intéressées à des sportifs professionnels, pratiquant le cyclisme à très haut niveau. Charges d'entraînements intenses, stress à l'approche d'une compétition ou déplacements avec un décalage horaire d'au moins 3 h pour participer à des compétitions internationales, représentent autant de situations courantes dans la vie de tous ces sportifs. Une mauvaise gestion de leur sommeil, lors de ces différentes situations et en particulier en amont d'un déplacement transmériidien, peut être responsable d'une contre-performance (Leatherwood et Dragoo 2013).

Cette problématique était d'autant plus importante à considérer dans la préparation terminale des athlètes français, à l'occasion des Jeux Olympiques, qui se sont déroulés au Japon (Tokyo) en 2021 (initialement prévus en 2020, mais décalés en raison de la crise sanitaire), puisque 7 fuseaux horaires séparent la France du Japon, ce décalage horaire pouvant potentiellement s'accompagner d'effets délétères sur la performance des athlètes. Quelles stratégies adopter pour optimiser au mieux la préparation à ce décalage ? Ce point était d'autant plus crucial que dans le cyclisme, et contrairement à de nombreux autres sports, la majeure partie des épreuves internationales ont lieu en Europe et la question de la préparation à un tel décalage horaire s'était rarement posée. En effet, et à titre d'exemple, en cyclisme traditionnel, les 3 grands tours (le Tour de France, le Giro et la Vuelta) ainsi que les 5 monuments (Milan-San Remo, Tour des Flandres, Paris-Roubaix, Liège-Bastogne-Liège et Tour de Lombardie), constituant les plus grandes courses cyclistes, sont en Europe. En VTT Cross-Country format Olympique (XCO), sur les 32 épreuves internationales les plus importantes des 5 dernières années (2017 à 2021 ; coupes du monde et championnats du monde), seulement 7 épreuves ont eu lieu hors Europe. Seul le championnat du monde 2017 a eu lieu en Australie (Cairns) avec un décalage horaire vers l'Est de 8 heures. Les athlètes du BMX race sont, quant à eux, plus familiarisés aux déplacements internationaux, puisqu'entre 2017 et 2021, sur 24 compétitions (Coupes du Monde et Championnats du Monde), 9 ont nécessité un déplacement vers l'Ouest (Etats-Unis ou Argentine). Concernant les athlètes en cyclisme sur piste, ils sont aussi plus habitués aux voyages transcontinentaux vers l'Est puisque, depuis plusieurs années, des épreuves de Coupe du Monde/Coupe des Nations se

déroulent en Chine, en Australie ou encore au Canada. Ainsi, à l'exception des pistards, les meilleurs cyclistes français sont peu préparés au décalage horaire vers l'Est.

Les principaux enjeux sportifs de ce travail de thèse ont été d'une part, de déterminer le rythme veille-sommeil et les besoins endogènes des athlètes cyclistes français pour concevoir une stratégie individualisée de préparation et de gestion du sommeil, à un vol transmériidien, afin de performer à destination, tout en réduisant au maximum les effets délétères du décalage horaire.

La première partie du manuscrit est consacrée au rôle du sommeil comme facteur clé de la récupération du sportif. Nous exposons ensuite les différentes études qui se sont intéressées au sommeil des sportifs de haut niveau et aux facteurs pouvant l'altérer. Par ailleurs, ce chapitre appréhende les outils et méthodes d'évaluation du sommeil, du rythme veille-sommeil, du chronotype et de la somnolence chez le sportif. Enfin, nous appréhendons le phénomène du décalage horaire, notamment chez les sportifs de haut niveau, et les meilleurs moyens de restaurer rapidement un sommeil de qualité ainsi que l'ensemble des rythmes circadiens dans le contexte d'un vol long-courrier avec franchissement de plusieurs fuseaux horaires.

La seconde partie du manuscrit présente notre contribution personnelle. Trois études ont fait l'objet de ce travail de thèse : (i) une première étude avait pour objectif de décrire, par des mesures objectives et subjectives, le sommeil ainsi que la somnolence diurne des cyclistes vétérinaires professionnels, pressentis pour participer aux JO de Tokyo (publication 1) ; (ii) l'étude principale avait pour but d'évaluer, toujours chez des cyclistes professionnels, les effets d'une stratégie d'avance de phase progressive du rythme veille-sommeil avant un vol transmériidien vers l'Est (traversée de 7 fuseaux horaires), avec prise vespérale de mélatonine et luminothérapie au réveil, suivie d'une resynchronisation active à destination, sur le sommeil, les performances physiques et cognitives (publication 2) ; (iii) une étude complémentaire dont le but était de comparer, chez des cyclistes de très haut niveau, la stratégie ci-dessus, à une intervention comportant une simple resynchronisation à destination, sur le rythme veille-sommeil et la température interne (publication 3).

Les résultats de ces 3 études ont fait l'objet de plusieurs communications orales (CO1 à CO9) et affichées (CA1 et CA2) dans des séminaires ou congrès.

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

LE SOMMEIL

FACTEUR CLE DE LA RECUPERATION DU SPORTIF

Bien que les fonctions du sommeil soient encore mystérieuses, son rôle dans la récupération est, toutefois, reconnu comme déterminant majeur pour notre santé et il l'est d'autant plus chez le sportif qui doit performer au plus haut niveau possible. Le nombre croissant de publications scientifiques, entre 2010 et 2022, (plus de 1 000 répertoriées) sur le sommeil et l'athlète, atteste de l'intérêt porté à la question du sommeil dans la performance des athlètes (Walsh *et al.* 2020). Longtemps négligé, il retient aujourd'hui, de plus en plus, l'attention des athlètes, de leur encadrement, mais aussi des chercheurs (Kölling *et al.* 2019).

1. Composition du sommeil nocturne

Le sommeil est constitué de différents stades : le stade 1 (N1), le stade 2 (N2), le stade 3 (N3) et le sommeil paradoxal (R). Ce dernier stade est également dénommé « *rapid eye movement* » (REM) par les Anglo-saxons, à l'inverse des 3 autres stades (N1, N2 et N3) appelés « *non rapid eye movement sleep* » (NREM ; Dement et Kleitman 1957).

Le sommeil de stade 1 (N1) correspond à la phase d'endormissement. Il est constitué d'une activité électroencéphalographique (EEG) de fréquence mixte de 4 à 7 Hz (ondes thêta), de faible amplitude, qui s'accompagne souvent d'ondes pointues localisées sur le vertex appelées « pointes vertex », ondes de contours aigus d'une durée inférieure à 0,5 s. Les mouvements oculaires lents (de type roulement), sont assez réguliers, avec une déflexion initiale d'une durée supérieure à 500 ms. Le tonus musculaire diminue graduellement La durée de ce stade est bref.

Le sommeil de stade 2 (N2) ou sommeil lent léger est également constitué d'une activité EEG de fréquence mixte, mais comprend des graphoéléments : les « spindles » ou fuseaux de sommeil et des complexes K. Les fuseaux de sommeil sont des accélérations de l'activité EEG avec une fréquence de 11 à 16 Hz, de durée 0,5 à 1,5 seconde et les complexes K sont des ondes pointues bi-phasiques d'une durée supérieure à 0,5 seconde avec une amplitude supérieure à 75 microVolts. Le tonus musculaire et l'activité oculaire sont proches

du N1.

Le sommeil de stade 3 (N3), ou sommeil lent profond est constitué d'une activité EEG à ondes delta, de fréquence 0,5 à 4 Hz avec une amplitude supérieure à 75 microVolts. Le tonus musculaire a tendance à diminuer et l'activité oculaire reste proche du N2.

Enfin, le sommeil paradoxal (R) est constitué d'une activité EEG proche de celle du N1, comprenant des ondes thêta, dites en dents de scie, de fréquence de 4 à 7 Hz. Le stade R se distingue surtout par une atonie musculaire, mais se caractérise par de nombreux épisodes de mouvements oculaires rapides. Ce sommeil est en outre propice aux rêves : il regroupe les rêves les plus intenses et ceux dont on peut garder le souvenir une fois éveillé.

Le tracé de ces différents stades de sommeil, obtenu lors d'une polysomnographie réalisée chez un cycliste ayant participé à une de nos études, est représenté sur la figure 1.

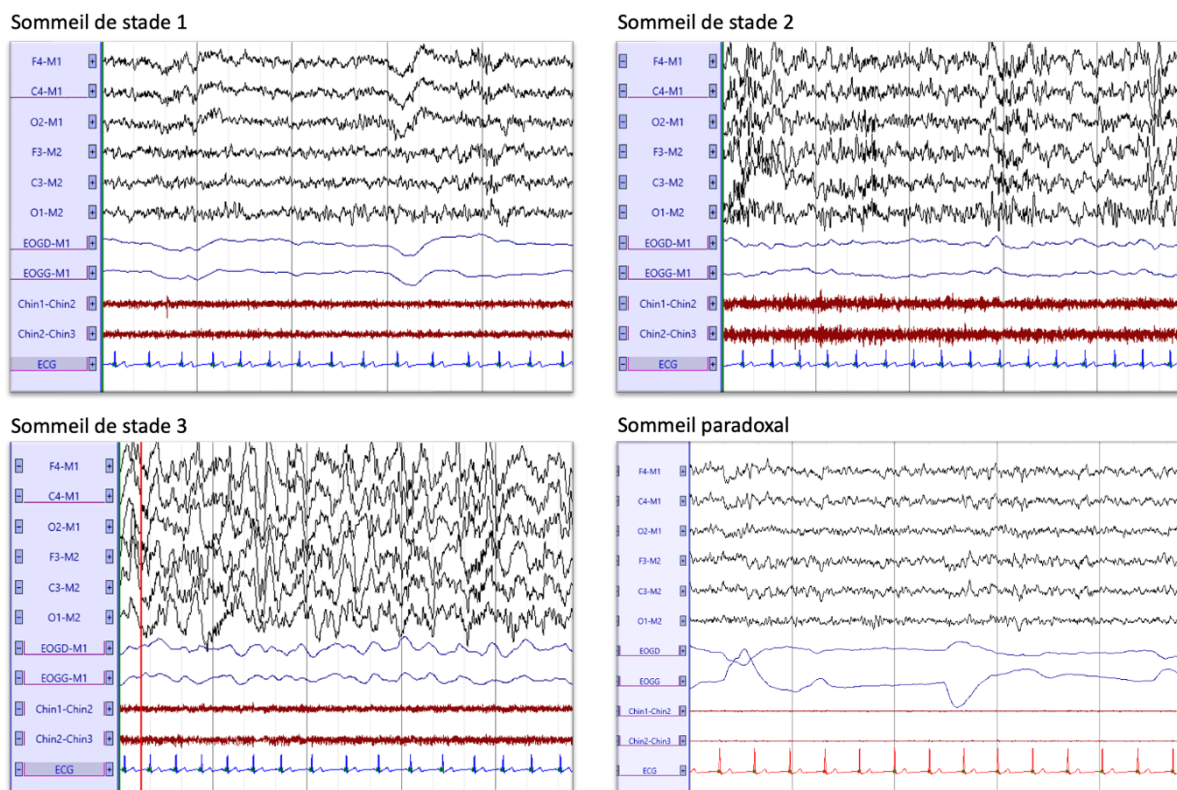


Figure 1 : Activité EEG, EOG, EMG et ECG au cours des différents stades de sommeil. Exemple d'un enregistrement d'un sportif ayant participé à une de nos études.

La périodicité du sommeil paradoxal suit un rythme ultradien, d'une durée d'environ 90 minutes (Figure 2). Ce cycle se succède 4 et 5 fois au cours d'une nuit de sommeil normal. La première moitié de la nuit est particulièrement riche en sommeil N3 alors que la deuxième moitié est riche en sommeil N2 et REM.

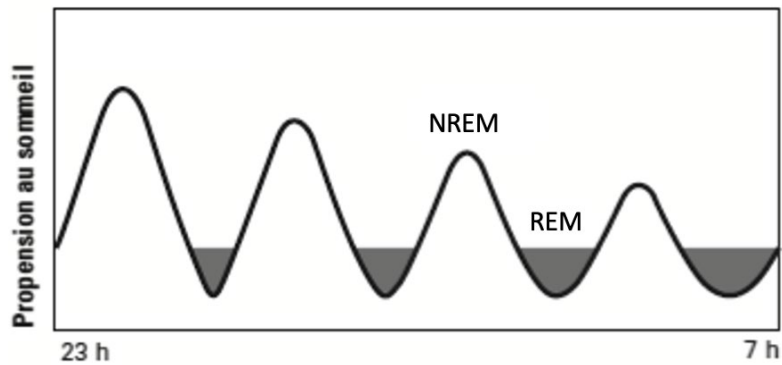


Figure 2 : Processus ultradien avec l'alternance du sommeil NREM / REM d'après Borbély (2001).

Pour une nuit de sommeil normal d'un jeune sujet adulte, le N1 représente 2 à 5 % du temps total de sommeil (TTS), le N2 entre 45 et 55 %, le N3 entre 18 et 25 % et le R entre 20 et 25 %.

2. Rôle du sommeil nocturne

2.1 Restauration des dépenses énergétiques

Afin de traiter les informations *via* les réseaux neuronaux, le cerveau a besoin constamment d'un apport d'énergie (Harris *et al.* 2012). Pendant le sommeil R, la dépense d'énergie est identique à celle de l'éveil (Wehr 1992) alors que durant le sommeil NREM, elle est réduite de 40 à 60 % par rapport à celle mesurée durant l'état de veille (Stender *et al.* 2016). En 1995, Benington et Heller ont suggéré qu'une des fonctions du sommeil était de reconstituer les réserves de glycogène cérébral, qui s'épuisent durant l'état de veille. Cette restauration s'effectuerait par une augmentation du niveau d'adénosine, produit de dégradation de l'adénosine triphosphate (ATP), libérée par les neurones pendant les périodes de haute activité métabolique, soit pendant l'éveil. Ainsi, l'adénosine activerait des neurones promouvant le sommeil N3 dans le noyau préoptique ventrolatéral de l'hypothalamus, permettant ainsi la restauration du glycogène, principale source d'énergie cérébrale. Toutefois, bien que cette hypothèse ait été soutenue par des travaux sur le rat (Kong *et al.* 2002), les études plus récentes semblent indiquer que les mécanismes cellulaires sous-jacents sont plus complexes. La concentration en ATP au niveau cérébral est maintenue à un niveau stable durant la période de veille, mais augmente considérablement, durant les premières heures de sommeil, en fonction de l'intensité des ondes delta du NREM, dans les régions cérébrales, actives au réveil (Dworak *et al.* 2010). Cette augmentation d'ATP, liée à

une diminution des protéines kinases, favorise l'anabolisme, notamment la synthèse des acides gras, du glycogène et des protéines, pendant le sommeil (Hardie 2007).

L'argument majeur en faveur des fonctions de restauration des réserves énergétiques durant le sommeil s'appuie sur la sécrétion et la libération de plusieurs hormones. L'hormone de croissance ou « *growth hormone* » (GH), encore appelée somathormone (STH) a notamment une fonction anabolique, à l'opposé des hormones impliquées dans l'éveil comme le cortisol, dont la sécrétion est inhibée durant le sommeil (Schmidt 2014). L'hormone de croissance est principalement sécrétée durant le sommeil lent profond et plus particulièrement durant le premier cycle du sommeil (70% de la sécrétion journalière; Van Cauter et Plat 1996), le niveau de cette hormone étant drastiquement réduit en cas de privation de sommeil (Van Cauter *et al.* 1991). Cette hormone assure, au niveau musculaire, la protéogenèse (Kostyo 1968), la croissance musculaire et osseuse (Goldspink et Goldberg 1975) ainsi que la régénération cellulaire (Jennische et Andersson 1991). Le cortisol, qui régule la glycémie, contrôle aussi les réponses de l'organisme au stress et inhibe les réponses immunes. Sa sécrétion diminue en début de nuit, favorisant ainsi l'endormissement. Par ailleurs, une sécrétion élevée de prolactine est observée au cours du sommeil (Spiegel *et al.* 1995) ainsi qu'une libération accrue de testostérone chez les hommes (Luboshitzky *et al.* 1999).

2.2 Consolidation du système immunitaire

Il est aujourd'hui bien admis que le sommeil participe aux défenses immunitaires. De manière générale, la quantité de sommeil N3 s'élève en cas d'épisodes infectieux, cette augmentation se faisant aux dépens du sommeil REM. Elle est associée à une production élevée de cytokines pro-inflammatoires, notamment des interleukines 1β (IL- 1β), et du tumor necrosis factor α (TNF- α , facteur de nécrose tumorale) pendant les premiers cycles de sommeil, favorisant une hypersécrétion de GH et de prolactine alors que la sécrétion des catécholamines et du cortisol, à action anti-inflammatoire, s'abaissent (Krueger *et al.* 2001 ; Besedovsky *et al.* 2012). Par ailleurs, un manque de sommeil prolongé induit aussi une augmentation des marqueurs inflammatoires (Shearer *et al.* 2001 ; Meier-Ewert *et al.* 2004 ; Haack *et al.* 2007). Vgontzas *et al.* (2004) ont, en effet, rapporté que même une faible restriction de sommeil de 2 h par nuit (réduction de 8 à 6 heures de sommeil) pendant 8 nuits, accroît le niveau des cytokines pro-inflammatoires. Un manque de sommeil chronique

s'accompagne, quant à lui, d'une immunodéficience. Chez des sujets exposés à un virus respiratoire, la probabilité d'être infecté est accrue chez des sujets pour lesquels la quantité et l'efficacité du sommeil est moindre dans les semaines précédant l'exposition (Cohen *et al.* 2009 ; Prather *et al.* 2015). L'existence d'une relation étroite entre les mécanismes de l'immunité et le sommeil lent profond est désormais bien documentée. Ce point est particulièrement important pour les athlètes de haut niveau, car leur système de défense immunitaire est souvent déprimé par l'activité physique intense, ce qui les rend très vulnérables aux infections.

2.3 Apprentissage et mémoire

Les premières expérimentations démontrant que le sommeil favorise la consolidation de la mémoire, datent des années 1980 (Ebbinghaus 1885). La consolidation mnésique, processus permettant de transformer une empreinte en une forme durable dans la mémoire, est basée sur le rôle complémentaire du sommeil N3 et R, conformément à l'hypothèse séquentielle proposée par Giuditta *et al.* (1995). Si initialement, le N3 était principalement impliqué dans la consolidation de la mémoire déclarative (Plihal et Born 1997) et le stade R dans la mémoire procédurale (Maquet 2001), des travaux ultérieurs ont montré que le N3 pouvait aussi être impliqué dans la consolidation de la mémoire procédurale et le R dans des souvenirs émotionnels (Wagner *et al.* 2001 ; Rauchs *et al.* 2004 ; Wagner *et al.* 2006). Selon le modèle de consolidation systémique (Figure 3), les profils d'activité cérébrale, associés à un nouvel apprentissage, sont réactivés au cours du sommeil au sein de réseaux neuronaux hippocampiques. Ces informations sont ensuite redistribuées vers les sites néocorticaux pour une inscription durable avec les ondes lentes du N3 *via* les fuseaux de sommeil et les ondes hippocampiques à front raide, dénommés les « *sharp-wave ripples* » (Born *et al.* 2006 ; Born et Wilhelm 2012).

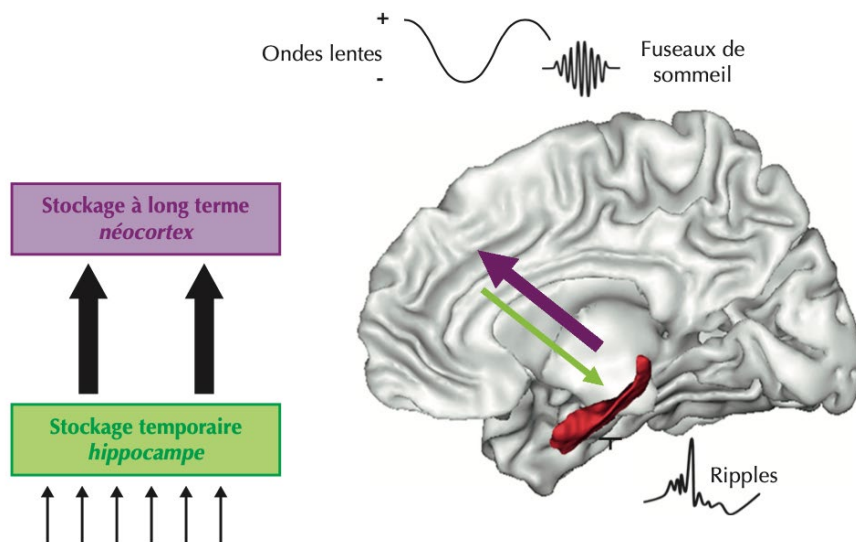


Figure 3 : Modèle de consolidation systémique au cours du sommeil. Adapté de Born et al. (2006).

À l'éveil, les informations à mémoriser sont encodées au sein de réseaux néocorticaux et réseaux hippocampiques (rectangle vert). Au cours du sommeil N3, les informations récemment acquises sont réactivées au sein des réseaux neuronaux hippocampiques. Ces réactivations stimulent le transfert des traces mnésiques vers le néocortex (rectangle violet), site de stockage à long terme des souvenirs. Le transfert s'opère notamment grâce aux ondes lentes et aux fuseaux de sommeil.

3. Régulation de la veille et du sommeil

Il existe deux mécanismes qui sous-tendent la régulation du cycle veille-sommeil : le processus homéostatique (S) et le processus circadien (C) qui interagissent tout au long d'un rythme de 24 h (Borbély 1982 ; Borbély et al. 2016).

Le processus S reflète une accumulation progressive du sommeil, en fonction du nombre d'heures passées en état d'éveil. Cette pression du sommeil diminue ensuite avec l'apparition du sommeil, suivant une cinétique exponentielle décroissante.

Le processus C est responsable de l'aspect rythmique du cycle veille-sommeil, il commande les moments de faible et de forte propension à l'éveil au cours des 24 heures.

Selon le modèle de Borbély, ces 2 processus interagissent pour générer des épisodes de sommeil, ininterrompus d'environ 8 heures, et maintenir l'éveil durant environ 16 heures, malgré l'accumulation de la fatigue. En condition normale, la pression du sommeil augmente exponentiellement (processus S) au cours de la journée, compensée par la pression de l'éveil (processus C) qui atteint un niveau maximal en fin de journée. Dès que la sécrétion de la mélatonine débute, la pression d'éveil chute brutalement, la pression du sommeil s'accroît et l'initiation du sommeil est possible. En fin de nuit, la pression du sommeil décroît, la

pression de l'éveil demeure faible, prolongeant ainsi le sommeil. Le réveil est provoqué plus tard, lorsque cette pression de l'éveil augmente (Figure 4).

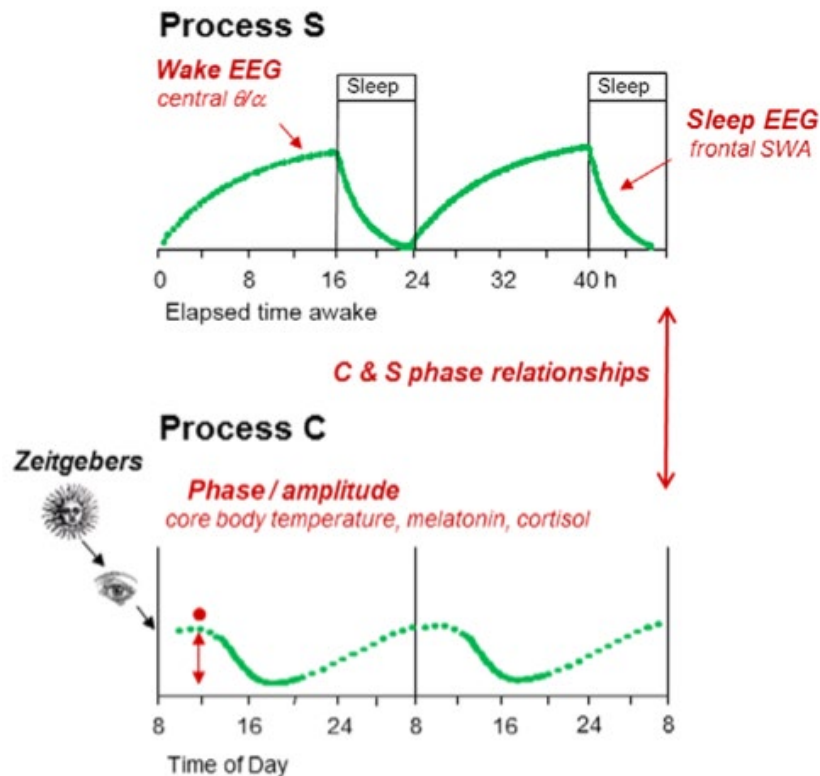


Figure 4 : Modèle de régulation de l'alternance veille-sommeil à deux processus, processus homéostatique S et processus circadien C. D'après Borbély et al. (2016).

La fonction sinusoïdale asymétrique du processus circadien correspond à la version quantitative du modèle de Daan et al. (1984) et ne représente pas l'évolution temporelle des marqueurs.

Chez les mammifères et chez l'Homme en particulier, le rythme circadien est généré par l'horloge biologique centrale (Gillette et Abbott 2009), située dans les noyaux suprachiasmatiques (NSC) de l'hypothalamus.

Ce sont 3 chercheurs américains (Hall J, Rosbash M et Young M), lauréats du prix Nobel 2017 de Physiologie/Médecine, qui, les premiers, ont exploré les mécanismes moléculaires de cette horloge biologique. Les NSC constitués d'environ 20 000 neurones, reçoivent des afférences des cellules ganglionnaires à mélanopsine et envoient des efférences vers les noyaux de la zone péri-ventriculaire de l'hypothalamus, régulant, de ce fait, la température interne, la glande pinéale (qui sécrète la mélatonine, uniquement pendant la nuit), les fonctions hypophysaires, la prise alimentaire, et enfin les cycles d'activité/repos. L'activité électrique des neurones du SNC est synchronisée par la lumière, via l'axe rétino-hypothalamique.

L'horloge circadienne est contrôlée par des gènes « horloges » qui interagissent entre eux pour former une boucle d'auto-régulation négative transcriptionnelle (synthèse de protéines) et post-transcriptionnelle (modification des protéines). Les gènes *Clock* et *Bmal1* et *Bmal2* codent des protéines CLOCK (« *Circadian Locomotor Output Cycle Kaput* ») et BMAL (« *Brain Muscle Aryl hydrocarbon receptor nuclear translocator-Like* »), formant un hétérodimère qui active l'expression des gènes *Period* (*Per1*, *Per 2*, *Per 3*) et *Cryptochrom* (*Cry1* et *Cry 2*). Les protéines PER et CRY ainsi produites, pénètrent dans le noyau après avoir atteint une concentration critique et bloquent l'activité de l'hétérodimère CLOCK : BMAL. Cette boucle d'activation et répression correspond à l'oscillateur moléculaire d'une période de 24 heures (Figure 5 ; Cha *et al.* 2018).

Par ailleurs, l'hétérodimère CLOCK : BMAL active aussi la transcription de deux gènes, codant des récepteurs nucléaires : gènes *Rev-erba/β* et *Ror α/β/δ*. La protéine REV-ERB réprime la transcription de *Bmal1* (mais aussi de *Clock* et *Cry*), alors que la protéine ROR (« *Retinoic acid receptor-related Orphan nuclear Receptor* ») l'active.

Une protéine kinase, la caséine kinase 1, qui phosphoryle les protéines PER1 et PER2, induit leur dégradation par le protéasome et leur fonction (fin de la répression de BMAL1 : CLOCK). Ainsi, l'équilibre entre la synthèse, la phosphorylation et la dégradation des protéines PER, définit la durée de la période endogène de 24 heures (Reppert et Weaver 2002 ; Duguay et Cermakian 2009 ; Mohawk *et al.* 2012).

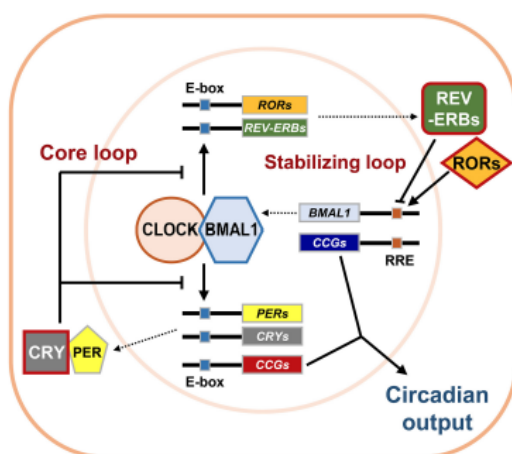


Figure 5 : Boucle d'oscillation moléculaire de l'horloge moléculaire circadienne. Emprunté à Cha *et al.* (2018).

Cette rythmicité, dans l'expression des gènes d'horloges, est également retrouvée dans les horloges périphériques, localisées dans la majorité des tissus, comme les poumons, le cœur, le foie et l'intestin (Figure 6 ; Hastings *et al.* 2003 ; Dijk and Duffy 2020 ; Lane *et al.* 2022).

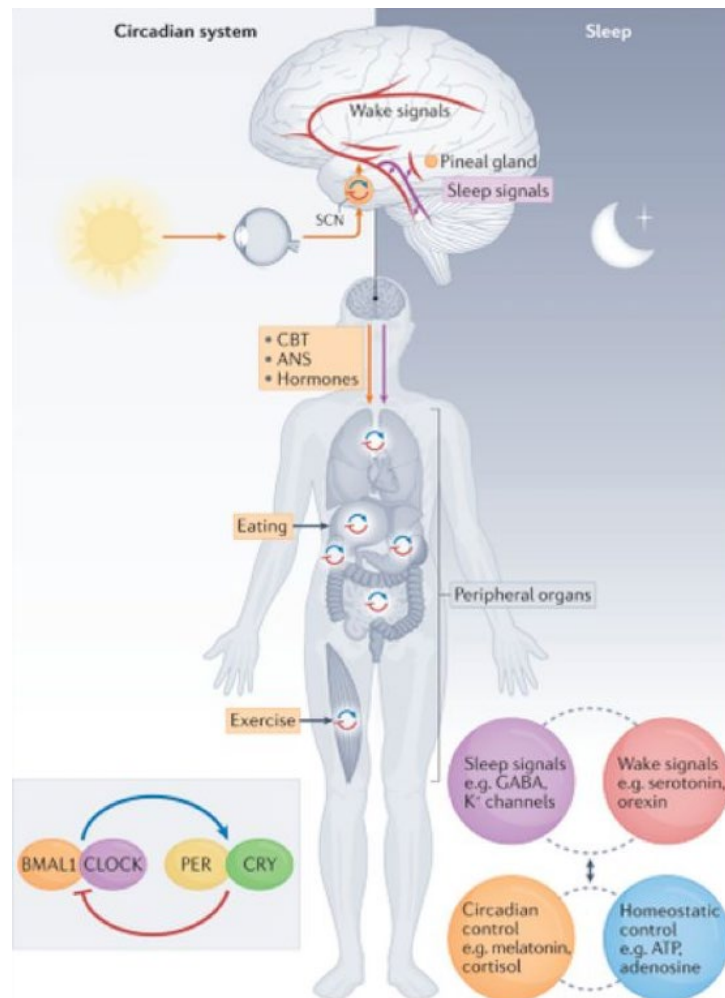


Figure 6 : Structure du système de synchronisation des rythmes circadiens.
D'après Lane *et al.* (2022).

Les expériences en libre cours, ayant lieu en l'absence de tout synchroniseur environnemental, ont montré que la rythmicité endogène de l'horloge circadienne est de 24,2 heures en moyenne (Czeisler *et al.* 1999). Environ 75 % des individus possèdent une période légèrement supérieure à 24 heures (entre 24 h et 24,5 h) et 25 % une période légèrement inférieure à 24 h (entre 23,5 h et 24 h). C'est l'alternance jour/nuit qui resynchronise chaque jour, sur une période de 24 h, cette horloge et les fonctions physiologiques. La rétine, *via* les cellules ganglionnaires à mélanopsine, transmet les informations lumineuses vers les noyaux suprachiasmatiques et ainsi permet la synchronisation de l'horloge circadienne (Hattar *et al.* 2003 ; Dacey *et al.* 2005). La lumière

inhibe ainsi la sécrétion de mélatonine en journée. L'effet de la lumière sur l'horloge biologique interne dépend de l'heure de son exposition, de son intensité (exprimée en Lux), de sa durée, mais aussi du spectre de cette lumière, généralement décrit par sa longueur d'onde en nanomètre (nm ; Duffy et Czeisler 2009). Plus le stimulus lumineux est intense et plus la durée d'exposition est longue, plus les rythmes biologiques s'expriment de manière optimale, et le système circadien est synchronisé, avec un sommeil nocturne de qualité et une vigilance diurne accrue. L'exposition à une lumière blanche, à une intensité inférieure à 100 Lux, a moins d'effets sur l'horloge biologique, et ces effets apparaissent maximaux à partir d'une intensité d'environ 1000 Lux (Zeitzer *et al.* 2000). Néanmoins, les cellules à mélanopsine ont une sensibilité maximale à des longueurs d'ondes bien plus courtes, environ 480 nm, dites lumières bleues (Brainard *et al.* 2001 ; Revell *et al.* 2005). Cette lumière bleue (480 nm) serait tout aussi efficace qu'une lumière blanche 100 fois plus intense (Brainard *et al.* 2001). L'heure de l'exposition détermine l'effet sur l'horloge circadienne, en provoquant soit une avance, soit un retard de phase. Ce phénomène est représenté par une courbe dite de phase-réponse. Chez le sujet sain, l'exposition à la lumière entre 17 h et 5 h du matin a pour effet de retarder l'horloge, alors que cette même exposition entre 5 h du matin et 17 h a pour effet de l'avancer. Pour les individus ayant une horloge d'une période de plus de 24 heures (de 24 h à 24 h 30 pour environ 75 % de la population), l'exposition à la lumière le matin est très important pour la synchronisation de leur horloge endogène. En revanche, pour les personnes ayant une période de moins de 24 h (de 23 h 30 et 24 h), c'est la lumière reçue le soir qui permet de retarder l'heure de leur horloge afin de la synchroniser. Chez des sujets en décalage de phase, symptomatique du travailleur posté par exemple, l'exposition à la lumière naturelle afin de resynchroniser l'horloge biologique peut s'avérer impossible sur certaines heures. C'est pourquoi, en pratique clinique, la luminothérapie est souvent privilégiée. Elle consiste à reproduire la lumière du jour en plein été, grâce à des lampes de lumière blanche, présentant l'avantage de pouvoir s'effectuer à toute heure de la journée sans tenir compte du cycle solaire. Ces expositions à la lumière peuvent également être faite par des dispositifs portables montés sur la tête (généralement des lunettes) dont l'intensité lumineuse est plus faible que les lampes, mais sont enrichies en lumière bleues. Certains auteurs ont déjà montré l'efficacité de certaines lunettes de luminothérapie comme les Luminette (Lucimed, Belgique) pour

retarder ou avancer les rythmes circadiens tout en étant moins contraignant pour les sujets (Slama *et al.* 2015 ; Schmidt *et al.* 2018).

Bien que la lumière soit le principal synchroniseur des rythmes biologiques, il existe d'autres facteurs « non photiques » tels que l'horaire du sommeil, l'heure de la prise alimentaire (horaire et composition des repas), l'exercice physique ou encore les activités sociales qui ont un effet synchroniseur important. Rubio-Sastre *et al.* (2014) ont montré qu'un footing de 45 minutes, à 21 heures, induisait un retard de l'acrophase de la température cutanée du poignet, par rapport à une condition d'exercice effectuée à 9 heures. Ces observations ont été confirmées par les travaux de Youngstedt *et al.* (2019). Récemment, Thomas *et al.* (2020) ont montré que ces changements de phase du rythme circadien de la mélatonine pouvaient être dépendants du chronotype. Chez des adultes en bonne santé, de chronotype « du matin », un exercice physique réalisé le matin provoque une avance de phase tandis qu'un exercice effectué le soir, entraîne un retard de phase. Cependant, chez des sujets avec un chronotype « du soir », ces mêmes exercices, réalisés le matin ou le soir, produisent tous deux une avance de phase (Thomas *et al.* 2020).

Quant à l'alimentation, une restriction alimentaire ou un changement de rythme alimentaire peut provoquer un décalage de phase des horloges périphériques (Damiola *et al.* 2000). Plusieurs études ont confirmé ces résultats, suggérant que les horaires des repas sont un puissant donneur de temps (« zeitgeber » ; Schoeller *et al.* 1997 ; Wehrens *et al.* 2017), au même titre que l'exercice pour les systèmes périphériques, indépendamment des signaux provenant de l'horloge du NSC, eux-mêmes entraînés par la lumière (Bray *et al.* 2013 ; Crosby *et al.* 2019). Certaines études soutiennent aussi un effet « zeitgeber » de la composition des repas, mais il n'existe aujourd'hui aucune preuve de son effet sur l'horloge circadienne (Lewis *et al.* 2020).

Au-delà du rythme veille-sommeil, de nombreuses autres activités comme l'humeur, l'activité motrice, la mémoire ou encore les performances musculaires ou cognitives sont régulées de manière circadienne (Van Dongen et Dingemans 2000 ; Valdez 2019). Ainsi en journée, toutes ces variables varient selon le rythme de la température interne, du cortisol et de la mélatonine.

4. Paramètres permettant l'étude des rythmes circadiens

Pour mieux appréhender la rythmicité circadienne et la désynchronisation des rythmes circadiens, le suivi des rythmes de la mélatonine et de la température interne, marqueurs chronobiologiques majeurs, est utile pour mieux comprendre le fonctionnement de l'horloge biologique centrale, en particulier en cas d'avance ou de retard de phase ou de décalage horaire. Dans ce chapitre, nous décrivons ces variables chronobiologiques, les plus couramment choisies dans les différentes études, et nous exposons les dispositifs pour les évaluer dans un contexte scientifique (Reid 2019 ; Dijk et Duffy 2020).

4.1 Mélatonine

La mélatonine est certainement le marqueur circadien le plus précis et le plus utilisé dans les études chronobiologiques, conduites chez l'homme (Benloucif *et al.* 2008 ; Pullman *et al.* 2012). La sécrétion de cette hormone est typiquement nyctémérale et régulée par le cycle jour/nuit. Sa production augmente en fin de journée, peu avant le coucher. Elle atteint son pic de sécrétion entre 2 et 4 heures du matin. Ensuite, sa concentration chute progressivement pour devenir quasiment nulle au petit matin, un peu après le réveil. Le rythme de sécrétion est contrôlé par l'horloge biologique interne, car il est identique, même chez des individus maintenus en pleine obscurité. La mélatonine renseigne l'organisme sur l'alternance jour/nuit. Néanmoins, la luminosité naturelle peut affecter sa production. Ainsi, une exposition à la lumière le soir retarde sa production et donc l'endormissement. A l'inverse, une exposition lumineuse le matin provoque le phénomène inverse. Cette exposition permet de s'adapter plus facilement aux changements d'heures et aux décalages horaires.

Les concentrations de mélatonine peuvent être mesurées au niveau plasmatique, salivaire, mais aussi par la concentration en 6-sulfatoxymélatonine, dans les urines (Figure 7). Si la mesure du rythme de la mélatonine sur 24 h est considérée comme la méthode la plus robuste (Boivin et Czeisler 1998), elle est néanmoins chronophage et relativement contraignante. La méthode généralement privilégiée consiste à déterminer l'heure d'initiation de sécrétion de la mélatonine, appelée « *Dim Light Melatonin Onset* » (DLMO), par prélèvements salivaires. La DLMO est considérée comme une analyse relativement fiable

(Benloucif *et al.* 2008). Lorsque le rythme circadien de la mélatonine est en phase avec le rythme veille-sommeil, la DLMO intervient environ 2 heures avant le coucher. Sa détermination consiste à effectuer des prélèvements pendant les 2 à 3 heures précédant le coucher à raison d'une mesure toutes les 30 minutes. La DLMO est ensuite être calculée de différentes façons : soit en prenant un seuil de 2 à 10 pg/ml, soit à partir d'un seuil correspondant à +2 écarts-types de la moyenne des premiers prélèvements (3 ou plus) ou par une estimation visuelle. La production de mélatonine étant sensible à la lumière, les prélèvements doivent être effectués sous une lumière tamisée (<50 Lux). Son évaluation doit se réaliser de manière standardisée, sans activité physique préalable ou sans que les sujets ne soient sous traitement antiinflammatoire ou β -bloquants.

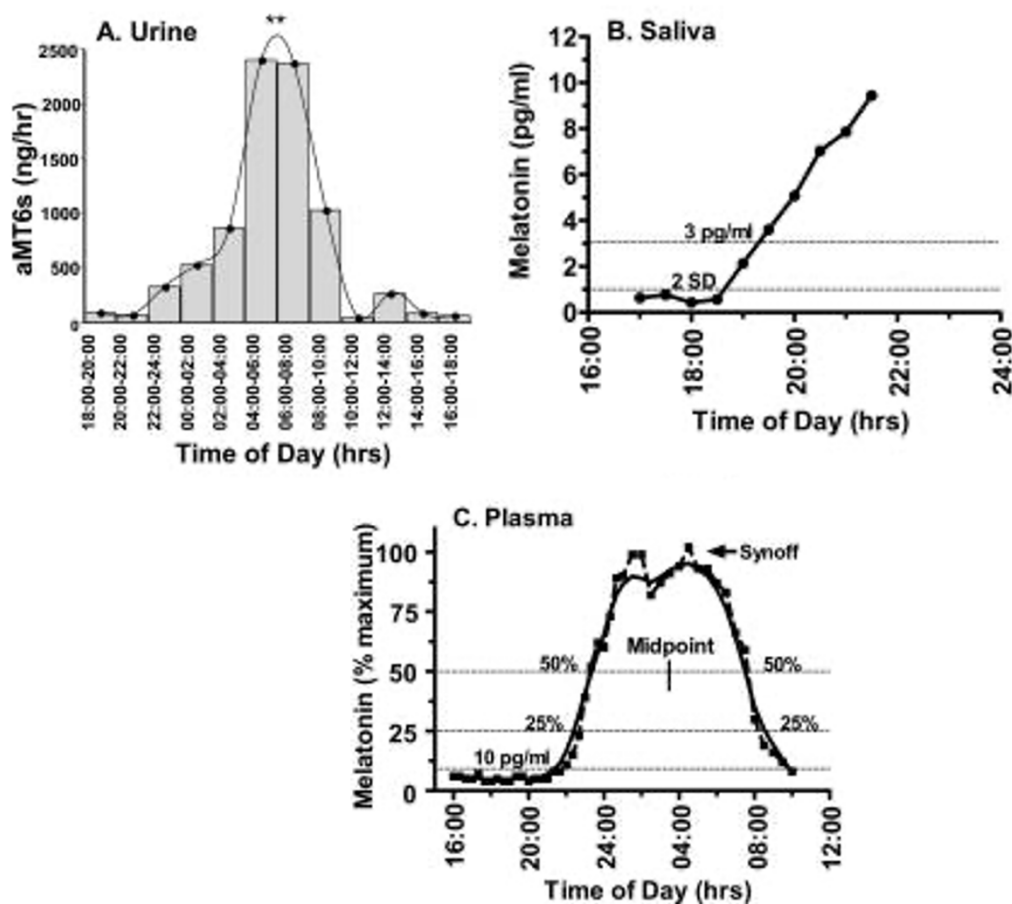


Figure 7 : Méthodes de mesure du rythme circadien de la mélatonine. D'après Benloucif *et al.* (2008).

A : Rythme de 24 h de la 6-sulfatoxymélatonine par prélèvements urinaires sous lumière tamisée.
 B : Profil de mélatonine salivaire collectée sous lumière tamisée. Détermination de la DLMO par valeur brute correspondant à 3 pg/ml ou par 2 écarts-types au-dessus de la moyenne des 3 premiers échantillons.
 C : Profil de mélatonine plasmatique sur une nuit.

4.2 Température interne

Le rythme circadien de la température interne est caractérisé par une diminution progressive de la température, du début de soirée à la fin de la nuit, avant d'augmenter progressivement tout au long de la journée. Son amplitude oscille d'environ 1 degré Celsius (°C), avec un pic à 37,5 °C aux alentours de 17-18 heures et un creux à 36,5 °C aux alentours de 5-6 heures. Ce rythme a longtemps été suivi par sonde rectale, mais de nouveaux outils, mesurant la température gastro-intestinale, par des capsules ingérables, permet aujourd'hui sa mesure en continu, de manière relativement fiable (Travers *et al.* 2016 ; Bogerd *et al.* 2018 ; Bongers *et al.* 2018). Bien que son enregistrement soit désormais facile, même en condition écologique, il est soumis à de nombreux effets masques. En effet, la température interne est influencée par de nombreux facteurs comme l'activité physique, la posture, la température ambiante, l'humidité et la prise alimentaire (Gander *et al.* 1986 ; Campbell et Broughton 1994 ; Kräuchi *et al.* 1997 ; Hofstra et de Weerd 2008). Afin de minimiser ces effets masques, l'heure du nadir de température, appelé batyphase, est généralement utilisée pour évaluer la position de la phase circadienne. Une autre approche consiste à utiliser une modélisation mathématique d'une série de données par une analyse Cosinor (Waterhouse *et al.* 2000b), décrivant ainsi une fonction sinusoidale, et caractérisant les différents paramètres du rythme que sont : la période (τ , durée nécessaire pour que le phénomène retrouve une séquence identique à la précédente), l'acrophase (ϕ , correspondant au sommet de la fonction, qui s'exprime en heures par rapport à une origine temporelle de référence, 0 heure ou minuit), le mésor (M, niveau moyen ajusté du rythme correspondant à la moyenne arithmétique, uniquement lorsque les données sont équidistantes et couvrent un cycle circadien complet), l'amplitude (A, variation de la fonction de part et d'autre du mésor ; Figure 8 ; Cornelissen 2014) ou encore la batyphase (valeur correspondant au bas de la fonction, qui s'exprime tout comme l'acrophase, par rapport à une origine temporelle de référence).

Sur la Figure 8, la période du rythme est circadienne, mais elle peut, pour certains rythmes biologiques, être infradienne, de basse fréquence ou ultradienne, de haute fréquence. C'est le cas notamment du rythme de la FC, de la FR ou du cycle menstruel chez la femme.

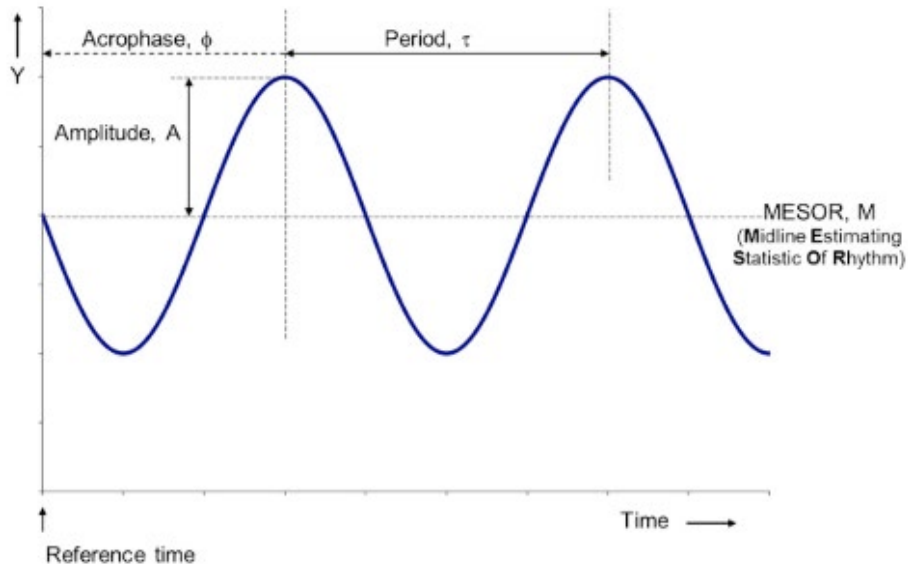


Figure 8 : Caractéristiques d'un rythme. Emprunté à Cornelissen (2014).

La période (t) représente la durée d'un cycle complet, l'acrophase (φ) est la valeur correspondant au sommet de la fonction exprimée à partir d'une origine temporelle de référence, le mésor (M) niveau moyen ajusté du rythme correspondant à la moyenne arithmétique et l'amplitude (A) représente la moitié de la variation de la fonction.

LE SOMMEIL DU SPORTIF DE HAUT NIVEAU

1. Caractérisation du sommeil de l'athlète par des méthodes subjectives

Le tableau 1 résume les données obtenues dans différentes études ayant caractérisé, de manière subjective, le sommeil de l'athlète. Il mentionne, pour chaque étude, les caractéristiques des sujets, les paramètres évalués et la prévalence des troubles de sommeil.

Les études, conduites depuis le début des années 2000, ont montré que les athlètes de haut niveau étaient sujets à des troubles du sommeil. En effet, Lucidi *et al.* (2007) ont observé, chez 103 athlètes olympiques italiens, qu'environ 60 % d'entre eux présentaient des problèmes de sommeil occasionnel. Plus tard, Schaal *et al.* (2011) ont rapporté, chez plus de 2 000 athlètes, pratiquant différents sports, tous à un niveau national, que 21,5 % d'entre eux avaient présenté, dans les 6 derniers mois, au moins un problème de sommeil, ayant duré plus de 15 jours, avec majoritairement des difficultés d'endormissement (pour 13,4 % des athlètes questionnés).

Le sommeil des sportifs a surtout été étudié par le questionnaire de sommeil de Pittsburgh (Samuels 2008 ; Bleyer *et al.* 2015 ; Durán Agüero *et al.* 2015 ; Rodrigues *et al.* 2015 ; Tsunoda *et al.* 2015 ; Swinbourne *et al.* 2016) et les résultats ont montré que 38 % (Bleyer *et al.* 2015) et 79 % (Durán Agüero *et al.* 2015) des athlètes questionnés présentaient un score au PSQI supérieur à 5, signifiant un sommeil de mauvaise qualité. Enfin, plus récemment, Biggins *et al.* (2019) ont rapporté, sur 58 athlètes, de niveau international, issus de différentes disciplines sportives, et évalués par l'« Athlete Sleep Screening Questionnaire », que 41 % d'entre eux, présentaient de légers troubles du sommeil léger (score de 5 à 7) et 16 % des problèmes modérés (score de 8 à 10).

Tableau 1 : Synthèse de différentes études évaluant de manière subjective le sommeil de l'athlète de haut niveau.

Premier auteur (année de publication)	Nombre de sujets	Sexe	Âge (année)	Sport	Niveau de performance	Evaluations	Prévalence (%)		
							Total	Homme	Femme
Lucidi (2007)	103	80% M et 20% F	23,9 ± 4,1	Multi-sports	Olympique	Insomnie	3,9	1,9	1,9
						Somnolence diurne excessive	0	0	0
						Problèmes de sommeil occasionnel	59,8	46,6	12,6
Juliff (2008)	283	45% M et 55% F	24 ± 5	Multi-sports	International	Problèmes de sommeil à l'approche d'une compétition importante :			
						Difficulté d'endormissement	82,1	80,7	83,3
						Eveil précoce	26,8	24,1	29,2
						Eveil nocturne	38	32,5	42,7
						Mauvais rêves	5,6	0	10
Ne pas se sentir en forme au réveil	36,3	34,9	37,5						
Samuels (2008)	24	42% M et 58 F	NR	Bobsleigh	Équipe nationale du Canada	Questionnaire de sommeil de Pittsburgh ≥ 5	78,3	NR	NR
						Questionnaire de sommeil de Pittsburgh ≥ 8	26,1	NR	NR
Venter (2010)	890	57% M et 43% F	22,3 ± 3,4	Multi-sports	National ou international	Difficulté d'endormissement	41%	NR	NR
Schaal (2011)	2067	64,8% M et 35,2% F	18,5 ± 4,9	Multi-sports	National	Récents problèmes de sommeil (-6 mois) persistants (>15 jours) :			
						Au moins un problème de sommeil	21,5	20,2	23,9
						Difficulté d'endormissement	13,4	11,8	16,5
						Eveil nocturne	7,6	6,1	10,4
Rodrigues (2015)	40	78% M et 22% F	30,1 ± 7,1	Multi-sports	Paralympique	Somnolence excessive (questionnaire d'Epworth)	52,5	NR	NR
						Volonté de changer certains aspects de son sommeil	46,3	NR	NR
						Questionnaire de sommeil de Pittsburgh ≥ 5	47,5	NR	NR
Duran (2015)	33	76% M et 24% F	28,3 ± 10	Multi-sports	Paralympique	Somnolence excessive (questionnaire d'Epworth > 10)	27,7	NR	NR
						Questionnaire de sommeil de Pittsburgh ≥ 5	78,7	NR	NR
Tsunoda (2015)	14	M	29,5 ± 5,2	Basket fauteuil	Équipe nationale du Japon	Questionnaire de sommeil de Pittsburgh > 5,5	42,9	NR	NR
Swinbourne (2015)	175	87% M et 13% F	±	Multi-sports	Regional / national	Questionnaire de sommeil de Pittsburgh > 5	50	NR	NR
Bleyer (2015)	452	39% M et 61% F	21,2 ± 5,8	Multi-sports	National	Questionnaire de sommeil de Pittsburgh > 5	38	NR	NR
Tuomilehto (2016)	107	M	25,4 ±	Hockey	Professionnel	Questionnaire de sommeil (basé sur le Nordic sleep questionnaire) :			
						Problèmes de sommeil	22	NR	NR
Samuels (2018)	199	48% M et 62% F	24 ± 4,2	Multi-sports	Équipe nationale du Canada	Questionnaire de sommeil spécifique à l'athlète de haut niveau (ASSQ) :	NR	NR	NR
						Problèmes de sommeil nécessitant une consultation	13,2	NR	NR
Biggins (2019)	58	59% M et 41 F	21,8 ± 2,2	Multi-sports	International	Questionnaire de sommeil spécifique à l'athlète de haut niveau (ASSQ) :			
						Problèmes de sommeil léger (ASSQ 5 - 7)	41	25	52,9
						Problèmes de sommeil modéré (ASSQ 8 - 10)	16	12,5	17,6
Saidi (2022)	16	M	16,5 ± 1,2	Rugby	National	Problèmes de sommeil sévère (ASSQ 11 - 17)	0	0	0
						Questionnaire de sommeil de Pittsburgh ≥ 5	52,0	NR	NR

2. Caractérisation du sommeil de l'athlète au moyen de méthodes objectives

Le tableau 2 résume les résultats de différentes études ayant évalué le sommeil de l'athlète par polysomnographie. Pour chaque étude, les caractéristiques des sujets, le temps total de sommeil, la latence d'endormissement, l'efficacité du sommeil, le temps d'éveil intra-sommeil, le temps passé en sommeil, N1, N2, N3 et R sont exposés. À la lecture de ce tableau, on constate que sur 18 études répertoriées, seulement 11 d'entre elles rapportent les données sur la composition du sommeil des athlètes, obtenues par PSG. Parmi ces études, certaines démontrent que le sommeil des sportifs comporte jusqu'à 30 % de sommeil lent profond (Taylor *et al.* 1997 ; Sargent *et al.* 2013 ; Suppiah *et al.* 2015 ; Romyn *et al.* 2018 ; Saidi *et al.* 2022), alors que d'autres rapportent une architecture du sommeil, similaire à celle d'une population adulte en bonne santé (Gosselin *et al.* 2009 ; Hoshikawa *et al.* 2010 ; Suppiah *et al.* 2015 ; Estivill-Domènech *et al.* 2018 ; Dunican *et al.* 2019a). Certains auteurs ont suggéré qu'il existerait un seuil au-delà duquel la quantité de sommeil N3 ne pourrait plus augmenter (Knufinke *et al.* 2018).

Les tableaux 3 A et 3 B résument, quant à eux, les résultats de différentes études ayant évalué le sommeil de l'athlète par actimétrie. Comme pour le tableau 2, les caractéristiques des sujets, le temps passé au lit, le temps total de sommeil, l'efficacité du sommeil et le temps d'éveil intra-sommeil sont exposés.

Les actimètres, du fait des moindres contraintes et de leur simplicité d'utilisation, sont plus fréquemment utilisés que la polysomnographie (Vlahoyiannis *et al.* 2020). Parmi les 41 études répertoriées ici, il a été démontré notamment chez des nageurs de niveau national (Sargent *et al.* 2014a) ou chez des footballeurs (Richmond *et al.* 2004) que le TTS variait de 5,4 à 8,9 heures par nuit, avec une efficacité du sommeil de 71% et à 93 % respectivement.

Dans les 47 études citées, 20 d'entre elles rapportent des données inférieures aux recommandations de la *National Sleep Foundation* (NSF), soit de 8 à 10 h de sommeil par nuit pour des adolescents âgés entre 14 à 17 ans, et de 7 à 9 h pour les adultes âgés de 18 à 64 ans (Hirshkowitz *et al.* 2015). Seulement 5 études ont enregistré un TTS supérieur à 8 h par nuit (Richmond *et al.* 2004 ; Richmond *et al.* 2007 ; Romyn *et al.* 2016 ; Whitworth-Turner *et al.* 2017 ; Lalor *et al.* 2018). Il est à mentionner que la majorité des études (27 au

total) ont été conduites auprès de sportifs pratiquant un sport collectif et que seulement 10 se sont intéressées à des sports individuels dont uniquement 3 au cyclisme. Dans 17 études, les sujets étaient de niveau national, dans 4 études les sportifs étaient qualifiés d'entraînés à très entraînés, une seule étude était consacrée à des sportifs de niveau international et 8 à des athlètes professionnels. Ces dernières ne concernaient que des sports collectifs, notamment le football, le football australien ou le rugby.

Parmi les 4 études conduites chez des cyclistes, Lastella *et al.* (2015c) ont observé des perturbations du sommeil, avec une diminution du temps de sommeil la veille (6,5 h) et lors de la première nuit de compétition (6,8 h, l'épreuve durant 3 jours), comparé à celui obtenu lors d'une période de référence précompétitive (7,4 h). Ces mêmes auteurs (Lastella *et al.* 2015b) ont rapporté un TTS de 7,4 h et une efficacité de sommeil de 86,6% chez des sportifs de niveau national, avant 3 semaines d'entraînement à haut volume (20 h par semaine). Le TTS était réduit de 20 minutes et l'efficacité du sommeil de 1,6 % au cours des deux dernières semaines d'entraînement. Quant à Killer *et al.* (2015), ils ont observé, chez des cyclistes très entraînés, au cours d'une période d'entraînement intense de 9 jours, un TTS plus élevé (+ 17 minutes) mais une réduction de l'efficacité de sommeil (-5,3%), comparées aux données basales (TTS : 6,3 h et efficacité de sommeil : 83,1 %). Ces observations montrent qu'un volume d'entraînement trop important peut impacter l'efficacité du sommeil. Enfin, Sargent *et al.* (2016) ont comparé, sur une seule nuit, chez des cyclistes très entraînés les paramètres du sommeil, enregistrés par PSG, à ceux obtenus par actimétrie et ont obtenu une bonne concordance des résultats avec un TTS de 8,5 h et une efficacité du sommeil de 89,6 % par PSG vs un TTS de 8,2 h et une efficacité de sommeil de 91,6 % par actimétrie, paramétré sur le seuil d'activité élevé.

Tableau 2 : Synthèse de différentes études évaluant le sommeil de l'athlète de haut niveau par PSG.

Premier auteur (année de publication)	Nombre de sujets	Sexe	Âge (année)	Pratique sportive	Niveau de pratique	Nombre de nuits	TTS (h)	LE (min)	SE (%)	TEE (min)	N1 (min)	N2 (min)	N3 (min)	R (min)	N1 (%)	N2 (%)	N3 (%)	R (%)
Walker (1978)	10	M	19	Course à pied	NR	3	7,7 ± 0,1	15 ± 6	NR	7 ± 11	NR	NR	NR	117 ± 15	NR	NR	NR	25 ± 3
Shapiro (1981)	6	M	22	Course à pied	NR	1	7,1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	116	NR	NR	NR	NR
Driver (1994)	8	M	30	Triathlon	Compétiteur	1	7,3 ± 0,8	9 ± 9	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Taylor (1997)	7	F	19 ± 2	Natation	National	1	7,5 ± 0,5	19 ± 4	NR	4 ± 6		221 ± 36 ^a	129 ± 23	89 ± 18	NR	49 ± 8	29 ± 5	20 ± 4
George (2003)	52	M	26 ± 2	Football	Professionnel	1	6,0 ± 0,5	22 ± 20	90 ± 7	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Hoshikawa (2007)	8	M	22 ± 2	Course à pied	NR	1	7,6 ± 0,3	10 ± 3	95 ± 4	23 ± 15	61 ± 14	209 ± 34	86 ± 22	98 ± 22	13 ± 3	46 ± 7	19 ± 5	21 ± 5
Gosselin (2009)	11	M et F	23 ± 2	Multi-sports	Professionnel	1	7,6 ± 0,3	9 ± 7	95 ± 4	17 ± 8	29 ± 10	275 ± 29	51 ± 21	101 ± 17	6 ± 2	60 ± 6	11 ± 5	22 ± 4
Hoshikawa (2010)	7	M	22 ± 2	Course à pied	National	1	7,6 ± 0,3	9 ± 3	94 ± 4	24 ± 16	61 ± 15	209 ± 37	86 ± 24	98 ± 24	13 ± 3	46 ± 8	19 ± 5	21 ± 5
Sargent (2013)	10	M	16 ± 1	Football	National	1	8,0 ± 0,7	18 ± 8	86 ± 5	64 ± 39	26 ± 13	216 ± 28	130 ± 19	107 ± 25	5 ± 3	45 ± 6	27 ± 4	22 ± 5
Suppiah (2015)	4	M	15 ± 1	Bowling	Haut-niveau	2	6,5 ± 0,3	NR	NR	4 ± 2		191 ± 7 ^a	93 ± 7	106 ± 17	NR	49 ± 2	24 ± 2	27 ± 4
	4	M		Badminton	Haut-niveau	2	6,7 ± 0,3	NR	NR	1 ± 0		158 ± 25 ^a	139 ± 20	106 ± 20	NR	39 ± 6	35 ± 5	26 ± 5
Suppiah (2016)	6	M	15 ± 1	Tir	Haut-niveau	1	6,4 ± 0,1	NR	NR	2 ± 2	44 ± 7	NR	29 ± 12	101 ± 38	NR	NR	NR	NR
	8	M		Athlétisme	NR	1	6,4 ± 0,1	NR	NR	3 ± 2	48 ± 7	NR	24 ± 4	103 ± 35	NR	NR	NR	NR
Tuomilehto (2016)	23	M	NR	Hockey sur glace	Professionnel	1	6,9 ±	18	NR	NR	37	178	82	88	9	43	20	21
Sargent (2016)	16	M	19 ± 2	Cyclisme	National	9	8,5 ± 0,4	18 ± 13	90 ± 5	41 ± 22	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Fuller (2017)	21	M	23 ± 3	Football australien et rugby	National	1	7,6 ± 0,8	16 ± 16	89 ± 5	41 ± 22	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Estivill-Domenech (2018)	9	F	16 ± 1	Basket	Haut-niveau	1	6,7 ± 2,0	19 ± 14	95 ± 26	NR	15 ± 7	193 ± 55	99 ± 29	96 ± 29	4 ± 2	48 ± 14	25 ± 7	24 ± 7
Romyn (2018)	12	M	18 ± 1	Football	NR	1	8,1 ± 0,7	NR	90 ± 7	23 ± 12	28 ± 13	198 ± 38	148 ± 39	110 ± 16	6	41	30	23
Duncan (2019)	25	M	25 ± 4	Rugby	Professionnel	1	6,6 ± 0,6	13 ± 11	89 ± 7	37 ± 30	59 ± 40	182 ± 24	75 ± 24	79 ± 28	15 ± 10	46 ± 6	19 ± 6	20 ± 7
Saidi (2022)	16	M	17 ± 2	Rugby	National	1	6,9 ± 0,9	NR	89 ± 6	26 ± 15	14 ± 15	165 ± 48	142 ± 35	93 ± 16	3 ± 3	36 ± 8	31 ± 8	19 ± 3

^a Combinaison du sommeil N1 et N2 comme sommeil léger

En police de couleur bleu sont identifiées les études menées chez les cyclistes

Tableau 3 A : Synthèse de différentes études évaluant le sommeil de l'athlète de haut niveau par actimétrie.

Premier auteur (année de publication)	Nombre de sujets	Sexe	Âge (année)	Pratique sportive	Niveau de pratique	Nombre de nuits	Temps passé au lit (h)	Temps total de sommeil (h)	SE (%)	TEE (min)
Richmond (2004)	10	M	23 ± 2,0	Football Australien	Professionnel	19	NR	8,4 ± 16	88 ± 3,8	57 ± 18
Richmond (2007)	19	M	24 ± 3,3	Football Australien	Professionnel	2	NR	8,9 ± 0,1	93 ± 1	±
Fietze (2009)	24	M et F	27 ± 5,0	Danse	NR	67	8,6 ± 1	7,0 ± 0,1	81 ± 4,4	72 ± 28
Mah (2011)	11	M	19 ± 1,4	Basket	National	17,7	NR	6,7 ± 1	NR	NR
Leeder (2012)	11	M et F	NR	Canoë	Equipe nationale	4	8,5 ± 0,6	7,0 ± 0,4	82 ± 4,3	1,1 ± 0,3
	14	M et F	NR	Plongée	Equipe nationale	4	8,8 ± 0,9	7,1 ± 0,8	81 ± 5,3	1,3 ± 0,3
	10	M et F	NR	Aviron	Equipe nationale	4	7,8 ± 0,7	6,4 ± 0,8	83 ± 8,3	1,1 ± 0,5
	11	M et F	NR	Patinage de vitesse	Equipe nationale	4	9,2 ± 0,8	7,1 ± 0,6	77 ± 7,1	1,6 ± 0,8
Roach (2013)	14	M	16 ± 0,5	Football	National	19	9,2 ± 0,8	7,0 ± 0,5	80 ± 3	NR
	12	M	17 ± 1,2	Football	National	15	7,8 ± 0,7	5,7 ± 0,7	78 ± 6	NR
Robey (2013)	12	M	19 ± 1,4	Football	National	NR	8,4	7,2 ± 0,7	89 ± 5,8	15 ± 11
Hauswirth (2014)	9	M	37 ± 6,0	Triathlon	Bien entraîné	7	7,4 ± 0,5	6,6 ± 0,5	88 ± 6,3	NR
Sargent (2014)	7	M et F	23 ± 1,7	Natation	National	12	7,7 ± 0,9	5,4 ± 1,3	71 ± 15	18 ± 8,8
Sargent (2014)	70	M et F	20 ± 2,9	Multi-sports	National ou international	14	8,3 ± 1,2	6,5 ± 1,3	86 ± 7,1	NR
Lastella (2015)	66	M et F	22 ± 3,4	Sport Individuel	National ou international	12,1	8,2 ± 1	6,5 ± 1,1	86 ± 6,1	19 ± 7,4
	58	M et F	23 ± 2,5	Sport collectif	National ou international	11,8	8,5 ± 1,2	7,0 ± 1,2	86 ± 4,8	16 ± 5
Lastella (2015)	21	M	20 ± 1,7	Cyclisme	National	6	9,2 ± 0,3	7,4 ± 0,6	86 ± 5,6	NR
Schaal (2015)	10	F	20 ± 0,4	Natation synchronisée	International	7	8,5 ± 0,2	7,2 ± 0,2	85 ± 1,3	NR
Shearer (2015)	28	M	24 ± 2,9	Rugby	National	2	8,8 ± 0,8	7,1 ± 1	79 ± 9,2	1,1 ± 0,7
Suppiah (2015)	11	M	15 ± 0,9	Bowling et Badminton	National	7	7,0	6,1 ± 0,7	NR	38 ± 16
Pitchford (2016)	19	M	22 ± 3,5	Football Australien	Professionnel	8	8,3 ± 0,5	7,0 ± 0,4	85 ± 6,5	69 ± 30
Sargent (2016)	16	M	19 ± 1,5	Cyclisme	National	9	NR	7,6 ± 0,6	85 ± 3,5	80 ± 29
Romyn (2016)	8	F	20 ± 1,5	Netball	NR	7	8,3	8,2 ± 0,5	85 ± 3,5	35 ± 7,6
Louis (2016)	21	M	31 ± 4,7	Triathlon	Entraîné	21	7,8 ± 1	6,5 ± 0,8	83 ± 6,8	NR
Suppiah (2016)	29	M	15 ± 1,3	Tir et athlétisme	Haut niveau	7	6,8 ± 29	5,5 ± 33	81 ± 8,6	75 ± 23
Van Ryswyk (2016)	23	M	24 ± 2,0	Football Australien	National	4	8,8 ± 48	7,1 ± 55	NR	NR

En police de couleur bleu sont identifiées les études menées chez les cyclistes

Tableau 3 B : Synthèse de différentes études évaluant le sommeil de l'athlète de haut niveau par actimétrie.

Premier auteur (année de publication)	Nombre de sujets	Sexe	Âge (année)	Pratique sportive	Niveau de pratique	Nombre de nuits	Temps passé au lit (h)	Temps total de sommeil (h)	SE (%)	TEE (min)
Caia (2017)	7	M	24 ± 2,1	Rugby	National	7	8,0 ± 0,5	6,9 ± 0,4	86 ± 1,8	NR
Caia (2017)	15	M	26 ± 3,7	Rugby	National	7	8,6 ± 1	7,5 ± 0,9	88 ± 3,8	NR
Carriço (2017)	25	M	26 ± 4,7	Football	Professionnel	3	7,7 ± 0,7	6,6 ± 0,8	85 ± 5	30 ± 16
Dunican (2017)	9	M et F	18 ± 2,0	Judo	National ou international	2	NR	7,4 ± 0,1	89 ± 6	6 ± 4
Killer (2017)	10	M	25 ± 5,8	Cyclisme	Très entraîné	5	7,6 ± 0,8	NR	83 ± 5,3	NR
Knufinke (2017)	98	M et F	19 ± 3,0	Multi-sports	Elite	7	8,5 ± 1,2	7,8 ± 1,1	88 ± 5,5	33 ± 17
O'Donnell (2017)	26	F	23 ± 6,0	Netball	National ou international	NR	9,1 ± 0,8	7,3 ± 0,8	81 ± 6,5	NR
Thornton (2017)	31	M	25 ± 3,9	Rugby	Professionnel	7	8,3 ± 1,2	7,3 ± 1,1	88 ± 4,2	42 ± 17
Thornton (2017)	14	M	26 ± 2,9	Rugby	Professionnel		7,5 ± 1,4	6,9 ± 1,2	92 ± 3	35 ± 16
Miller (2017)	16	M	NR	Football Australien	Professionnel	7	8,5 ± 1,3	6,8 ± 1,2	82 ± 6,5	NR
	7	M	NR	Football	Professionnel	7	8,0 ± 2,2	6,7 ± 2	86 ± 5,7	NR
	28	M	NR	Rugby	Professionnel	7	8,4 ± 1,7	7,2 ± 1,6	89 ± 4,2	NR
Pitchford (2017)	19	M	22 ± 3,5	Football Australien	Professionnel	8	8,3 ± 0,5	7,0 ± 0,4	85 ± 6,5	NR
Driller (2017)	19	M et F	20 ± 2,0	Multi-sports	National ou international	7	8,5 ± 2	7,6 ± 0,8	92 ± 1,4	NR
Stauton (2017)	17	F	NR	Basket	National	210 [#]	NR	7,6 ± 1,5	92 ± 4	NR
Whitworth-Turner (2017)	11	M	18 ± 1,0	Football	NR	3	NR	8,1 ± 1,1	94 ± 3	6 ± 9
Caia (2018)	12	M	25 ± 3,2	Rugby	Professionnel	14	8,9 ± 0,4	7,8 ± 0,3	88 ± 2,9	NR
Lalor (2018)	45	M	22 ± 3,3	Football Australien	National	10	NR	8,9 ± 0,1	81 ± 0,4	79 ± 1,7
Nedelec (2018)	20	M	26 ± 4,6	Football	National	6	8,1 ± 0,7	6,4 ± 0,9	79 ± 11	NR
Costa (2019)	16	F	20 ± 2,1	Football	Semi-professionnel	9	8,3 ± 1,1	7,3 ± 0,8	88 ± 5	56 ± 30
Costa (2019)	17	F	22 ± 2,3	Football	Semi-professionnel	18	8,2 ± 0,3	7,2 ± 0,5	90 ± 4	37 ± 12

enregistrement de 30 semaines sur 2 saisons

En police de couleur bleu sont identifiées les études menées chez les cyclistes

3. Facteurs pouvant perturber le sommeil

Le sexe (Lund *et al.* 2010 ; Ohayon et Sagales 2010 ; Wong et Fielding 2011), l'âge (Riemann *et al.* 2017), une lésion de la moelle épinière (Giannoccaro *et al.* 2013), ou encore des caractéristiques psychologiques comme la prédisposition d'un individu à ressentir des émotions négatives, le stress et/ou l'anxiété (Kalmbach *et al.* 2018) mais aussi l'utilisation excessive des écrans (De La Iglesia *et al.* 2015) sont autant de facteurs qui influencent la qualité et la quantité du sommeil.

Ohayon et Sagales (2010) ont montré, sur un échantillon représentatif de la population espagnole (4065 personnes de plus de 15 ans) que 23,9 % des femmes présentaient au moins 3 fois par semaine des symptômes d'insomnie vs 17,6 % chez les hommes. De la même manière, chez des athlètes, Schaal *et al.* (2011) ont rapporté, qu'un plus grand nombre de femmes présentaient des difficultés d'endormissement et des réveils nocturnes plus fréquents comparées à leurs homologues masculins. Ces problèmes pourraient être liés à des épisodes d'anxiété et de dépression, plus fréquemment diagnostiqués chez les athlètes féminines (Mahoney *et al.* 1987 ; Schaal *et al.* 2011). D'ailleurs, Ramsawh *et al.* (2009) ont confirmé ces troubles anxieux, eux-mêmes évalués par le questionnaire PSQI, à l'origine de troubles du sommeil chez ces athlètes féminines.

Swinbourne *et al.* (2016) ont rapporté un score au PSQI inférieur chez des athlètes de moins de 25 ans (score de 5,4) comparé à celui obtenu chez des sportifs plus âgés (score de 6,9).

L'hyperexcitation peut être source d'insomnies chroniques (Riemann *et al.* 2010). Chez des athlètes australiens pratiquant le netball, le trait d'hyperexcitation élevé était corrélé à une diminution de l'efficacité de sommeil (Juliff *et al.* 2018), les athlètes qui présentaient un trait hyperexcitation élevé étant davantage prédisposés à des troubles du sommeil, notamment à l'approche de compétitions majeures ou lors de périodes stressantes (Juliff *et al.* 2018).

L'exposition à la lumière artificielle et notamment la lumière bleue émise par les écrans a réduit considérablement le TTS au cours de ces dernières décennies (De La Iglesia *et al.* 2015). En effet, les écrans (ordinateur, téléphone, tablette, etc.) émettent de la lumière bleue et comme expliqué précédemment (*Cf.* régulation de la veille et du sommeil, page 23),

celle-ci se comporte, à l'instar de la lumière du jour, comme un véritable donneur de temps. Une exposition en soirée va donc retarder la production de la mélatonine et désynchroniser l'horloge biologique par un retard de phase. Les sportifs de haut niveau n'ont pas échappé à leur utilisation, d'autant plus qu'ils sont des personnalités publiques chez lesquelles la gestion de leur image *via* les réseaux sociaux fait partie intégrante de leur vie de sportif de haut niveau.

Un certain nombre d'athlètes de très haut niveau sont aussi suivis par le Système d'Administration et de Gestion Antidopage (Anti-Doping Administration & Management System, ADAMS) de l'Agence Mondiale Antidopage (AMA), nécessitant d'être joignable 24h/24h en cas d'un contrôle antidopage inopiné ; ainsi ces contraintes peuvent nuire à un sommeil optimal.

Chez les sportifs de haut niveau, la discipline sportive, les charges d'entraînement, les horaires des entraînements et des compétitions peuvent influencer le sommeil. En évaluant le sommeil d'athlètes issus de différentes disciplines sportives, des différences ont souvent été identifiées. Lastella et al. (2015a) ont montré que les athlètes pratiquant un sport individuel se couchent plus tôt, se lèvent plus tôt et leur quantité de sommeil est moindre, par rapport à des athlètes spécialistes de sports collectifs (6,5 h contre 7 h chaque nuit). Néanmoins, Brandt et al. (2017) n'ont noté aucune différence de perception de qualité de sommeil entre les sportifs pratiquant un sport individuel ou collectif.

L'intensité de la pratique sportive a aussi son importance. Suppiah et al. (2015) ont montré, chez des athlètes adolescents, pratiquant le badminton, qu'ils présentaient une quantité de sommeil profond plus importante que les athlètes pratiquants le bowling (139 min vs 93 min), sans que leur TTS ne soit différente. Les mêmes auteurs n'ont par ailleurs, rapporté aucune différence dans la composition du sommeil entre les sports à haute et à faible intensité, chez une population étudiante (Suppiah et al. 2016).

Il semblerait que, dans les sports esthétiques (tels que la gymnastique, la natation synchronisée ou encore le patinage artistique, etc.), les athlètes (33 % d'entre eux) présentent plus de troubles du sommeil que dans les sports de combat et de contact, les sports collectifs, les sports de tirs, les sports de course, les sports de raquettes et les sports à haut risque, (Schaal et al.,2011). Il est probable que ces troubles soient liés à la présence plus fréquente d'une période de dépression (au moins une au cours de leur carrière

sportive), bien que ces observations ne soient pas statistiquement significatives (24,2 % contre 18,2 % dans les sports de tirs, 8,1 % dans les sports collectifs et 7,4 % dans les sports à haut risque). À l'inverse, ces auteurs rapportent que les athlètes pratiquant des sports à haut risque (sports de glisse, aériens et mécaniques), présentent moins de troubles de sommeil (< 15 %). Enfin, des athlètes spécialistes de football américain ou de rugby semblent plus sujets à des troubles respiratoires, notamment un syndrome d'apnées-hypopnées obstructives du sommeil qu'une population sédentaire (George *et al.* 2003 ; Swinbourne *et al.* 2016), probablement en raison d'un poids élevé, d'une adiposité élevée au niveau du cou (Emsellem et Murtagh 2005 ; Swinbourne *et al.* 2016) ou à des traumatismes faciaux ayant provoqué une déformation/déviatation nasale.

Des perturbations du sommeil sont souvent rapportées durant des périodes de surentraînement (Kellmann 2010 ; Meeusen *et al.* 2013), des périodes de surcharge d'entraînement (Fry *et al.* 1992 ; Hausswirth *et al.* 2014) ou d'entraînements intenses (Jürimäe *et al.* 2002 ; Jürimäe *et al.* 2004 ; Schaal *et al.* 2015 ; Killer *et al.* 2017). Ainsi, des difficultés d'endormissement, une réduction du temps total de sommeil et de l'efficacité de sommeil sont très souvent rapportées. Chez des cyclistes très entraînés, 2 périodes de 9 jours d'entraînement intense (23 h vs 9 h par semaine habituellement) augmentent le temps passé au lit (+ 53 min), sans que le temps total de sommeil soit plus élevé, résultant ainsi d'une moindre efficacité du sommeil (-5 % ; Killer *et al.* 2017). Ces altérations du sommeil pourraient être liées aux périodes de surcharge (Carrard *et al.* 2021). Des résultats contradictoires ont cependant été récemment rapportés par Saidi *et al.* (2019), des adolescents rugbyman, présentaient, la nuit subséquente à une journée d'entraînement biquotidienne, une augmentation du TTS (+ 26 min), de l'ES (+ 8,5 %) accompagnés d'une baisse du TEE (-39 min) en comparaison à une nuit habituelle, faisant suite à un entraînement quotidien unique. Des études complémentaires sont nécessaires pour mieux appréhender les relations existantes, entre les charges d'entraînements, fonctionnement du système immunitaire et sommeil.

Certains créneaux horaires d'entraînement ou de compétitions modifient le sommeil des athlètes. Une étude a par exemple montré qu'un entraînement réalisé entre 6 h et 8 h du matin, chez des nageurs de très haut niveau, en préparation pour les JO de Pékin de 2008, a diminué le TPL (7,7 h) et le TTS (5,6 h) la nuit précédant les entraînements, par

comparaison aux TPL (9,3 h) et TTS (7,1 h) la nuit précédant les jours de repos, alors que l'horaire de coucher était avancé (22 h 05 contre 00 h 32 avant les jours de repos (Sargent et al. 2014a). Ces mêmes auteurs ont montré, chez 70 athlètes de niveau national, de différents disciplines sportives (football australien, basket, VTT, course à pied, cyclisme sur route, natation et triathlon), une relation entre l'horaire du début d'entraînement et le TTS de la nuit précédente. En effet, les athlètes qui débutaient l'entraînement entre 05 h et 06 h du matin, avaient moins de 5 h de sommeil alors que ceux qui s'entraînaient, entre 10 h et 11 h, dormaient plus de 7 h (Sargent *et al.* 2014b). Les compétitions organisées en soirée perturbent aussi la quantité de sommeil des athlètes. Fullagar et al. (2016), tout comme Sargent et Roach (2016) ont observé, chez des joueurs de football, un TTS plus faible, la nuit après un match joué en soirée, comparé à celui enregistré après un match ayant lieu en journée.

Le sommeil de l'athlète de haut niveau peut être influencé par de nombreux facteurs, notamment sociaux, parmi lesquels on peut citer l'obligation de réussite pour lui-même, son club, son pays, ses sponsors, son entraîneur, ses dirigeants, les médecins et l'entourage paramédical, les médias, sa famille et le public. Puis, on peut mentionner les facteurs liés au mode de vie (déplacements fréquents, décalage horaire) pouvant s'accompagner de problèmes psychologiques, liés à la séparation de ses proches par exemple. À ces facteurs s'ajoutent ceux liés à la compétition elle-même, avec l'augmentation du stress engendré par l'enjeu de réussite, la crainte de l'accident ou de la blessure, et/ou la peur de la souffrance. L'ensemble de ces facteurs, auxquels sont confrontés les athlètes de haut niveau [résumés sur la Figure 9 selon le modèle de Walsh et al. (2020)], peuvent, aussi, refléter les variations des résultats, rapportés par les différentes études. Cependant, Nedelec *et al.* (2018) souligne l'importance de bien définir ce qu'est un athlète de haut niveau, dans sa propre discipline sportive. Les résultats de la littérature sont, en effet, difficilement comparables, selon qu'il s'agit d'un sportif professionnel, amateur, de niveau national ou international. De même, les résultats peuvent varier selon la discipline pratiquée, en journée ou en soirée, qu'elle soit de type aérobie, ou anaérobie, individuelle ou collective, et enfin « indoor » ou « outdoor ». Toutes ces spécificités sont susceptibles d'impacter le sommeil subséquent.

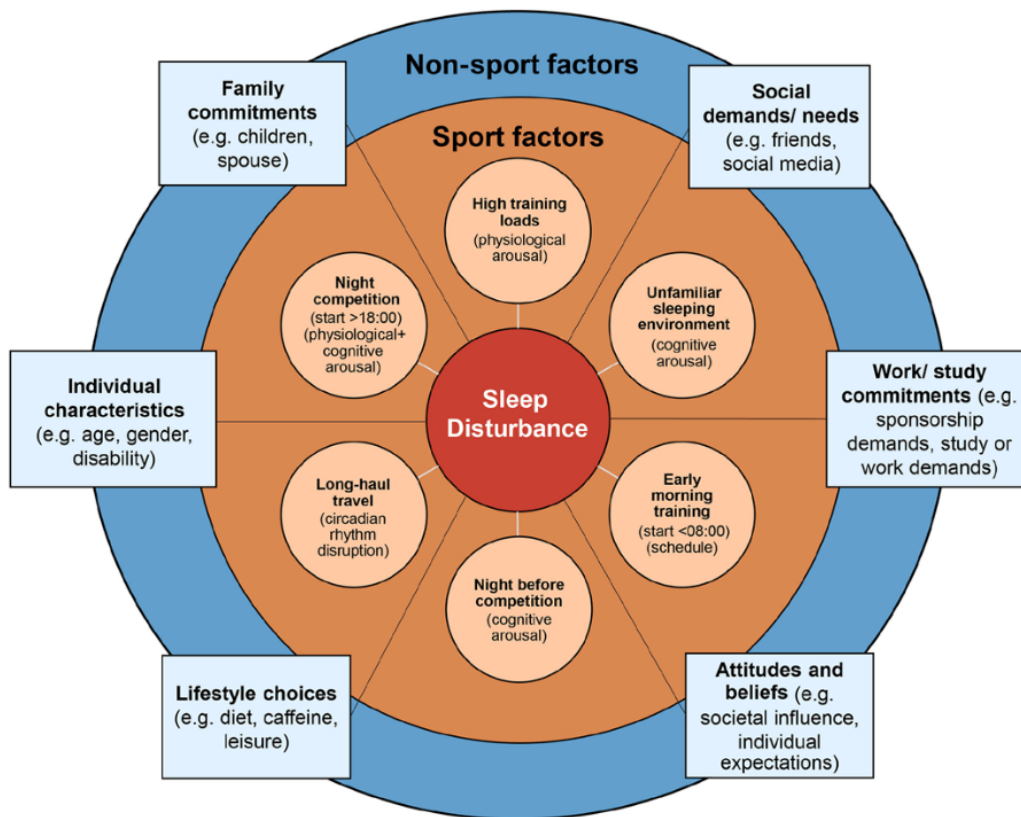


Figure 9 : Facteurs à l'origine de perturbations du sommeil chez les athlètes de haut niveau.

D'après Walsh et al. (2020).

En marron : facteurs spécifiques au sport de haut niveau.

En bleu : facteurs « non-spécifiques » au sport de haut niveau.

ÉVALUATION DU SOMMEIL

L'exploration du sommeil se fait à l'aide d'une polysomnographie (PSG), une technique objective qui représente le « gold standard ». Le sommeil peut être aussi évalué par actimétrie, une technique dite semi-objective. Enfin, il peut être suivi, mais de façon subjective, grâce à des questionnaires, échelles et agenda du sommeil.

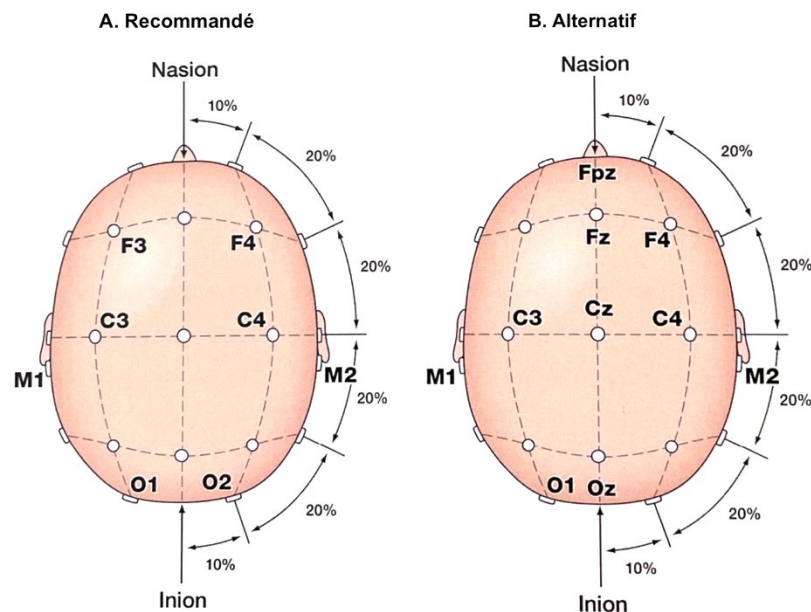
Si la PSG est l'examen de référence qui permet de surveiller et d'enregistrer plusieurs données physiologiques pendant le sommeil, elle présente toutefois, des inconvénients, ce qui n'en fait pas l'outil privilégié dans le milieu sportif. Au-delà du coût important, elle nécessite du personnel qualifié à la pose et à l'analyse de l'enregistrement. Les contraintes et le désagrément de l'enregistrement ne permettent donc pas l'enregistrement du sommeil avant des compétitions importantes ou de manière courante. L'encadrement sportif est demandeur d'alternatives afin d'évaluer et de suivre le sommeil pour optimiser les processus de récupération des athlètes, c'est pourquoi de nouveaux dispositifs se sont développés au cours de ces dernières décennies. Nous décrivons dans cette partie les principaux outils et méthodes d'évaluation du sommeil pour mieux comprendre leurs intérêts et leurs limites, afin de choisir le bon outil en fonction de l'objectif recherché.

1. La polysomnographie

Cet examen se déroule habituellement en milieu hospitalier, en laboratoire de sommeil, mais il peut aussi être pratiqué, dans certains cas en ambulatoire, au domicile, sans hospitalisation. Ce dernier type d'enregistrement est particulièrement intéressant pour une population sportive, car il permet de suivre, de façon optimale le sommeil dans diverses situations écologiques, à domicile ou à l'occasion de déplacements, tout en respectant au maximum les conditions réelles de vie du sujet. Le nombre et la nature des données enregistrées par la PSG sont variables selon l'objectif de l'examen et/ou de la pathologie suspectée, mais comprennent habituellement selon les recommandations de bonnes pratiques de « l'American Academy of Sleep Medicine » (AASM, Berry *et al.* 2020) :

- L'électroencéphalogramme (EEG) qui consiste à mesurer l'activité électrique du cerveau par des électrodes placées sur le cuir chevelu selon le système international 10-20 (Figures 10 A et B). Les dérivation F4-M1, C4-M1, O2-M1 sont recommandées. Les électrodes « de secours » doivent être placées en F3, C3, O1 et M2 pour permettre

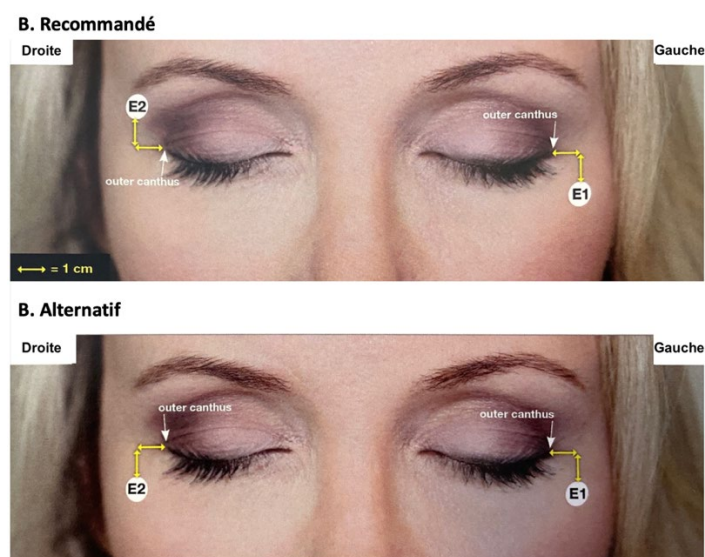
d'afficher F3-M2, C3-M2, O1-M2 en cas de dysfonctionnement des électrodes principales
 L'analyse EEG permet de distinguer les stades du sommeil.



Figures 10 A et B : Images illustrant le positionnement des électrodes utilisées sur les dérivations recommandés (A) et alternatives (B) pour l'enregistrement de l'électroencéphalogramme (EEG) au cours d'une polysomnographie.

Le positionnement des électrodes et leur nomenclature suivent le système international 10-20.

- L'électrooculogramme (EOG) consiste à enregistrer les mouvements oculaires. Selon les recommandations, l'électrode E1 est placée à 1 cm au-dessous du canthus externe de l'œil gauche des paupières et E2 est placée 1 cm au-dessus du canthus externe de l'œil droit (Figures 11 A et B). L'EOG permet aussi de classer les stades de sommeil.



Figures 11 A et B : Dérivations recommandées (A) et dérivations alternatives (B) pour l'électro-oculogramme (EOG).

- L'électromyogramme (EMG) enregistre l'activité électrique musculaire, 3 électrodes doivent être installées pour enregistrer l'EMG mentonnier : une sur la ligne médiane à 1 cm au-dessus du bord inférieur de la mandibule (ChinZ), Une à 2 cm sous le bord inférieur de la mandibule et à 2 cm à droite de la ligne médiane (Chin2) et une à 2 cm sous le bord inférieur de la mandibule et à 2 cm à gauche de la ligne médiane (Chin1 ; Figure 12)

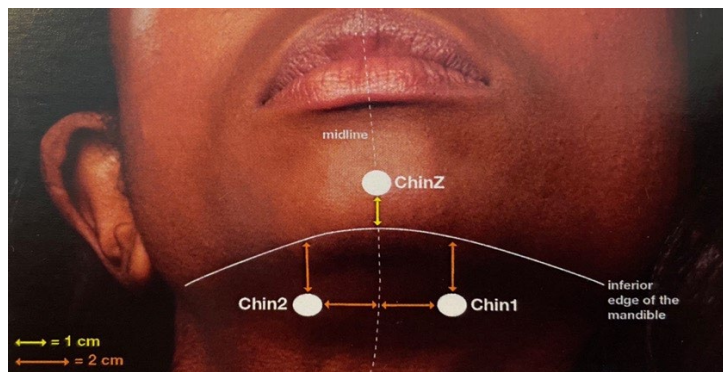


Figure 12 : Positionnement des électrodes sur le menton pour l'enregistrement de l'électromyogramme (EMG).

- En cas de recherche d'une pathologie précise, il est possible d'enregistrer l'activité musculaire au niveau des jambiers antérieurs. Elle s'effectue grâce à des électrodes de surface placées de façon longitudinale et symétrique au milieu du muscle tibial antérieur espacées de 2 à 3 cm, ou au 1/3 de la longueur du muscle (Figure 13). Les deux jambes doivent être enregistrées afin de détecter les mouvements. Cet enregistrement permet de diagnostiquer les mouvements périodiques des membres inférieurs ou syndrome des jambes sans repos (SJSR ou « Restless Leg Syndrom » en anglais).

-

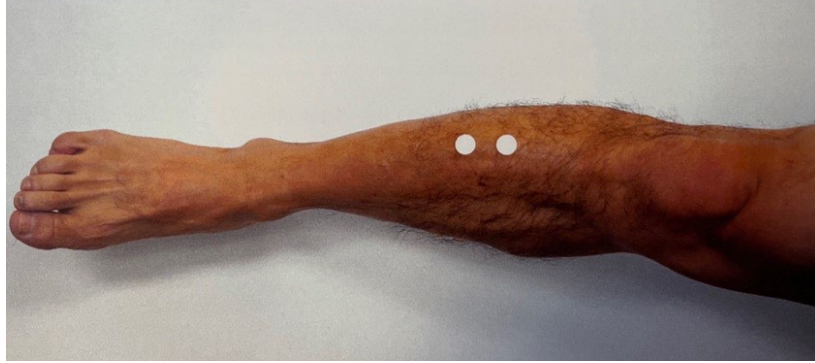


Figure 13: Positionnement des électrodes sur le muscle tibial antérieur pour l'enregistrement des mouvements des jambes.

- D'autres paramètres cardiorespiratoires peuvent aussi être enregistrés : le débit respiratoire, par l'intermédiaire d'un pneumotachographe (moins utilisé en routine) ainsi que les efforts respiratoires par des sangles thoraco-abdominales à jauge de contrainte. Ces enregistrements sont complétés par la mesure de la saturation pulsée en oxygène (SpO_2) grâce à un oxymètre de pouls. Ces paramètres permettent de caractériser la respiration au cours des différents stades du sommeil, d'identifier des événements respiratoires et de diagnostiquer un syndrome d'apnées/hypopnées du sommeil. À ceci s'ajoute l'électrocardiogramme (ECG) qui permet d'enregistrer l'activité cardiaque, grâce à des électrodes placées sur la poitrine de part et d'autre du cœur, l'objectif étant de suivre le rythme cardiaque et/ou de déterminer la présence de perturbations du rythme associées à des troubles respiratoires.

L'ensemble des électrodes et des autres capteurs est relié à un boîtier amplificateur avec une fréquence d'échantillonnage minimale de 500 Hz pour l'EEG, l'EMG et l'ECG et l'EOG. Une fois l'enregistrement effectué, celui-ci est filtré puis analysé grâce à un logiciel spécifique par époque séquentielle selon des intervalles de 30 secondes. L'expérimentateur

analyse manuellement l'enregistrement en visualisant les signaux EEG, EOG et EMG mentonniers de chaque page d'une durée de 30 secondes, en scorant les micro-éveils ou éveils courts, d'une durée entre 3 et 15 secondes l'éveil, ou le sommeil N1, N2, N3 ou R, et si le sujet est équipé d'un EMG jambier, les mouvements de jambes, correspondant à une activité sur les jambiers antérieurs d'une durée entre 0,5 à 10 secondes. Enfin, si le sujet est équipé de capteurs respiratoires, les évènements associés sont aussi scorés.

À noter qu'au cours de ces dernières années, de nombreuses solutions de traitement automatique des données ont vu le jour. En dépit d'une amélioration de la précision (pouvant atteindre 85 %) pour identifier les stades du sommeil, ce traitement est encore perfectible et peu utilisé en pratique clinique (Chriskos *et al.* 2021). C'est pourquoi une analyse automatique, avec un contrôle humain, est très souvent préférée pour l'interprétation des résultats.

Les paramètres du sommeil recueillis sont l'heure du coucher, l'heure d'endormissement, la latence d'endormissement (temps entre l'extinction de la lumière jusqu'au stade de sommeil N1), le temps passé au lit (TPL), le temps total de sommeil (TTS), l'heure du lever, l'efficacité du sommeil ($TTS / TPL * 100 ; \%$), le nombre d'éveils, le nombre de micro-éveils (< 15 s), le temps d'éveil après endormissement (TEE) ou « Wake After Sleep Onset » (WASO), le temps de sommeil passé en stade N1, N2, N3 et R, le pourcentage en stade N1, N2, N3 et R par rapport au TTS, la latence des stades N1, N2, N3 et R (temps entre l'extinction de la lumière jusqu'au stade de sommeil considéré) et la qualité du sommeil [$\text{sommeil (N3 + REM) / TTS} \times 100 ; \%$].

A partir de ces données, un hypnogramme est obtenu ; il reflète le déroulement temporel des stades, à l'intérieur de chaque cycle de sommeil. Sont aussi représentés les micro-éveils et les phases de réveil. Cet hypnogramme montre le nombre et la structure de chaque cycle du sommeil qui définit son architecture, normale ou pathologique.

Au cours de ce travail de thèse, le système Morpheus de la société française Micromed a principalement été utilisé (Figure 14). D'autres dispositifs de PSG ambulatoire plus compacts comme le système Nox A1 sont commercialisés par la société Nox Medical Global (Reykjavík, Islande). Qu'il s'agisse d'un polysomnographe utilisé en laboratoire ou à domicile, ce sont dans tous les cas des appareils onéreux et l'expérimentateur doit être

formé à la pose et à l'analyse des données. Pour ces raisons, et compte tenu des contraintes, peu d'études, consacrées au sommeil des sportifs de haut niveau, utilisent ces dispositifs.

L'installation de l'appareillage sur le sujet dure entre 30 et 60 minutes en fonction des paramètres retenus.

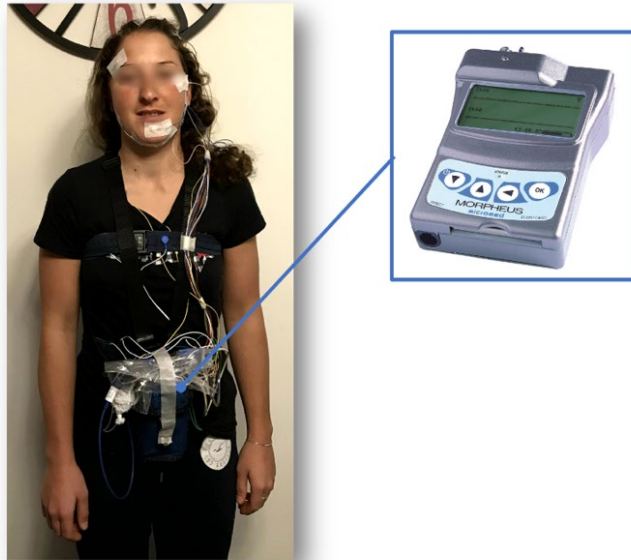


Figure 14 : Sujet équipé d'un système PSG Morpheus (Micromed SAS, France).

2. L'actimétrie

L'actimétrie est la méthode de mesure privilégiée pour évaluer de manière objective le rythme activité-inactivité. Elle est, à l'heure actuelle, très utilisée dans le milieu sportif (Vlahoyiannis *et al.* 2020). L'outil utilisé est un actimètre, un petit appareil de la taille d'une montre qui se porte le plus souvent au poignet non dominant. Il en existe de nombreux modèles, les plus courants sont les ActiGraph XGT3X-BT ou GT9X de ActiGraph® (Pensacola, USA), les Actiwatch de Philips Respironics (Bend, USA) ou encore les MotionWatch de CamNtech, (Cambridgeshire, UK). Ils sont tous basés sur le même principe, c'est-à-dire, sur l'utilisation d'un accéléromètre biaxial (2D) ou triaxial (3D) avec à l'intérieur une cellule piézo-électrique permettant de détecter des mouvements. Les impulsions engendrées par une accélération au-dessus d'un certain seuil sont stockées dans un micro-processeur. Elles sont comptabilisées par unité de temps, habituellement de 10 secondes à 1 minute. La durée possible de l'enregistrement dépend de la capacité de mémoire de l'appareil et de la fréquence de l'échantillonnage. Elle s'échelonne de quelques jours à plusieurs mois. Grâce à

l'application d'un algorithme spécifique, on peut visualiser l'alternance de l'activité des jours et des nuits et donc avoir une bonne représentation du rythme veille-sommeil et de la qualité de la nuit. L'estimation des périodes de sommeil s'appuie sur le fait que généralement peu de mouvements se produisent durant le sommeil. L'actimétrie traduit ainsi les périodes de très faible activité comme étant du sommeil. Elle permet le recueil de plusieurs variables du sommeil : l'heure d'endormissement, la latence d'endormissement, le TPL, le TTS, l'heure du lever, l'efficacité du sommeil ($TTS / TPL \times 100$; %) et le TEE.

Les actimètres ont, par ailleurs, tous un fonctionnement similaire, mais les algorithmes pour déterminer les périodes de sommeil sont différents et sont généralement validés pour une population définie. L'algorithme Cole-Kripke pour l'actimètre ActiGraph (ActiGraph®, Pensacola, FL, USA) a été développé et validé, pour une population d'adultes (35 à 65 ans), avec une correspondance de 88 % dans l'identification des périodes de sommeil, par comparaison à un enregistrement polysomnographique (Cole *et al.* 1992). L'algorithme Sadeh, utilisé pour le même actimètre, a été validé, dans une population d'adolescents (10 à 16 ans), avec une correspondance de 92 % et pour une population de jeunes adultes (20 à 25 ans) avec une correspondance de 91 %, par comparaison à un enregistrement PSG (Sadeh *et al.* 1994).

D'autres études ont ensuite appliqué le principe de sensibilité et de spécificité. La sensibilité reflète la capacité de l'actimètre à détecter du sommeil alors que la spécificité correspond à la capacité de l'actimètre à détecter de l'éveil, en comparaison avec les données de la PSG qui représente le « gold standard ».

De Souza *et al.* (2003) ont montré, chez 21 sujets volontaires en bonne santé, une bonne sensibilité des algorithmes, soit de 99 % pour celui de Cole-Kripke et 97 % pour celui de Sadeh, mais ont observé une faible spécificité, soit de 34 % et 44 % respectivement. Ainsi, une surestimation de la latence d'endormissement (+ 1,3 min et + 2,4 min), du TTS (+ 18,5 min et +8,1min), de l'efficacité du sommeil (+ 4,2 % et + 2,2 %) et une sous-estimation des périodes d'éveils (-18,6 min et -10 min) ont été rapportées pour ces deux algorithmes. Quante *et al.* (2018) ont comparé, à un enregistrement par PSG, auprès de 9 adultes ($32,3 \pm 11,4$ ans), les données obtenues par l'ActiGraph GT3X+ *via* l'analyse de l'algorithme Cole Kripke ou Sadeh et l'Actiwatch Spectrum (Philips Respironics, Bend, USA), paramétré à une sensibilité moyenne, et n'ont observé aucune différence des paramètres du sommeil : TTS,

TEE et SE. Ces mêmes résultats ont été observés par Marino *et al.* (2013) avec l'utilisation de l'algorithme Cole-Kripke pour l'actimètre AW-64 (Minimitter, Inc, Bend, OR) et l'Actiwatch Spectrum (Philips Respironics, Bend, USA) par comparaison aux données obtenues par PSG.

Bien que l'actimètre soit moins précis pour des sujets ayant un sommeil court ou fragmenté (Mullaney *et al.* 1980 ; Kushida *et al.* 2001 ; Paquet *et al.* 2007), il a toutefois été validé pour estimer le TTS, l'efficacité de sommeil et le TEE. Si ce matériel ne permet pas de distinguer les différents stades de sommeil au cours de la nuit, il présente l'avantage d'être facilement utilisable sur une longue période (de 1 jour à 1 mois) et permet de suivre, avec une assez bonne précision, le rythme veille-sommeil, à condition que l'heure du coucher soit bien indiquée (De Souza *et al.* 2003 ; Marino *et al.* 2013 ; Quante *et al.* 2018).

L'enregistrement se fait en ambulatoire, mais il doit être complété par un agenda du sommeil pour apporter des informations supplémentaires notamment la latence d'endormissement et pour éviter de scorer des périodes de sommeil avant le coucher alors que le sujet est encore en état d'éveil.

3. L'agenda du sommeil

Contrairement à la polysomnographie et à l'actimétrie, l'agenda du sommeil (Bastuji et Jouvét 1985) permet de suivre, subjectivement, le rythme veille-sommeil. L'agenda est couramment utilisé en pratique clinique, avant même de proposer un enregistrement nocturne en laboratoire ou en ambulatoire. Il s'agit d'une grille que le sujet doit remplir chaque jour avec différentes informations comme l'heure du coucher, l'heure du lever, les périodes de sommeil, une appréciation sur la nuit, etc. L'agenda du sommeil permet ainsi de recueillir, durant une période prolongée de plusieurs jours à plusieurs semaines, les informations sur le rythme veille-sommeil, le sommeil lui-même et les événements qui y sont associés. Il présente l'avantage d'être non invasif et non contraignant pour les sujets (Figure 15). Cependant, en format papier, l'agenda du sommeil nécessite un temps de traitement long puisqu'il se fait manuellement. Jungquist *et al.* (2015) et Tonetti *et al.* (2016) ont montré que l'agenda en format électronique (*via* des applications smartphones) permet

comparé sur 5 nuits, chez 50 adolescents en bonne santé, les résultats obtenus par la montre Fitbit Alta HR (Fitbit, San Francisco, California), par l'actimètre Actiwatch 2 (Philips Respironics, Pittsburgh, Pennsylvania) à ceux d'une PSG (SOMNOmedics GmbH, Randersacker, Germany) et ont montré une sous-estimation du TTS (- 47 et - 38 min respectivement) et une surestimation du TEE (+ 42 et + 38 min respectivement). Par ailleurs, la quantification des stades du sommeil, obtenue par la montre Fitbit, était erronée. Lee et al. (2018) ont confronté les résultats recueillis par un agenda du sommeil à différents dispositifs du commerce (SenseWear Mini armband, Jawbone; Basis Peak, Intel; Fitbit ChargeHR, Fitbit ; Jawbone UP3, Jawbone et Garmin Vivosmart, Garmin), et à l'actimètre ActiGraph (GT9X Link) chez 78 adultes en bonne santé. Certains dispositifs (Jawbone UP3, Fitbit Charge HR et Garmin Vivosmart) présentaient des résultats plus proches de ceux de l'agenda du sommeil que ceux obtenus par l'actimètre. Ainsi, tous les auteurs s'accordent à dire que ces dispositifs grand public peuvent mesurer la durée du sommeil, mais avec les mêmes limites que les actimètres. Il est à noter que de nouveaux dispositifs comprennent d'autres variables physiologiques telles que la fréquence cardiaque ou la température cutanée qui permettent de différencier le sommeil de l'éveil, améliorant ainsi la précision par rapport à celle obtenue par un simple accéléromètre.

Cependant, il convient de choisir, et notamment dans le cadre d'un travail de recherche ou dans un objectif clinique, un dispositif qui permette l'accès et le traitement des données. Généralement l'accès se fait par une interface web qui stocke les données sur le cloud et permet l'export sous un format générique comme .csv où .xls ou en laissant l'accès à une interface de programmation d'application¹ (« Application Programming Interface », API) et au kit de développement logiciel² (« Software Development Kit », SDK) permettant la création d'une solution dédiée. Pour les entraîneurs, les sportifs, l'utilisation de ces dispositifs est facile pour suivre de manière très simple le rythme veille-sommeil et la quantité de sommeil du sportif, même s'ils en connaissent leurs limites.

¹ Solution informatique qui permet à des applications de communiquer entre elles et de s'échanger mutuellement des services ou données. Il s'agit en réalité d'un ensemble de fonctions qui facilitent, *via* un langage de programmation, l'accès aux services d'une application.

² Ensemble d'outils utilisés par les développeurs pour le développement d'un logiciel destiné à une plateforme déterminée (Linux, Windows, Android, etc.)

Pour autant, il est important de rester vigilant quant à l'utilisation de ces outils de « e-santé » qui représentent un enjeu en termes de protection des données et de législation.

5. Évaluation du chronotype, de la somnolence et de la qualité subjective du sommeil.

Connaître le chronotype des athlètes et leur rythme veille-sommeil est important dans leur préparation à des échéances sportives. Cela permet à l'encadrement de l'athlète de lui donner des conseils individuels d'hygiène du sommeil.

5.1 Questionnaire de Horne et Östberg

Le questionnaire de typologie circadienne permet d'évaluer le chronotype du sujet au travers de 19 questions d'auto-évaluation (Horne et Östberg 1976). Il est constitué de questions à choix unique ou d'échelles à plages horaires, scorées entre 0 et 6. La somme des scores permet de définir 5 catégories de chronotype : « tout à fait du matin » (score de 70 à 86), « modérément du matin » (score de 59 à 69), « intermédiaire » (score de 42 à 58), « modérément du soir » (score de 31 à 41) et « tout à fait du soir » (score de 16 à 30).

5.2 Échelle de somnolence d'Epworth

L'échelle de somnolence d'Epworth (« *Epworth Sleepiness Scale* », ESS), créée en 1991 (Johns 1991), est l'outil le plus utilisé pour mesurer subjectivement la somnolence diurne d'un sujet. Elle permet aussi de détecter la présence de troubles du sommeil. Il s'agit d'un questionnaire auto-administré évaluant la chance habituelle de s'assoupir ou de s'endormir dans 8 situations de la vie quotidienne, comme la lecture ou la conduite en voiture. Le sujet évalue son risque de somnoler sur une échelle de Lickert à 4 degrés, de 0 « aucune chance de somnoler ou de s'endormir » à 4 « forte chance de somnoler ». La somme des 8 questions donne un score entre 0 et 24. Un score compris entre 0 et 10 signifie l'absence de somnolence tandis qu'un score compris entre 11 et 24 indique une somnolence excessive (Johns 2009). Du fait de sa simplicité et sa rapidité d'exécution (2 à 5 minutes), ce questionnaire a été traduit dans de nombreuses langues et est très utilisé aussi en clinique.

5.3 Index de qualité du sommeil de Pittsburgh (PSQI)

L'index de qualité du sommeil de Pittsburgh, créé en 1989 (Buysse *et al.* 1989), évalue la qualité du sommeil au travers de 19 questions d'auto-évaluation posées au sujet et 5 questions posées au conjoint ou compagnon de chambre. Les réponses sont basées sur les jours et nuits du mois précédant. Les résultats sont regroupés selon 7 composantes : qualité subjective du sommeil, latence d'endormissement, durée du sommeil, efficacité habituelle du sommeil, troubles du sommeil, utilisation de médicaments et mauvaise forme en journée. Chaque composante est scorée de 0 à 3 et la somme des 7 composantes donne un score global allant de 0 à 21, 0 signifiant aucune difficulté et 21 signifiant des difficultés majeures.

D'autres questionnaires, validés pour une population générale, mais non sportive, sont disponibles pour évaluer subjectivement le sommeil des athlètes.

5.4 « Athlete sleep Screening Questionnaire »

Le questionnaire « Athlete Sleep Screening Questionnaire » (ASSQ), développé par une équipe canadienne, a été validé pour une population d'athlètes de haut niveau (Samuels *et al.* 2016). Il a été conçu comme un outil clinique de dépistage du sommeil, permettant de déceler des perturbations du sommeil, des dysfonctionnements diurnes et de proposer des interventions selon le type et la gravité du problème diagnostiqué. Ce questionnaire comporte 16 questions à choix multiples afin d'évaluer, sur une période récente, les facteurs liés au sommeil et aux rythmes circadiens. La quantité et la qualité du sommeil ainsi que l'insomnie sont étudiées au moyen de 5 questions, donnant un score allant de 0 à 17, et classant ainsi les athlètes selon différents niveaux : aucune perturbation (score de 0 à 4), perturbations légères (score de 5 à 7), perturbations modérées (score de 8 à 10) et perturbations sévères (score de 11 à 17). Ces catégories permettent ainsi de fournir des recommandations différentes, allant de simples recommandations d'hygiène de sommeil à une évaluation plus précise des troubles du sommeil par un médecin spécialisé. Par ce questionnaire, le chronotype est aussi évalué au moyen de 4 questions ; le score obtenu indique uniquement si le chronotype du sportif est « du soir ». En effet, il faut être vigilant avec ces sujets, car ils sont peu en phase avec les rythmes de la société et ces athlètes ont ainsi plus de risques de présenter des troubles du sommeil. À la différence du questionnaire

de Horne et Östberg, ce questionnaire ne permet pas de déterminer d'autres types de chronotype.

Dans ce questionnaire, les perturbations en situation de déplacement (altération du sommeil et des performances) et les troubles respiratoires du sommeil (ronflements et apnées) sont aussi indiqués. Ces questions ne sont pas scorées mais sont importantes, afin de fournir aux athlètes des recommandations spécifiques en matière d'éducation et d'intervention. Ce questionnaire a fait l'objet d'une validation clinique auprès de 46 athlètes d'équipes nationales canadiennes de différents sports. Il a été rapporté une sensibilité de 81% et une excellente spécificité de 93% par comparaison à une évaluation du sommeil, réalisée par un médecin du sommeil (Bender *et al.* 2018)

6. Nouveaux dispositifs

Constatant un intérêt croissant par le grand public pour le sommeil et grâce aux progrès technologiques, de nombreux industriels ont développé de nouveaux dispositifs permettant l'étude objective du sommeil, tout en permettant une évaluation plus précise que la simple mesure du mouvement par accéléromètre. Ces dispositifs suscitent aussi un certain enthousiasme chez les entraîneurs et les sportifs, car ils sont moins contraignants qu'une PSG, « prétendent » mesurer la qualité du sommeil et permettent des feedbacks quotidiens sur la nuit de sommeil. De plus, ils ne nécessitent aucune expertise particulière car l'analyse du sommeil se fait de manière automatique. De ce fait, il nous paraît utile de s'intéresser à certains de ces dispositifs, qui potentiellement permettraient une étude facilitée du sommeil.

6.1 Dispositif Dreem

Le dispositif Dreem (Figure 16 ; Dreem SAS, Paris, France) est un bandeau sans fil, enregistrant en temps réel, 5 types de signaux physiologiques *via* 3 types de capteurs : l'activité corticale cérébrale par 5 électrodes sèches (FpZ - O1, FpZ - O2, FpZ - F7, F8 - F7, F7 - O1, F8 - O2, FpZ - F8) à une fréquence d'échantillonnage de 250Hz avec un filtre passe-bande de 0,4 - 35Hz, les mouvements, la position du sujet et la fréquence respiratoire *via* un accéléromètre 3D situé au-dessus de la tête et enfin la fréquence cardiaque grâce à un oxymètre de pouls infrarouge, situé dans la bande frontale. Les signaux sont enregistrés, stockés et automatiquement analysés pour explorer le sommeil. Après un enregistrement, le

dispositif est connecté par Bluetooth, à une application mobile dédiée (sur smartphone ou tablette), permettant la transmission des données par Wi-Fi sur les serveurs du fabricant.

À ce jour, et à notre connaissance, seuls Arnal et al. (2020) ont comparé, chez 25 sujets entre 18 et 65 ans, ne présentant pas de trouble du sommeil, les données d'un enregistrement simultané, obtenues par PSG, scorées par 5 experts, à celles recueillies par une analyse automatique du bandeau Dreem. L'analyse automatique de ce bandeau atteint une précision globale de $83,5 \pm 6,4$ % contre une moyenne de $86,4 \pm 8,0$ % pour le scoring manuel de l'enregistrement PSG. Ces résultats semblent montrer la capacité du bandeau à enregistrer les signaux physiologiques du sommeil et à déterminer les stades du sommeil. Toutefois, cette étude de validation présente un conflit d'intérêt puisque la majeure partie des auteurs fait partie de l'entreprise Dreem (équipe scientifique et équipe en charge de l'algorithme d'analyse du sommeil). Pour autant, ces auteurs suggèrent que ce dispositif ouvre la voie à des études longitudinales à grande échelle, pour l'exploration du sommeil.



Figure 16 : Bandeau Dreem (Dreem SAS, Paris, France).

6.2 Dispositif Somno-Art

Le dispositif Somno-Art (PPRS, Colmar, France) est un dispositif CE médical (classe IIa), se portant à l'avant-bras avec un brassard textile, contenant le boîtier d'enregistrement. Il enregistre l'onde de pouls par pléthysmographie (1 Hz) afin de déterminer la fréquence cardiaque et les mouvements par un accéléromètre triaxial (256 Hz ; Figure 17). Une fois l'enregistrement effectué, les données sont transférées sur un ordinateur et envoyées à un serveur, afin d'effectuer l'analyse automatique par un algorithme. Cet algorithme, développé par M. Muzet a fait l'objet d'une étude en couplant un ECG (CardioMem CM3000, Getemed, Teltow, Germany) afin d'obtenir la FC et un actimètre Actisleep+, Actigraph LLC,

Pensacola, USA) en comparaison à un enregistrement par PSG sur 42 nuits (Muzet et al. 2016). Une précision moyenne de 74% sur l'identification des stades de sommeil a été obtenue par cet algorithme. Bien que les résultats de cette étude semblent prometteur, à ce jour, aucune étude n'a validé le dispositif Somno-Art.



Figure 17 : Brassard Somno-Art (PPRS, Colmar, France).

Comme nous l'avons évoqué plus haut, nous devons rester vigilants, quant à l'utilisation de ces nouveaux outils de « e-santé » qui représentent un enjeu en termes de protection des données personnelles et de législation.

DECALAGE HORAIRE

CHEZ LE SPORTIF DE HAUT NIVEAU

Les athlètes de haut niveau sont soumis, de plus en plus fréquemment, à des déplacements internationaux, nécessitant le franchissement de plusieurs fuseaux horaires (Duffield et Fowler 2018), que ce soit pour des compétitions sportives ou des stages d'entraînement, qui peuvent, de surcroît, se dérouler dans des conditions environnementales particulières, comme par exemple, en hypoxie (stage en altitude) ou dans des conditions de chaleur extrême (Kolling *et al.* 2018).

Le décalage horaire ou « Jet Lag » correspond à l'ensemble des effets délétères, se traduisant notamment par un déficit et/ou des troubles du sommeil, une fatigue avec somnolence diurne ainsi que par une diminution des performances et de la vigilance, apparaissant à la suite d'un vol rapide, avec traversée de plusieurs fuseaux horaires, sur un temps très court (American Academy of Sleep Medicine 2014). Ce décalage est la conséquence de deux phénomènes indissociables, à savoir la fatigue provoquée par le voyage, et le dérèglement des rythmes biologiques dont le rythme veille-sommeil, synchronisés sur l'horaire du pays d'origine. Le récent modèle de Janse van Rensburg *et al.* (2020) précise le rôle des facteurs internes (physiques, physiologiques et psychologiques) et externes (horaires des entraînements et compétitions, environnement, nutrition et hydratation), inhérents à ce phénomène, qui agissent directement ou indirectement sur la fatigue liée au vol et le décalage horaire (Figure 18).

Dans cette partie, nous décrivons les effets immédiats d'un vol long-courrier avec traversée de plusieurs fuseaux horaires sur l'architecture et l'organisation du sommeil subséquent, la désynchronisation des rythmes biologiques, et nous abordons l'impact de la direction du vol et du nombre de fuseaux traversés sur le rythme veille-sommeil, les capacités physiques ou les symptômes subjectifs du décalage horaire.

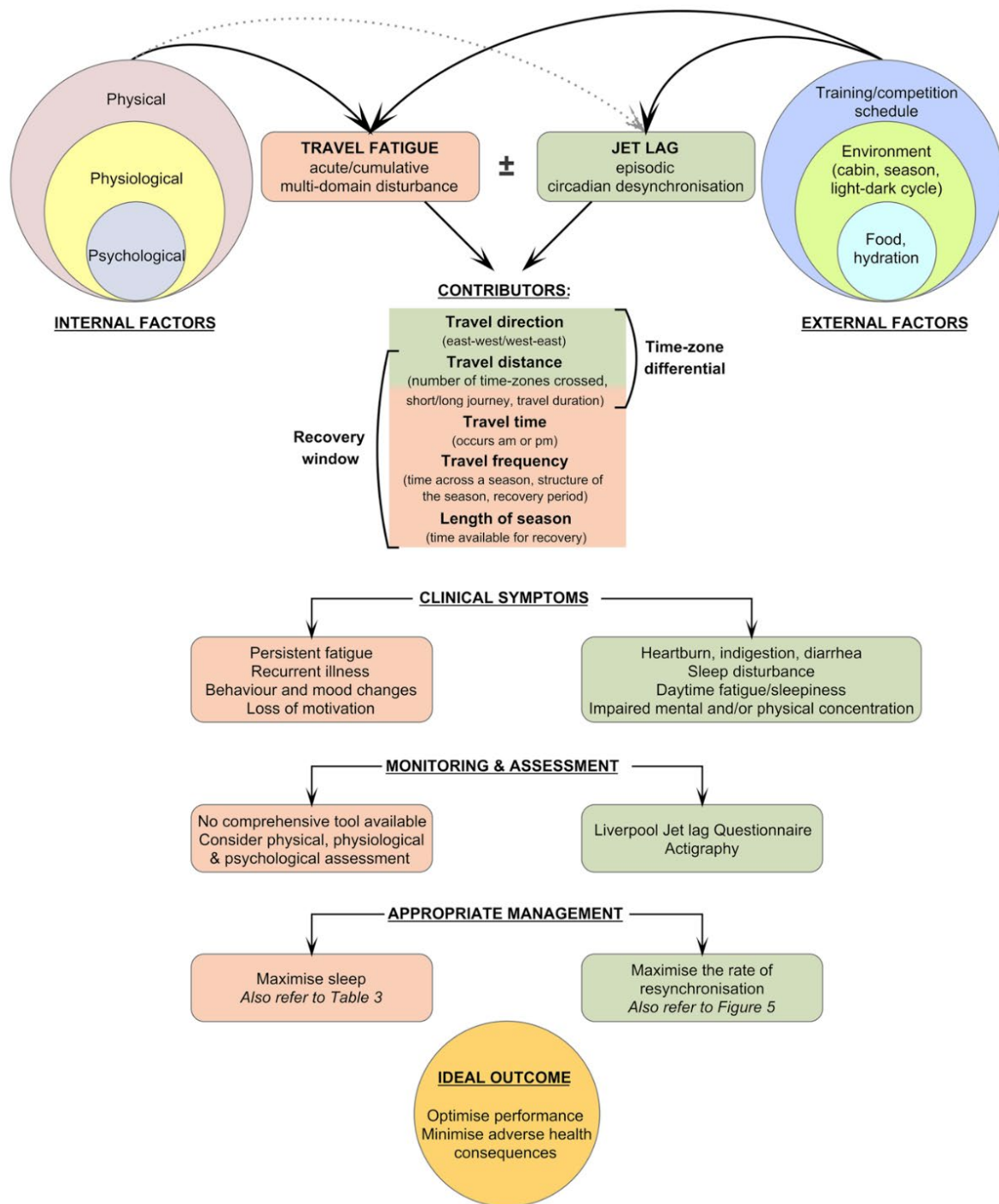


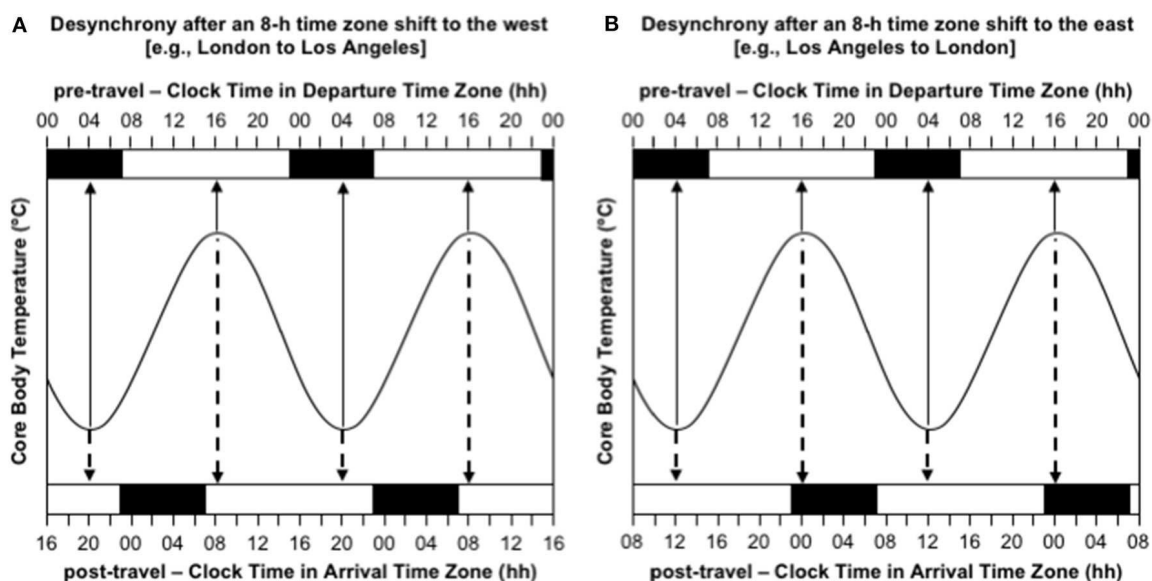
Figure 18 : Modèle multifactoriel de la fatigue due au voyage et du décalage horaire. D'après Janse Van Rensburg et al., (2021).

1. Effets du voyage en avion

Lors d'un voyage en avion, la position assise prolongée, parfois dans des conditions exigües, réduit la mobilité du passager et augmente le risque de thrombose veineuse (Cesarone *et al.* 2003). L'air sec en cabine, la climatisation ainsi que la diminution de la pression partielle en oxygène favorisent non seulement la déshydratation (Hamada *et al.* 2002 ; Reilly *et al.* 2007) mais affaiblissent aussi les défenses immunitaires (Coste *et al.* 2009). Les modifications alimentaires (Reilly *et al.* 2007) et le bruit des moteurs de l'avion et des autres passagers perturbent le sommeil (Waterhouse *et al.* 2002 ; Forbes-Robertson *et al.* 2012). S'ajoutent les formalités du voyage, les retards, l'embarquement ou encore l'enregistrement des bagages entraînant souvent un stress supplémentaire (Reilly *et al.* 2007 ; Waterhouse *et al.* 2007). L'ensemble de ces contraintes s'accompagne d'une augmentation de la fatigue et de plusieurs symptômes comme une irritabilité accrue, des maux de tête, ou encore une lassitude générale liée au voyage (Waterhouse *et al.* 2004). Cette fatigue, dépendant du temps de vol, du nombre d'escales et de la durée totale du voyage, est connue pour être moins importante que celle induite par le décalage horaire lui-même (Reilly *et al.* 2007).

2. Désynchronisation des rythmes circadiens

Après un vol long-courrier, comprenant la traversée rapide d'au moins 3 fuseaux, les rythmes circadiens, synchronisés sur les « zeitgebers » du pays d'origine, sont dans l'incapacité de s'adapter immédiatement à ceux du pays de destination. Cette désynchronisation se traduit par des perturbations du rythme veille-sommeil (Beaumont *et al.* 2004), de la température interne (Reilly *et al.* 2001 ; Lemmer *et al.* 2002 ; Waterhouse *et al.* 2002) et de certains rythmes hormonaux, notamment celui de la mélatonine et du cortisol (Figures 19 A et B; Lemmer *et al.* 2002a ; Bullock *et al.* 2007). La perturbation de ces rythmes circadiens s'accompagne de nombreux symptômes, à savoir : des troubles du sommeil, une fatigue en journée, une irritabilité accrue, une baisse de la vigilance, une mauvaise humeur ou encore des troubles gastro-intestinaux, pouvant nuire à la performance du sportif (Reilly *et al.* 2007 ; Duffield et Fowler 2018).

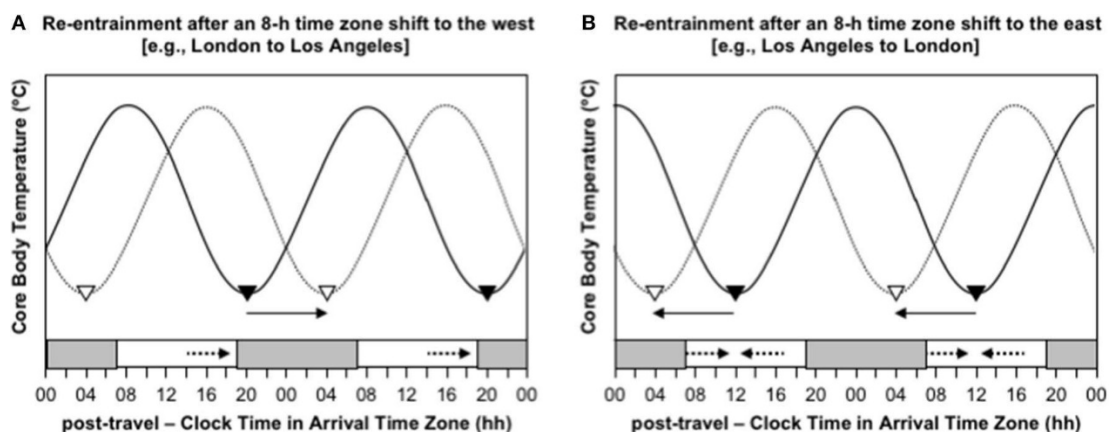


Figures 19 A et B : Désynchronisation entre l'horloge biologique et le rythme veille-sommeil immédiatement après la traversée de 8 fuseaux horaires vers l'Ouest (A) et vers l'Est (B). D'après Roach et al. (2019).

La ligne en forme de sinusoïde représente la température interne ; les flèches pleines indiquent les heures auxquelles la température interne atteint son minimum et maximum dans le fuseau horaire du départ ; les flèches en pointillés indiquent les heures auxquelles la température interne atteint son minimum et maximum dans le fuseau horaire du pays à destination ; les barres noires sur l'axe du haut représentent le sommeil nocturne dans le fuseau horaire de départ ; les barres noires sur l'axe du bas représentent le sommeil nocturne dans le fuseau horaire d'arrivée ; l'ensemble est représenté sur 48h.

(A) Représente une désynchronisation après un décalage horaire de 8 heures vers l'Ouest (i.e. de Londres à Los Angeles). (B) Représente une désynchronisation après un décalage horaire de 8 heures vers l'Est (i.e. de Los Angeles à Londres).

Les « zeitgebers », en particulier, l'alternance lumière/obscurité resynchronisent progressivement l'horloge biologique interne sur le nouveau fuseau horaire (Figures 20 A et B). Bien que le rythme veille-sommeil se resynchronise plus rapidement (2 à 3 jours ; Lee et Galvez 2012), la capacité de resynchronisation des autres rythmes biologiques est estimée entre 30 minutes et 1 h 30 par jour, en fonction des caractéristiques du voyage et des sujets.



Figures 20 A et B : Resynchronisation de l'horloge biologique à l'heure locale après la traversée de 8 fuseaux horaires vers l'Ouest (A) et vers l'Est (B). D'après Roach et al. (2019).

La ligne en forme de sinusoïde avec des triangles inversés noirs représente la température interne et l'heure à laquelle elle atteint son minimum immédiatement après le vol ; la ligne en forme de sinusoïde avec des triangles inversés blancs représente la température interne et l'heure à laquelle elle atteint son minimum après la resynchronisation à l'heure locale. Les barres grises sur l'axe du bas représentent la nuit dans le fuseau horaire d'arrivée ; les flèches pleines représentent le sens de resynchronisation au nouveau fuseau horaire ; les flèches en pointillés représentent le sens de synchronisation (avance ou retard de phase) par l'exposition à la lumière en fonction du moment de la journée ; l'ensemble est représenté sur 48 h.

(A) Représente une resynchronisation après un décalage horaire de 8 heures vers l'Ouest (i.e. de Londres à Los Angeles).

(B) Représente une resynchronisation après un décalage horaire de 8 heures vers l'Est (i.e. de Los Angeles à Londres).

3. Direction du vol et nombre de fuseaux horaires traversés

Les manifestations liées au décalage horaire apparaissent à partir de 3 fuseaux horaires traversés (American Academy of Sleep Medicine 2014) et augmentent avec le nombre de fuseaux traversés (Reilly *et al.* 2007). La direction du vol est également à considérer : un vol vers l'Est, provoquant un retard de phase, est moins bien toléré qu'un vol vers l'Ouest, qui lui entraîne une avance de phase (Eastman *et al.* 1995 ; Forbes-Robertson *et al.* 2012). La principale explication à ce phénomène réside dans le rythme naturel de 24,2 h de notre horloge biologique (Czeisler *et al.* 1999 ; Zhou *et al.* 2011). Il est, par conséquent, plus facile de se resynchroniser en cas d'avance de phase, donc en cas d'allongement de la journée (dans le cas d'un décalage horaire vers l'Ouest) qu'en cas de retard de phase, avec un raccourcissement de la journée (Mitchell *et al.* 1997 ; Eastman et Martin 1999 ; Shanahan *et al.* 1999). Ainsi, il a été confirmé, chez des athlètes, que les effets délétères d'un vol transméridien vers l'Est sur les performances physiques anaérobies et aérobie étaient plus importants que ceux observés après un vol vers l'Ouest (Hill *et al.* 1993 ; Fowler *et al.* 2017a).

4. Caractéristiques des voyageurs

De manière tout à fait logique, les expériences de vols, de par une meilleure gestion du vol, mais aussi une meilleure gestion des horaires de coucher et lever, réduisent les symptômes du décalage horaire et favorisent une resynchronisation plus rapide sur place (Lee et Galvez 2012 ; Duffield et Fowler 2018 ; Bin *et al.* 2019). Par ailleurs, des sujets possédant des habitudes de sommeil plus rigides, présentaient davantage de symptômes de décalage que ceux ayant des habitudes de sommeil plus flexibles (Waterhouse *et al.* 2002 ; Flower *et al.* 2003).

De même, selon le chronotype, caractérisé par un rythme veille-sommeil et des rythmes circadiens (amplitude, nadir et zénith) propres au sujet (Kerkhof et Van Dongen 1996 ; Baehr *et al.* 2000), les effets du décalage horaire peuvent varier. Les sujets dits « du soir », qui souffrent du décalage horaire social (« *social jet lag* »), possèdent un nadir de température interne plus proche de l'heure de l'éveil que les sujets dits « du matin ». Cette différence pourrait expliquer que chez les sujets « du soir », l'état d'alerte soit supérieur au moment du coucher et plus faible à l'éveil, comparés aux sujets « du matin » (Baehr *et al.* 2000). Ainsi, bien que non démontré dans la littérature, les sujets dits « du matin » toléreraient mieux l'avance de phase nécessaire à la suite d'un vol vers l'Est, avec moins de symptômes, que les sujets « du soir ». À l'inverse, les sujets « du soir » pourraient mieux tolérer le retard de phase nécessaire à la resynchronisation suite à un vol vers l'Ouest (Lee et Galvez 2012).

Par ailleurs, le sexe et l'âge des sujets semblent jouer un rôle sur les symptômes liés au décalage horaire, mais ces caractéristiques ne font pas consensus. Si Waterhouse *et al.* (2002) ont montré que les hommes présentaient moins de fatigue que les femmes les jours suivant un vol transméri dien vers l'Est, O'Connor *et al.* (1991) ont, quant à eux, observé des réponses similaires entre des nageurs adolescents masculins et féminins, après le franchissement de 4 fuseaux horaires.

Enfin, avec l'avancée en âge, les rythmes circadiens deviennent moins réguliers et leur amplitude diminue. L'affaiblissement de la structure circadienne avec l'âge et l'altération de la relation entre les « *pacemakers* » responsables des rythmes circadiens pourraient expliquer une plus grande difficulté des personnes âgées à se resynchroniser,

après un décalage horaire. Moline *et al.* (1992) avaient d'ailleurs déjà montré, après une simulation d'un décalage horaire de 6 heures vers l'Est, des symptômes plus importants chez des sujets de 37 à 52 ans que chez des sujets de 18 à 25 ans.

5. Vol transmériidien et sportif de haut niveau

Le trafic aérien ne cessant de croître, il est tout à fait normal que de nombreuses études se soient intéressées aux conséquences d'un vol transmériidien effectué, dans le cadre de voyages professionnels, touristiques ou chez le personnel navigant. Pour autant, celles consacrées aux sportifs de haut niveau nous intéressent tout particulièrement ici.

5.1 Expérimentations en décalage horaire simulé

Afin de faciliter la standardisation des protocoles expérimentaux, plusieurs études ont proposé des décalages horaires simulés en condition de laboratoire. C'est le cas de plusieurs collègues de notre équipe de recherche (Petit *et al.* 2014), qui ont évalué pendant 2 nuits, l'impact d'une avance de phase de 5 heures, sur le sommeil, évalué par PSG, et sur les performances physiques anaérobies et cognitives subséquentes. Les résultats de cette étude ont montré que durant les deux nuits, au cours desquelles le sommeil était avancé de 5 heures, la latence d'endormissement, le TTS, le temps total passé en N2, en R, et l'efficacité de sommeil étaient significativement réduits, tandis que le temps passé en N3 et la qualité du sommeil n'étaient pas altérés, comparés aux données enregistrées lors d'une nuit de référence. De plus, l'acrophase et la batyphase de la température interne étaient avancées de 3 heures. En revanche, cette condition de décalage horaire simulé, en dépit d'une dette de sommeil, n'a pas altéré les réponses à l'exercice physique anaérobie et aux tests psychomoteurs. Les auteurs ont suggéré que (i) l'adaptation rapide des athlètes à leur nouveau rythme, (ii) la resynchronisation rapide de la température interne, bien qu'incomplète (3 h sur les 5 heures de décalage), et (iii) l'effet homéostatique plus important que l'effet circadien, pouvaient expliquer l'absence d'altération des performances psychomotrices et physiques. Il a donc été émis l'hypothèse, qu'en l'absence des symptômes délétères liés au décalage, le simple décalage de phase n'a pas provoqué de fatigue supplémentaire, qui auraient pu être sources de contre-performance.

D'autres auteurs, comme Fowler *et al.* (2014a) ont évalué les performances d'athlètes lors d'un décalage de phase simulé en laboratoire. Ces auteurs ont étudié les

effets d'un voyage simulé, de l'Australie à l'Angleterre comprenant 24 h de vol et 9 h de décalage horaire vers l'Ouest, sur les performances physiques, par un test de performance maximale aérobie et un *counter movement jump* (CMJ) d'une part, et sur le sommeil, évalué par actimètre d'autre part. L'hypoxie légère, la disposition des sièges, les habitudes d'activité et de sommeil, généralement rencontrées lors d'un voyage en avion, étaient dans cette étude reproduites dans une chambre hypoxique normobarique. Les performances physiques aérobies ont été réduites alors que celles obtenues au CMJ n'étaient pas altérées. La quantité de sommeil était diminuée en moyenne de 4 h pendant le vol, avec une moindre efficacité du sommeil, alors que le temps total de sommeil avait augmenté de plus de 5 h la première nuit qui s'apparentait à celle correspondant à destination, et ce, par comparaison aux résultats observés dans un groupe contrôle sans décalage horaire. Les auteurs ont suggéré que la baisse des performances était surtout due à une perturbation du sommeil et à l'exacerbation des marqueurs physiologiques (saturation en oxygène, densité urinaire, cortisol salivaire) et perceptifs de la fatigue.

Bien que ces études, conduites en laboratoire, permettent de mieux comprendre les réponses chronobiologiques de l'organisme au décalage horaire, elles présentent des biais méthodologiques, puisqu'elles ne prennent pas en compte les symptômes du décalage et surtout, elles ne reflètent pas les conditions réelles d'un vol, ni les conditions d'une compétition, au cours de laquelle les facteurs de stress peuvent se surajouter aux effets délétères du décalage.

5.2 Expérimentations en décalage horaire réel

Les expérimentations en condition écologique sont limitées en raison des problèmes logistiques et de coûts qu'elles impliquent (Duffield et Fowler 2018). De plus, le recrutement des sujets, de surcroît des sportifs de haut niveau, est complexe, ces athlètes étant soumis à des situations de stress intense à l'approche d'évènements majeurs, rendant ainsi encore plus difficile leur participation et leur investissement.

5.2.1. Effets sur le rythme veille-sommeil

Les troubles du sommeil représentent les problèmes les plus couramment rapportés à la suite d'un vol transmériidien. Un coucher plus précoce les premières nuits faisant suite

au vol et ce, quelle que soit la direction, a été constaté dans plusieurs études (Fowler *et al.* 2016 ; Kölling *et al.* 2017 ; Rossiter *et al.* 2021). De par la désynchronisation des rythmes circadiens, il semblerait logique de constater une diminution du temps total de sommeil au cours des nuits suivant le vol long-courrier traversant plusieurs fuseaux horaires. Cependant, cette diminution n'est que très rarement constatée. Seuls, de Fowler *et al.* (2017a), ont rapporté cette baisse la première nuit après un décalage horaire de 8 h vers l'Est. Généralement, le temps de sommeil reste identique les premiers jours suivant le vol (Montaruli *et al.* 2009 ; Fowler *et al.* 2016 ; Fowler *et al.* 2017b) ou augmente même (Kölling *et al.* 2017 ; Rossiter *et al.* 2021). La fatigue et la privation de sommeil, provoquées par les voyages, semblent expliquer la prédominance du processus homéostatique sur le processus circadien lors des premières journées à destination.

5.2.2. Effets sur les performances physiques et cognitives

Les auteurs qui se sont intéressés aux conséquences du « jet lag » sur différentes composantes de la performance physique et cognitive sont nombreux, mais les résultats divergent selon les études. Certains auteurs ont analysé des statistiques de matchs, en sport collectif, joués à domicile et à l'extérieur, après un décalage horaire et ont montré que la baisse des performances observées lors des matchs à l'extérieur était corrélée aux nombres de fuseaux horaires traversés (Bishop 2004 ; Christopher, Winter *et al.* 2009 ; Goumas 2014). Toutefois, ces auteurs concluent, qu'au-delà du décalage horaire, l'absence de supporters sur place, pourrait expliquer en partie les moins bonnes performances (Smith *et al.* 2000).

Par ailleurs, dans d'autres études, la force de préhension, souvent évaluée, comme indicateur de la performance musculaire, de par sa facilité et sa rapidité de mesure (Duffield et Fowler 2018), est abaissée dans les jours suivant un vol transméridien (Edwards *et al.* 2000 ; Reilly *et al.* 2001). En revanche, cette baisse de force de préhension n'a pas été retrouvée par Lagarde *et al.* (2001) et Kraemer *et al.* (2016), chez des sujets peu entraînés.

De même, Lemmer *et al.* (2002) ont comparé, chez des gymnastes Olympiques, le rythme circadien de cette force de préhension après le 1^{er}, 4^{ème}, 6^{ème} et 11^{ème} jour d'un vol international avec franchissement de 6 fuseaux horaires vers l'Ouest ou de 8 fuseaux horaires vers l'Est. Après le vol vers l'Ouest, le nadir de la force était avancé dès le 1^{er} jour, et le pic de force dès le 6^{ème} jour tandis qu'après le vol vers l'Est, aucune variation n'était

rapportée. Selon les auteurs, cette absence de résultat serait expliquée par une grande variabilité interindividuelle et un faible nombre de sujets dans l'étude (6 athlètes).

Par ailleurs, les performances anaérobies alactiques sont aussi très souvent évaluées dans des conditions de décalage. Ce type d'effort, spécifique à certaines pratiques sportives, engendre moins de fatigue physique et sa mesure est rapide. D'ailleurs Bullock *et al.* (2007) et Chapman *et al.* (2012) avaient mesuré, pendant 10 jours, les performances explosives des membres inférieurs d'athlètes de très haut niveau en skeleton, suite à un voyage de 24 h comprenant la traversée de 15 fuseaux horaires vers l'Est (soit 9 fuseaux horaires vers l'Ouest). Une réduction de la vélocité, de la puissance, du temps de vol sur le *drop jump*, du rapport entre temps de contact et temps de vol sur le *squat jump* mais aussi de la vitesse, la puissance et de la hauteur de saut sur le CMJ avaient été observées durant les 2 premiers jours suivant le vol (Chapman *et al.* 2012). Cependant, de manière surprenante, chez ces mêmes athlètes, les performances sur un sprint de 30 m n'avaient pas été altérées (Bullock *et al.* 2007). Kraemer *et al.* (2016) ont aussi observé une baisse de la hauteur de saut sur des *countermovement jump* (CMJ) après 6 h de vol et 3 h de décalage horaire vers l'Ouest. Des résultats similaires ont aussi été retrouvés par Fowler *et al.* (2017), observant d'une réduction du pic de force et de puissance sur le CMJ et des performances sur un sprint de 20 m durant les 3 jours qui suivaient un voyage aller et retour de 21 h avec la traversée de 8 fuseaux horaires. Ces résultats attestent que les fonctions contractiles et neuromusculaires des muscles et *in fine*, les performances explosives en saut, sont sensibles à la désynchronisation et aux vols long-courriers (Chapman *et al.* 2012). Récemment, chez des nageurs internationaux, avant un championnat du monde, aucune baisse de performance sur des squats jumps, sur les CMJ, ni sur les temps au 100 m en natation, n'a été observée, après un vol transméri dien de 8h vers l'Est (Rossiter *et al.* 2021). Il est possible que l'échauffement important des athlètes ait limité les variations circadiennes des paramètres de la performance et que des stratégies différentes de contrôle moteur aient permis de maintenir la hauteur de saut (Reilly and Down 1992 ; Bullock *et al.* 2007).

L'évaluation des performances aérobies étant plus contraignante, elles sont plus rarement étudiées en condition de décalage horaire. O'Connor *et al.* (1991) ont tout de même rapporté une augmentation de la FC lors d'un exercice standardisé en natation à 90% de la performance maximale après un voyage de 12 h comprenant 4 h de décalage horaire vers l'Est. A l'inverse, aucune variation des paramètres physiologiques n'a été rapportée

après le même type de déplacement réalisé dans le sens opposé. Plus tard, Fowler *et al.* (2017) ont aussi démontré une baisse des capacités aérobies (Yo-Yo intermittent de niveau 1), à l'instar d'une réduction du pic de force et de puissance sur le CMJ et des performances sur un sprint de 20 m durant les 3 jours suivant un voyage aller-retour de 21 h avec la traversée de 8 fuseaux horaires. Il est possible que la période d'affutage des athlètes avant la compétition ait contrebalancé la réduction des performances (Rossiter *et al.* 2021).

À notre connaissance, une seule étude a évalué les performances physiques en situation écologique de décalage horaire (Amérique du Nord vers l'Ouest de l'Europe) sur un mouvement de pédalage (Hill *et al.* 1993). Celle-ci a mis en évidence, chez des étudiants nord-américains, une baisse de la puissance maximale sur 5 secondes et de la capacité de travail anaérobie d'un test Wingate lors des deux journées faisant suite au vol, mais les effets néfastes du voyage furent éliminés après 3 à 4 jours sur place.

Ces résultats contrastés peuvent être dus aux contraintes différentes des voyages, telles que la durée, la distance, et le nombre d'escales du voyage et/ou la direction du vol, le créneau horaire des performances et les outils d'évaluation utilisés, pour lesquels la sensibilité peut être différente. S'ajoutent à cela les variations interindividuelles des réponses de l'organisme, la durée et la direction des voyages transmériidiens, mais aussi certaines caractéristiques, comme l'âge, le chronotype ou les expériences antérieures au décalage (Waterhouse *et al.* 2002). Ces particularités rendent difficiles la comparaison entre les études (Duffield et Fowler 2018).

En plus des composantes physiques, la pratique du sport de haut niveau nécessite la pleine possession de ses fonctions cognitives afin de limiter les erreurs, et d'être capable de réagir rapidement à une situation imprévue, de traiter rapidement l'information, etc. La vigilance, l'attention sélective ou encore les fonctions exécutives sont d'ailleurs très sensibles à la privation de sommeil (Åkerstedt 2007 ; Reid *et al.* 2011 ; Wright *et al.* 2012) et aux fluctuations circadiennes (Dijk *et al.* 1992 ; Darwent *et al.* 2010 ; Matthews *et al.* 2010). De ce fait, le phénomène de décalage horaire est responsable d'une altération des performances cognitives chez le sportif de haut niveau (Waterhouse *et al.* 2007 ; Lee et Galvez 2012 ; Roach et Sargent 2019). Toutefois, il est important de mentionner que les performances cognitives n'ont jamais été mesurées de manière objective en condition écologique, suite à un vol long-courrier avec traversée de plusieurs fuseaux horaires.

5.2.3. Symptômes subjectifs du décalage horaire

Les études, en situation écologique ont, pour la majeure partie d'entre elles, mesuré les réponses subjectives du décalage horaire *via* principalement le "Liverpool John Moore's University jet-lag questionnaire". Ce dernier évalue les symptômes du décalage horaire, selon différentes composantes, à différents moments de la journée : le décalage horaire, le sommeil, l'appétit, la fatigue, les performances mentales, l'humeur et l'activité intestinale. Ce questionnaire comprend des échelles visuelles analogiques comportant chacune une ligne divisée en 10 items dont le centre est indiqué par le chiffre 0 (sensation « normale ») et les extrêmes par le chiffre +5 (sensation « beaucoup moins que la normale ») ou -5 (sensation « beaucoup plus que la normale »). Pour la question relevant du décalage horaire, l'échelle est marquée de 0 (« pas de décalage horaire ») à 10 (« décalage horaire très important »). Dans l'étude de Bullock *et al.* (2007), les athlètes se sont sentis « jet lagués » le midi et le soir durant 4 jours après un voyage de 24 h comprenant la traversée de 15 fuseaux horaires vers l'Est, sans qu'aucune différence ne soit observée sur l'appétit, la motivation la concentration ou encore la fatigue. Des résultats similaires ont été observés pour Fowler *et al.* (2016) à la suite de 24 h de voyage vers l'Ouest avec 11 fuseaux horaires franchis ; la composante décalage horaire était encore de 4 sur 10 après 8 jours alors que le sommeil, l'appétit, les performances mentales, la fatigue, l'humeur et l'activité intestinale n'étaient pas affectés. Ces mêmes auteurs ont ensuite observé, chez des sportifs, en plus du sentiment d'être « jet lagué », une augmentation de la fatigue et une diminution de la motivation durant 4 jours, après 24h de voyage et 8 fuseaux horaires traversés ; ces symptômes étaient plus importants après le retour vers l'Est qu'après l'aller vers l'Ouest (Fowler *et al.* 2017a). Dans toutes les études, ces symptômes ont subsisté durant plusieurs jours, et ce, pendant une durée plus ou moins longue, en fonction du nombre de fuseaux traversés et de la durée du voyage (Waterhouse *et al.* 2002 ; Bullock *et al.* 2007 ; Fowler *et al.* 2015 ; Fowler *et al.* 2016 ; Fowler *et al.* 2017b ; Fowler *et al.* 2017a ; Rossiter *et al.* 2021).

6. Gestion de la fatigue et du décalage horaire chez les athlètes de haut niveau

Récemment différentes stratégies de gestion du décalage horaire lors d'un vol transmérien ont été proposées (Dunican *et al.* 2015 ; Arendt 2018 ; Duffield et Fowler

2018 ; Bin *et al.* 2019 ; Roach et Sargent 2019 ; Silva *et al.* 2019 ; Janse van Rensburg *et al.* 2020 ; Rensburg *et al.* 2021). Ces stratégies sont principalement fondées sur des études de phase-réponse, c'est à dire, en étudiant l'effet d'un « traitement » sur les rythmes circadiens.

6.1 Réponse à la lumière

La lumière étant le plus puissant synchroniseur des rythmes circadiens (Wever *et al.* 1983 ; Czeisler *et al.* 1986), une exposition à des heures précises, selon l'alternance jour/nuit peut avancer ou retarder les rythmes circadiens. D'après les courbes de phase-réponse d'exposition à la lumière, élaborées suite aux travaux conduits en constante routine (Building 1991 ; Khalsa *et al.* 2003), une exposition, dans les 12 h après la batyphase de température interne, favorise une avance de phase alors que cette même exposition, dans les 12 h avant la batyphase, provoque un retard de phase (Figure 21). Les décalages de phase les plus importants se produisent lorsque l'exposition est effectuée dans les 3 à 6 h, de part et d'autre de la batyphase de température. De plus, un décalage de phase est plus important lorsque la durée d'exposition est plus longue et/ou l'intensité lumineuse plus importante et/ou la longueur d'onde plus courte (notamment obtenue par une lumière bleue).

6.2 Réponse à l'administration exogène de mélatonine

Des courbes de phase-réponse à la mélatonine ont été proposées spécifiquement pour une dose de 3 mg (Burgess *et al.* 2008) et 0,5 mg (Burgess *et al.* 2010). Une administration de mélatonine, dans les heures suivant le réveil ou la batyphase de la température interne, engendre un retard de phase alors qu'une administration dans l'après-midi ou en soirée, entraîne une avance de phase (Figure 21). Pour une ingestion de 3 mg de mélatonine, une avance de phase maximale est atteinte si la prise a lieu 7 h avant l'heure du coucher, correspondant à 5h avant la *Dim Light Melatonin Onset* (DLMO), 12 h avant la batyphase de température interne ou encore 11h avant le milieu de la nuit (Burgess *et al.* 2008). Un retard de phase maximum est atteint si la prise a lieu 1 h après l'heure habituelle de lever. Des résultats similaires de décalage de phase d'environ 1,5 h peuvent être atteints avec 0,5 mg de mélatonine, administrée 5,5 h avant l'heure du coucher (Burgess *et al.* 2010). Le retard de phase maximum pouvant être obtenu avec une administration 3,5 h après l'heure habituelle du lever.

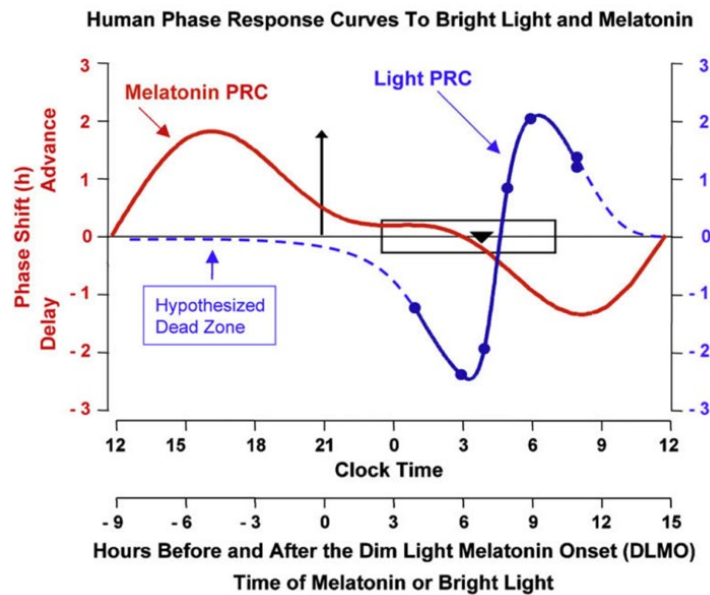


Figure 21 : Courbe de phase-réponse (PRC en anglais : phase response curve) suite à une exposition à la lumière ou à l'administration de mélatonine. D'après par Burgess et al., (2009).

Les courbes de phase-réponse ont été générées à partir de décalages de phase chez des sujets après 3 jours en libre cours. L'administration de mélatonine (3,0 mg) ou l'exposition à la lumière (2 h à 3500 Lux) a été administrée chaque jour, à différents sujets et à différents moments de la journée. L'axe x montre l'heure à laquelle la mélatonine a été administrée ou l'exposition à la lumière a débuté par rapport à la DLMO, représenté par la flèche noire vers le haut. La ligne temps supérieure représente un sujet avec une DLMO à 21h, le rectangle représentant son temps de sommeil habituel (une durée de 7h30 et un sommeil débutant 2h30 après la DLMO) et le triangle représentant sa batyphase de température interne (7h après la DLMO).

6.3 Réponse à l'activité physique

L'activité physique représente un véritable synchroniseur des rythmes circadiens, comme rapporté depuis quelques années par plusieurs études (Youngstedt *et al.* 2002 ; Atkinson and Davenne 2007 ; Atkinson *et al.* 2007 ; Youngstedt *et al.* 2016).

Youngstedt *et al.* (2016) ont, démontré qu'un exercice de 90 min (75 min entre 65 et 75 % et 15 min entre 30 et 40 % de la FC de réserve) réalisé à 22 heures, provoquait un retard de phase de la sécrétion de la mélatonine d'environ 50 min. Ce retard était identique lorsque les sujets étaient exposés pendant 90 min à une lumière vive à 5000 lux à la même heure. Plus récemment, ces mêmes auteurs ont modélisé une courbe de phase-réponse pour une heure d'activité physique à intensité modérée (Youngstedt *et al.* 2019). D'après leur modèle, une avance de phase maximale du rythme circadien de la mélatonine peut être produite par l'activité physique lorsqu'elle est réalisée à 7 h du matin environ ou entre 13 h et 16 h. À contrario, un retard de phase maximum peut être obtenu par un exercice physique réalisé entre 19 h et 22 h. Au regard de ces observations, il paraîtrait intéressant, pour les athlètes,

que les entraîneurs programment judicieusement les horaires des entraînements lorsqu'ils doivent se préparer à un décalage de phase, ou à la suite d'un décalage horaire. Cependant, le décalage de phase d'environ une heure, qui peut être obtenu par l'activité physique, a été réalisé chez des sujets sédentaires à une pratique d'intensité modérée (Youngstedt *et al.* 2019). Il faut donc rester prudent quant à l'utilisation des résultats de cette courbe de phase-réponse à l'activité physique à destination d'athlètes de haut niveau qui s'entraînent quotidiennement intensément.

6.4 Interventions avant un vol transméri dien

Afin de limiter les manifestations du décalage horaire et de réduire le temps de resynchronisation après un vol, il est recommandé que les athlètes anticipent une partie du décalage avant le vol, surtout si le décalage est important (Arendt 2009 ; Eastman et Burgess 2009 ; Lee et Galvez 2012). Dans ce cas, il est recommandé que les athlètes avancent ou retardent progressivement leur horaire de coucher et de lever, à raison de 30 min à 2 h par jour, les jours précédant le vol. De même, les horaires des repas et des entraînements doivent être décalés, sur le même rythme. D'autres donneurs de temps, notamment l'exposition à la lumière ou la prise de mélatonine exogène, judicieusement administrée, peuvent compléter ces stratégies pour contrer les effets du décalage (Figure 21).

Des protocoles expérimentaux d'avance de phase dans l'objectif d'un décalage vers l'Est ont été proposés par de nombreux auteurs (Burgess *et al.* 2003 ; Eastman *et al.* 2005a ; Revell *et al.* 2006 ; Paul *et al.* 2011 ; Crowley et Eastman 2012 ; Dijk *et al.* 2012 ; Burke *et al.* 2013 ; Crowley et Eastman 2015). Ils consistaient à évaluer les effets d'une avance progressive du rythme veille-sommeil, combinés à différentes modalités de luminothérapie et/ou de prise de mélatonine, sur différents rythmes circadiens. Les auteurs ont montré qu'une prise vespérale de mélatonine exogène, couplée à de la luminothérapie le matin au réveil, est plus efficace sur l'avance des rythmes circadiens qu'une seule de ces modalités (Paul *et al.* 2011 ; Burke *et al.* 2013). Toutefois, Eastman *et al.* (2005) ont mis en évidence qu'une exposition à la lumière 2 h par jour n'était pas plus efficace sur la désynchronisation des rythmes biologiques qu'une exposition de 1 h. De même, Revell *et al.* (2006) ont montré qu'une posologie de 0,5 mg de mélatonine avait les mêmes effets qu'une posologie de 3 mg, lorsqu'elle était combinée à une avance d'une heure de sommeil par jour durant 3 jours et à

de la luminothérapie au réveil. Les travaux de Crowley et Eastman (2012) ont rapporté des niveaux de somnolence moins importants entre le moment de la prise de mélatonine et le coucher, lorsque la dose prescrite était de 0,5 mg comparativement à 3 mg. Ainsi une dose plus faible sera à privilégier pour éviter les effets hypnotiques d'un dosage plus élevé.

Par ailleurs, différentes modalités de luminothérapie ont été expérimentées, avec des durées d'exposition différentes (continue ou intermittente). Il semblerait que 30 min de luminothérapie en continu à 5 000 Lux soit suffisante pour avancer efficacement les rythmes circadiens (Crowley et Eastman 2015). Enfin, Crowley et Eastman (2015) ont obtenu une avance de phase de la DLMO de 1,8 h après une avance de l'horaire du coucher d'1 h pendant 3 jours, couplé à 0,5 mg de mélatonine 5 h avant le coucher et à 30 min de luminothérapie à 5000 Lux au réveil. Cette modalité a eu des effets minimes sur la quantité et la qualité de sommeil perçues. Les auteurs ont suggéré qu'une avance encore plus progressive (entre 30 et 45 min/jour) serait tout aussi efficace pour agir positivement sur le rythme de la DLMO en restant synchronisé sur le rythme veille-sommeil.

Il est à souligner que toutes ces études ont été réalisées en laboratoire, sans tenir compte des réels symptômes liés au décalage horaire et de surcroît, chez des sujets sédentaires.

6.5 Interventions après un vol transméri dien

Tout comme pour les stratégies proposées avant le vol, des interventions non pharmacologiques (exposition à la lumière et/ou activité physique) et pharmacologiques (administration de mélatonine et/ou d'hypnotiques), selon les courbes de phase-réponse, sont possibles après le vol, comme cela a été largement documenté par plusieurs auteurs (Eastman et Burgess 2009 ; Lee et Galvez 2012 ; Dunican *et al.* 2015 ; Cingi *et al.* 2018 ; Janse van Rensburg *et al.* 2020). Néanmoins, l'efficacité de ces interventions doit être confirmée chez le sportif de haut niveau.

Thompson *et al.* (2013) n'ont mesuré aucune différence sur les symptômes post-décalage vers l'Est, chez des joueuses internationales de football, entre un groupe ayant eu de la luminothérapie le matin (exposition quotidienne de 60 min à 2500 Lux) et un groupe contrôle. Les effets « masques » de l'exposition à la lumière naturelle, (difficiles à contrôler dans une étude de terrain), combinés aux réponses à la lumière individuelles différentes, expliquent probablement l'absence de résultats significatifs. Ces mêmes observations ont été rapportées chez des sujets sédentaires, exposés à de la lumière le soir, après un décalage

horaire vers l'Ouest (Boulos *et al.* 2002). Exceptée la DLMO qui était retardée chez les sujets exposés à la lumière, la qualité subjective du sommeil, l'efficacité du sommeil, la perception du décalage horaire et l'humeur étaient identiques à celles d'un groupe contrôle (Boulos *et al.* 2002).

Concernant la mélatonine, seuls Manfredini *et al.* (2000) ont évalué, chez des sportifs biathlètes, l'effet d'une ingestion exogène de mélatonine (3 mg pour les femmes et 5 mg pour les hommes) après un vol vers l'Est, et ont rapporté, une modification différente, selon les athlètes, du rythme de la température interne.

Reilly *et al.* (2001) ont expérimenté l'utilisation d'un hypnotique (10 mg de Témazépam) chez des gymnastes et les membres de l'équipe encadrante à la suite d'un vol vers l'Ouest. À l'exception des symptômes subjectifs liés au décalage horaire qui avaient diminué les premiers jours post-vol, les paramètres du sommeil, le rythme de la température (tympanique), la force musculaire et le temps de réaction n'étaient pas différents de ceux du groupe contrôle (Daurat *et al.* 2000 ; Jamieson *et al.* 2001).

Quant à l'activité physique, Montaruli *et al.* (2009) ont observé, chez des sportifs s'entraînant en soirée pour se préparer à un marathon, un sommeil moins fragmenté après un vol vers l'Ouest, comparé à celui du groupe qui s'entraînait le matin. Shiota *et al.* (1996) ont montré, chez des membres d'équipage, qu'une seule séance d'activité physique pratiquée le lendemain de l'arrivée d'un vol vers l'Est (+8 h), permettait une resynchronisation plus rapide de l'acrophase du rythme du cortisol urinaire et du rythme veille-sommeil. Toutefois, des travaux complémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les effets dose-réponse de l'entraînement des athlètes de haut niveau sur les rythmes circadiens.

Enfin, Cardinali *et al.* (2002), en combinant, à la suite d'un vol vers l'Ouest (-12h), une exposition à la lumière du soleil, des horaires d'entraînements appropriés, et une prise de mélatonine (3 mg), chez des footballeurs professionnels, ont constaté, à destination, une resynchronisation rapide du rythme veille-sommeil (2,13 jours en moyenne) ; seuls la latence d'endormissement était réduite, et le nombre d'éveils légèrement supérieur en post-décalage ; la durée et la qualité du sommeil étaient identiques à celles enregistrées en avant le vol. Cette étude a montré qu'il est possible de potentialiser les effets bénéfiques de ces 3 modalités pour réduire les conséquences néfastes du décalage horaire. Cependant,

d'autres études devront permettre de mieux comprendre l'intérêt de chacune de ces interventions, afin d'adopter la meilleure stratégie chez les athlètes.

CONTRIBUTIONS PERSONNELLES

Ce travail de thèse a fait l'objet de 3 publications dont deux sont publiées dans J. Sports Med. Phys. Fitness (2022) et J. Strength Cond. Res. (2022) et une est soumise dans Res. Q. Exerc. Sport (2022). Pour ces études, 3 groupes d'athlètes, de très haut niveau, professionnels, licenciés à la FFC, faisant partie des équipes de France élite, dans les disciplines Olympiques du VTT XCO et du cyclisme traditionnel, ont été sélectionnés. La répartition de ces groupes est présentée sur la Figure 22.

Dans l'étude 1, 13 cyclistes spécialistes du VTT XCO, dont 7 hommes (âge : $26,0 \pm 3,7$ ans ; taille : $179,0 \pm 2,8$ cm ; poids : $67,7 \pm 3,4$ kg) et 6 femmes (âge : $25,2 \pm 8,2$ ans ; taille : $160,8 \pm 6,1$ cm ; poids : $54,1 \pm 4,0$ kg) ont été inclus.

Dans l'étude 2, 6 cyclistes spécialistes du VTT XCO [(5 hommes (âge : $28,2 \pm 4,5$ ans ; taille : $178,6 \pm 4,1$ cm ; poids : $66,5 \pm 3,6$ kg) et 1 femme (âge : 19 ans ; taille : 166 cm ; poids : 56,1 kg)] ont été sélectionnés.

Dans l'étude 3, un premier groupe a été constitué de 6 cyclistes spécialistes du VTT XCO [(5 hommes (âge : $28,2 \pm 4,5$ ans ; taille : $178,6 \pm 4,1$ cm ; poids : $66,5 \pm 3,6$ kg) et 1 femme (âge : 19 ans ; taille : 166 cm ; poids : 56,1 kg)] et un second groupe de 4 cyclistes spécialistes de la discipline de la route (âge : $26,0 \pm 1,4$ ans ; taille : $175,8 \pm 1,5$ cm ; poids : $62,8 \pm 5,7$ kg).

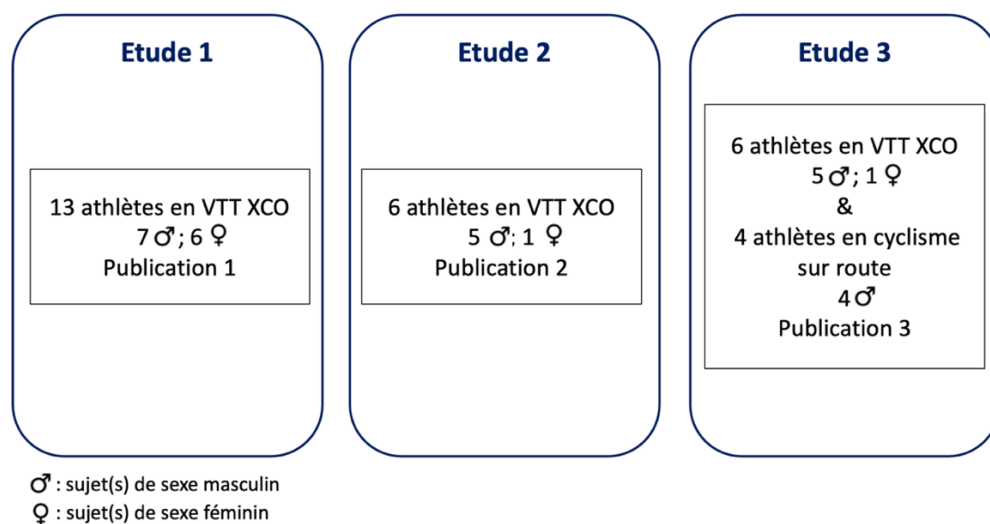


Figure 22 : Cyclistes de haut niveau ayant participé aux 3 études.

Aucun athlète ne présentait de problème de santé avant ni au moment de l'inclusion. Aucun n'était fumeur ou ne buvait de café le soir ou toute autre substance susceptible d'interférer sur le sommeil ou les performances. Pour les 3 études, tous les athlètes avaient

reçu une explication détaillée du protocole et signé un consentement éclairé, précisant les objectifs et les modalités de l'étude, elles-mêmes en accord avec la déclaration d'Helsinki.

PUBLICATION N°1

COMPLETE SLEEP EVALUATION OF TOP PROFESSIONAL CROSS-COUNTRY MOUNTAIN BIKERS' ATHLETES

Garbellotto L., Petit E., Brunet E., Gillet V., Bourdin H., Mougin F.

Publiée dans J. Sports Med. Phys. Fitness 2022, Feb; 62(2):265-272

1. Rationnel

Comme déjà évoqué dans les chapitres précédents, les athlètes et l'encadrement sportif sont convaincus qu'une bonne gestion du sommeil est un facteur déterminant de la performance sportive. Pourtant, si d'autres domaines essentiels à la performance, comme la préparation physique, la nutrition, l'hydratation sont bien maîtrisés, le sommeil est, malheureusement, encore trop souvent négligé dans la préparation des athlètes. Pourtant, il est un facteur clé de bonne santé, et doit être considéré comme un pilier majeur de la performance chez le sportif. Il joue un rôle non seulement dans la récupération psychologique, mais aussi physiologique. En effet, il est aujourd'hui bien documenté qu'une dette de sommeil ou une privation de sommeil (i) augmente les temps de réaction visuels et auditifs, avec des erreurs de jugement notamment dans les sports nécessitant des temps de réaction rapides (Fullagar *et al.* 2015), (ii) réduit les capacités perceptives, de mémorisation et de concentration, (iii) altère l'attention et la vigilance, (iv) et est responsable d'une moins bonne coordination neuro-motrice (Doran *et al.* 2001 ; Belenky *et al.* 2003 ; Durmer et Dinges 2005 ; Axelsson *et al.* 2008). Ces effets peuvent ainsi conduire, au cours d'une épreuve sportive, à une augmentation du nombre de chutes et à des moments d'inattention, conduisant à des erreurs de jugement, de stratégie, de déstabilisation spatiale ou temporelle. Le manque de sommeil altère aussi les performances physiques et augmente le risque de blessures (Luke *et al.* 2011 ; Milewski *et al.* 2014). Il s'accompagne d'une moins bonne récupération des réserves énergétiques, pouvant compromettre le niveau de performance (Fullagar *et al.* 2015). Un temps total de sommeil réduit de 3 heures diminue considérablement les capacités cardiaques, métaboliques et respiratoires, avec notamment une accumulation plus rapide de déchets acides (Mougin *et al.* 1991).

La quantité et la qualité du sommeil du sportif peuvent aussi être perturbées par de nombreux facteurs tels que l'horaire de l'entraînement, l'augmentation de la charge d'entraînement, l'exposition à l'hypoxie, les déplacements, le stress à l'approche d'une compétition, le décalage horaire, ou l'exposition excessive aux écrans (Gupta *et al.* 2017 ; Nedelec *et al.* 2018 ; Roberts *et al.* 2019). En effet, chez les athlètes, les troubles du sommeil, se manifestant notamment par une faible quantité de sommeil, ont très souvent été rapportés dans la littérature (Lucidi *et al.* 2007 ; Schaal *et al.* 2011 ; Biggins *et al.* 2019). Toutefois, dans toutes ces études, il s'agissait soit d'athlètes non professionnels, notamment

de joueurs de football (Fullagar et Bartlett 2016), de rugby (Scott *et al.* 2017), de netball (Jones *et al.* 2018), de cyclistes (Lastella *et al.* 2015a), d'athlètes pratiquant des sports de combat (Dunican *et al.* 2019a), soit de joueurs professionnels de rugby (Thornton *et al.* 2018 ; Dunican *et al.* 2019b) ou de hockey (Tuomilehto *et al.* 2017). À notre connaissance, le sommeil d'athlètes, pratiquant un sport individuel, à haut niveau de performance et de surcroît des cyclistes professionnels, n'avait jamais été exploré jusqu'alors.

C'est pourquoi, la détermination du profil chronobiologique de cyclistes professionnels, pressentis pour les JO de Tokyo en 2021 et ceux de Paris en 2024, représentait pour nous et pour le « *staff* » de la Fédération Française de Cyclisme, une étape incontournable, non seulement pour détecter d'éventuelles pathologies du sommeil, mais aussi pour consolider les périodes de sommeil nocturne, ou établir une routine de sommeil stable en veillant à adopter des comportements individuels propices au sommeil pour une récupération optimale. Enfin, ce travail était aussi important pour proposer une stratégie individuelle de préparation au décalage horaire tel que celui qu'ont connu les athlètes pour se rendre à Tokyo. Ce dernier point a d'ailleurs fait l'objet de notre étude principale (publication 2).

Dans ce contexte, l'objectif de notre première étude a été d'évaluer le rythme veille-sommeil d'athlètes vétérinaires, professionnels, masculins et féminins de la FFC, pour établir leur profil chronobiologique et leurs besoins endogènes de sommeil, afin d'une part, de leur fournir des conseils d'hygiène de vie et de sommeil, au quotidien, mais aussi durant plusieurs mois, et d'autre part de mieux les préparer aux grandes échéances internationales.

2. Matériels et méthodes

Cette étude a été réalisée chez des athlètes spécialistes du VTT XCO, faisant partie de la catégorie Elite de l'équipe de France, entre janvier et mars 2019, soit avant le début de la saison compétitive et durant une période d'entraînement habituelle. Pour chaque sujet, l'ensemble des évaluations a été conduit sur un mois. Les caractéristiques des sujets sont présentées dans le Tableau 4 (page 89).

2.1 Évaluation du chronotype

Le chronotype était évalué par le questionnaire d'Horne et Östberg, décrit de façon détaillé dans le chapitre « Évaluation du sommeil du sportif de haut niveau », page 55. Il

détermine, à partir de 19 questions d'auto-évaluation, le chronotype des sujets selon 5 catégories : « tout à fait du matin » (score de 70 à 86), « modérément du matin » (score de 59 à 69), « intermédiaire » (score de 42 à 58), « modérément du soir » (score de 31 à 41) et « tout à fait du soir » (score de 16 à 30).

2.2 Évaluation du sommeil

1. L'actimètre, Actigraph® WGT3X-BT (ActiGraph®, Pensacola, FL, USA) a permis l'étude du rythme veille-sommeil des athlètes (Figure 23). L'actigraph®, utilisé dans cette étude, a été présenté de manière détaillée dans le chapitre « Évaluation du sommeil », page 50. C'est un petit appareil de la taille d'une montre, qui se porte habituellement au poignet non dominant. Ce dispositif embarqué mesure l'activité globale, tout en repérant les périodes d'activité et d'hypoactivité. Un accéléromètre comptabilise, par unité de temps, les accélérations au-dessus d'un certain seuil. Pour cette étude l'Actigraph® était paramétré sur une fréquence d'échantillonnage de 30 Hz et les données étaient analysées *via* le logiciel Actilife 6 (ActiGraph®, Pensacola, FL, USA) par période de 60 secondes, pour une analyse du sommeil *via* l'algorithme Cole-Kripke.



Figure 23 : Actigraph® WGT3X-BT et logiciel Actilife 6.

En complément du port de l'Actigraph®, et pour être plus précis, les sujets ont rempli un agenda du sommeil (Bastuji et Jouvét 1985). Ils indiquaient, chaque jour, leur heure de coucher, estimait leur temps d'endormissement, précisaient leur heure de réveil, de lever, leurs périodes d'éveils au cours de la nuit, leurs horaires de sieste et leurs phases de somnolence diurne.

Pour les données de l'Actigraph®, elles étaient considérées comme de l'éveil sauf si (i) l'agenda du sommeil indiquait que le sujet était couché afin de dormir et si (ii) l'Actigraph®

indiquait une période de sommeil (Sargent *et al.* 2014b). Une fois que les heures du coucher et du lever étaient déterminées, l'algorithme Cole-Kripke était appliqué afin d'extraire les paramètres suivants : heure du coucher (h:min), heure du lever (h:min), temps passé au lit (TPL, durée entre l'heure du coucher et l'heure du lever, exprimé en h), temps total de sommeil (TTS, exprimé en h), latence d'endormissement (LE, durée entre l'heure du coucher et le début du sommeil, min), temps d'éveil après sommeil (TEE, temps d'éveil durant la période de sommeil, min) et efficacité du sommeil (ES, définie comme le $TTS/TPL \times 100$, %).

2. La polysomnographie, au moyen d'un Holter polysomnographe portable MORPHEUS 34 canaux (Micromed[®], France) a permis de compléter les données de l'actimètre. Pour rappel, la PSG est détaillée dans le chapitre « Evaluation du sommeil », page 45. Ici, nous détaillons seulement la procédure des enregistrements utilisée pour la présente étude.

L'électroencéphalogramme (EEG) a été réalisé grâce à 10 électrodes (Fz, Cz, F3, F4, M1, M2, C3, C4, O1, O2), positionnées selon le système international 10-20 et les dérivations recommandées de l'AASM (F4-M1, C4-M1, O2-M1). La fréquence d'échantillonnage était fixée à 500 Hz. Après abrasion de la peau par une pâte de préparation semi-liquide (Micromed[®], France), l'électrode cupule, remplie d'une pâte de conduction (Paste AC, Micromed[®], France), était appliquée au niveau des localisations choisies. La fixation des électrodes s'effectuait en recouvrant l'électrode par une pâte de fixation adhésive (Tensive, Micromed[®], France) et d'un tampon de gaz tarlatane (Micromed[®], France).

L'électrooculogramme (EOG) a été réalisé grâce à 2 électrodes cupules, placées après abrasion de la peau et remplissage de l'électrode par la pâte conductrice suivant les modalités décrites précédemment. Les électrodes étaient placées à 1 cm au-dessous du canthus de l'œil gauche (E1) et 1 cm au-dessus du canthus externe droit (E2), fixées grâce à un sparadrap extensible (Sylafix[®], Sylamed). L'acquisition du signal a été effectuée en mode bipolaire avec l'électrode mastoïdienne controlatérale (EOG D : E2-M1 et EOG G : E1-M2). La fréquence d'échantillonnage était fixée à 500 Hz, avec un filtre passe bas de 0,3 Hz et un filtre passe haut de 35 Hz.

L'électromyogramme (EMG) mentonnier a été obtenu grâce à 2 électrodes placées de part et d'autre de la ligne médiane de la mandibule, après abrasion de la peau et remplissage de l'électrode par une pâte conductrice, suivant les modalités décrites précédemment.

L'EMG jambier a été réalisé, après nettoyage de la peau à l'alcool, grâce à 2 électrodes boutons auto-adhésives de surface, positionnées de façon longitudinale au 1/3 de la longueur du muscle tibial antérieur sur chacune des jambes selon une distance de 2 à 3 cm. L'électrocardiogramme (ECG) a été enregistré par des électrodes boutons auto-adhésives, au niveau de ligne axillaire antérieure du 5ème espace intercostal et en dessous de la clavicule gauche.

La pression nasale a été obtenue par une canule de pression nasale mise en place par le sujet au moment du coucher. Les efforts respiratoires étaient mesurés par 2 sangles thoraco-abdominales à jauge de contrainte, positionnées au niveau du thorax et de l'abdomen.

Enfin un oxymètre de pouls (Nonin medical, Inc. Plymouth, Minnesota, USA), placé à l'index de la main non dominante, enregistrait la saturation en oxygène au cours de la nuit.

Les paramètres du sommeil recueillis ont été : l'heure du coucher (h:min), le temps passé au lit (TPL ; h), le temps total de sommeil (TTS ; h), l'efficacité du sommeil ($ES = TTS/TPL * 100$; %), la latence d'endormissement (LE ; min), le temps d'éveil après endormissement (TEE ; min), le nombre d'éveils (nb), le temps total de sommeil en stade 1 (TTN1 ; min), le pourcentage de sommeil en stade 1 (N1 ; %), le temps total de sommeil en stade 2 (TTN2 ; min), le pourcentage de sommeil en stade 2 (N2 ; %), le temps total de sommeil en stade 3 (TTN3 ; min), le pourcentage de sommeil en stade 3 (N3 ; %), le temps total de sommeil paradoxal (TTR ; min), le pourcentage de sommeil R (%), la qualité du sommeil ($QS = [(TTN3 + TTR / TTS) \times 100]$; %) et l'index d'apnées-hypopnées du sommeil (nombre d'apnées + nombre d'hypopnées / nombre d'heures de sommeil).

Ces données de PSG ont été scorées visuellement sur des périodes de 30 secondes par deux praticiens du sommeil, certifiés et expérimentés, en respectant les règles standard de l'American Academy of Sleep Medicine (Berry *et al.* 2020), et grâce au logiciel BrainRT (Onafhankelijke Software Grep, Kontich, Belgium).

3. L'index de qualité du sommeil de Pittsburgh a été utilisé pour l'évaluation de la qualité subjective du sommeil. Ce questionnaire a été décrit de façon détaillée dans le chapitre « Evaluation du sommeil », page 56. Brièvement, il évalue la qualité du sommeil du mois précédant par 19 questions d'auto-évaluation. Un score global, allant 0 à 21, est alors déterminé, 0 signifiant aucune difficulté et 21 signifiant des difficultés majeures. Le

questionnaire distingue 7 composantes : qualité subjective du sommeil, latence d'endormissement, durée du sommeil, efficacité habituelle du sommeil, troubles du sommeil, utilisation de médicaments et mauvaise forme en journée.

2.3 Évaluation de la somnolence

L'échelle de somnolence d'Epworth a permis d'apprécier la somnolence diurne. Cette échelle auto administrée a été décrite de façon détaillée dans le chapitre « Évaluation du sommeil » page 56. Brièvement, elle évalue la chance habituelle de s'assoupir ou de s'endormir, dans 8 situations de la vie quotidienne. Ces 8 questions forment un score de 0 à 24 ; un score de 0 à 10 signifie qu'il n'y a pas de soucis de somnolence tandis qu'un score entre 11 et 24 indique une somnolence excessive.

3. Analyses statistiques

L'analyse statistique a été effectuée *via* le logiciel JASP (*Jeffrey's Amazing Statistics Program*) version 0.11.1 (Université d'Amsterdam). Les données ont été présentées en moyenne \pm écart-type. Le test de normalité de Shapiro-Wilk a été utilisé, afin de vérifier si les données suivaient une loi normale. Les différences entre les hommes et les femmes ainsi qu'entre les nuits en semaine et en week-end ont été analysées par un test de Student, avec un niveau de significativité fixé à $p \leq 0,05$. La taille de l'effet a été analysée sur les différences significatives, et ont été catégorisées comme faibles lorsqu'elles étaient situées en-dessous de 0,49 ; modérées si les valeurs étaient comprises entre 0,5 et 0,79 et large si les valeurs étaient au-dessus de 0,8 (Cohen 1988).

4. Résultats

Selon la classification de Horne et Östberg (1976), 77 % des athlètes étaient « modérément du matin », avec un score moyen de 64 ± 2 . Seulement 23 % avaient un chronotype « intermédiaire » avec un score moyen 53 ± 5 et aucun n'était « tout à fait du matin » ou « du soir ». Aucune différence n'était observée entre les athlètes masculins et féminins.

Concernant le sommeil enregistré pendant un mois par actimétrie, on peut noter que les athlètes ont passé en moyenne $8 \text{ h } 47 \pm 22 \text{ min}$ au lit, se sont couchés à $22 \text{ h } 53 \pm 39 \text{ min}$ et levés à $7 \text{ h } 39 \pm 20 \text{ min}$ avec un TTS moyen de $8 \text{ h } 01 \pm 24 \text{ min}$ et une efficacité atteignant

91,3 ± 2,7 %. Aucune différence n'a été rapportée entre les athlètes masculins et féminins (Tableau 5 ; page 89).

Lors de la nuit enregistrée par PSG, les athlètes ont passé 8 h 50 ± 37 min au lit et ont dormi 7 h 46 ± 54 min. Leur temps total de sommeil en N1 était de 31,9 ± 17,8 min, en N2 de 240,3 ± 35,2 min, en N3 de 99,1 ± 19,1 min et en R de 98,2 ± 19,1 min. La qualité de leur sommeil était de 42,0 ± 2,9 %. Aucun athlète ne présentait d'hypopnée ou d'apnée et la saturation en O₂ était normale. Enfin la composition du sommeil n'était pas différente entre les athlètes masculins et féminins (Tableau 6 ; page 90).

Le score moyen de la qualité subjective du sommeil a été de 4,0 ± 2,3. Il est à noter que 77 % des athlètes avaient une bonne qualité de sommeil (PSQI ≤ 5), avec un score moyen de 3,1 ± 1,6 et seulement 23 % avaient une mauvaise qualité de sommeil (PSQI > 5), avec un score moyen de 7,1 ± 1,0. Le score du PSQI des athlètes féminines était largement supérieur (5,7 ± 1,6) à celui des athlètes masculins (2,6 ± 1,7, p<0,05, ES = 1,84), témoin d'une moindre qualité de sommeil chez les athlètes féminines, comparé aux athlètes masculins (Tableau 7).

Le score moyen de somnolence était de 8,8 ± 5,4 ; 62 % des athlètes présentaient une somnolence normale (score ≤ 10, avec une moyenne de 5,6 ± 1,8) et 38 % présentaient une somnolence excessive (score > 10, avec une moyenne de 14,0 ± 15,1). Aucune différence entre les athlètes masculins et féminins n'a été constatée (Tableau 7 ; page 90).

Tableau 4 : Caractéristiques physiques, physiologiques et d'entraînements des athlètes.

	Nombre	Âge (années)	Taille (cm)	Poids (kg)	Puissance maximale aérobie (Watts)	$\dot{V}O_{2max}$ (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	Volume d'entraînement (heures par semaine)
Tous les athlètes	13	25,6±5,7	171,5±14,4	63,7±11,2	375±90	77,1±12,2	15,5±2,7
Hommes	7	26,0±3,7	179,0±2,8	67,7±3,4	452±27	84,9±6,2	17,1±2,7
Femmes	6	25,2±8,2	160,8±6,1*	54,1±4,0*	286±29*	64,1±6,3*	13,6±1,6*

*Différence significative entre les athlètes masculins et féminins (p < 0,05)

Tableau 5 : Paramètres du sommeil obtenus à partir de l'actimétrie.

	Heure de coucher (h:min)	Temps passé au lit (h:min)	Heure du lever (h:min)	Latence d'endormissement (min)	Temps total de sommeil (h:min)	Efficacité de sommeil (%)
Tous les athlètes	22h53±00h39	08h47±00h22	07h49±00h20	4,6±1,4	08h01±00h24	91,3±2,7
Hommes	23h05±00h27	08h48±00h19	07h55±00h16	4,7±2,0	07h55±00h21	90,1±2,0
Femmes	22h39±00h50	08h47±00h29	07h44±00h24	4,6±0,9	08h04±00h28	91,9±2,5

Aucune différence entre les hommes et les femmes

Tableau 6 : Paramètres du sommeil enregistrés par polysomnographie.

	Tous les athlètes	Hommes	Femmes
Heure de coucher (h:min)	22h43±00h26	22h52±00h25	22h33±00h26
Temps passé au lit (h:min)	08h50±00h37	08h46±00h29	08h57±00h46
Temps total de sommeil (h:min)	07h46±00h54	07h40±01h11	07h58±00h27
Efficacité de sommeil (%)	88,3±8,0	87,3±10,5	89,4±4,3
Latence d'endormissement (min)	13,8±9,4	13,1±10,5	14,5±8,9
Temps passé éveillé (min)	44,5±41,9	49,1±54,3	39,1±24,8
TTS en stade 1 (min)	31,9±17,8	35,7±18,9	27,4±16,9
N1 (%)	7,0±4,2	8,1±4,9	5,6±3,2
TTS en stade 2 (min)	240,3±35,2	231,1±45,3	251,0±16,1
N2 (%)	51,0±3,5	49,9±4,3	52,4±1,7
TTS en stade 3 (min)	99,1±19,3	97,2±22,5	101,3±16,7
N3 (%)	21,2±3,4	21,2±3,9	21,1±3,2
TTS en stade R (min)	98,2±19,1	97,2±25,5	99,4±9,7
R (%)	20,9±3,1	20,9±3,5	20,9±2,9
Qualité du sommeil (%)	42,0±2,9	42,1±1,8	42,0±4,0

Aucune différence entre les hommes et les femmes ; TTS : temps total de sommeil.

Tableau 7 : Qualité subjective du sommeil et score de somnolence évalués PSQI et ESS.

	PSQI			ESS		
	Score global	Bons dormeurs % (score moyen ± ET)	Mauvais dormeurs % (score moyen ± ET)	Score global	Somnolence normale % (score moyen ± ET)	Somnolence excessive % (score moyen ± ET)
Tous les athlètes	4,0±2,3	77 (3,1±1,6)	23 (7,0±1,0)	8,8±5,4	62 (5,6±1,8)	38 (14,0±5,1)
Hommes	2,6±1,7	100 (2,6±1,7)	0 (0±0)	9,3±7,1	57 (4,5±1,3)	43 (15,7±6,4)
Femmes	5,7±1,6*	50 (4,4±0,5)	50 (7,0±1,0)	8,3±2,8	67 (6,7±1,6)	33 (11,5±0,7)

PSQI, Index de qualité du sommeil de Pittsburgh ; ESS, Échelle de somnolence d'Epworth ; ET, Ecart-type.

* Différence significative entre les athlètes masculins et féminins (p<0,05)

5. Discussion

Nos résultats ont montré que 77 % des athlètes étaient classifiés « modérément du matin » et 23 % « intermédiaires ». Cette répartition était différente de celle retrouvée par Rosenthal *et al.* (2001), qui avaient rapporté que la majorité des individus non sportifs (70 %) étaient « intermédiaires », les 30 % restants ayant un chronotype « du matin » ou « du soir ». De plus, nos résultats étaient discordants de ceux retrouvés par Lastella *et al.* (2016) qui avaient observé, chez des cyclistes de niveau national ou international, que 38% d'entre eux étaient « du matin », 59 % « intermédiaires » et 3 % « du soir ».

Quant aux données du sommeil, on peut noter ici que les athlètes dormaient en moyenne 8 h 01 par nuit ; cette quantité de sommeil correspond à la durée recommandée par la *National Sleep Foundation (NSF)*, soit 7 à 9 heures de sommeil par nuit, pour de jeunes adultes en bonne santé. En revanche, cette durée était supérieure à celle mesurée dans la majorité des études (6,5 à 7,5 heures), conduites chez des athlètes d'âge similaire et pratiquant divers sports (Sargent *et al.* 2014b ; Lastella *et al.* 2015c ; Caia *et al.* 2017 ; Fuller *et al.* 2017 ; Van Ryswyk *et al.* 2017). De même, cette durée était différente de celle enregistrée par actimètre, chez des sportifs professionnels rugbymen (6 h 55) et footballeurs, soit (6 h 36 ; Carriço *et al.* 2017 ; Thornton *et al.* 2018). Nos résultats peuvent s'expliquer, en partie, par le statut professionnel des athlètes et le modèle des compétitions en VTT XCO. En effet, les athlètes professionnels, et de surcroît, qui pratiquent un sport individuel, s'entraînent en journée, sans être dans l'obligation de respecter des horaires précis, contrairement à des sportifs amateurs ou étudiants qui, par leurs contraintes, doivent s'entraîner après leur travail ou leurs études. De plus, le modèle des compétitions en VTT XCO, avec notamment des compétitions en journée, n'impacte pas le rythme veille-sommeil de ces sportifs. Nous pouvons donc suggérer, à l'instar de Lastella *et al.* (2016), que les athlètes ont tendance à pratiquer un sport correspondant à leur rythme veille-sommeil et à leur chronotype. Contrairement aux données de Samuels (2008), Agüero *et al.* (2015), Bleyer *et al.* (2015) et Swinbourne *et al.* (2016) ont rapporté qu'environ 40 à 80 % des athlètes présentaient une mauvaise qualité de sommeil (selon le questionnaire PSQI). Dans la présente étude, seules les athlètes féminines (correspondant aux 23 %) considèrent leur sommeil de mauvaise qualité. Ces observations peuvent s'expliquer par un niveau d'anxiété plus élevé chez les filles, comme déjà observé par plusieurs auteurs (Schaal *et al.* 2011 ;

Gulliver *et al.* 2015 ; Junge et Feddermann-Demont 2016), augmentant ainsi le score au PSQI (Ramsawh *et al.* 2009).

La répartition des différents stades de sommeil, obtenue dans cette étude, correspond aux recommandations de la *National Sleep Foundation* (NSF), attestant d'une bonne qualité de sommeil chez nos athlètes. Parmi le peu d'études ayant évalué l'architecture du sommeil, chez des athlètes de haut niveau, toutes ont observé des résultats proches des nôtres (Gosselin *et al.* 2009 ; Hoshikawa *et al.* 2010 ; Suppiah *et al.* 2015 ; Tuomilehto *et al.* 2017 ; Estivill-Domènech *et al.* 2018 ; Dunican *et al.* 2019a). Nous pouvons donc confirmer que la qualité et la quantité du sommeil de nos athlètes, endurants, ayant de très bonnes capacités aérobies, sont très satisfaisantes.

Enfin, 62 % des vététistes avaient une somnolence normale et 38 % une somnolence excessive. Ces résultats étaient comparables à ceux retrouvés par Sanford *et al.* (2006), qui ont montré, chez des adultes non sportifs, que 32 % d'entre eux avaient une somnolence excessive. Ces résultats ont été confirmés plus tard par d'autres études réalisées chez des sportifs pratiquant le football Australien et d'autres sports collectifs puisque la somnolence était élevée pour respectivement 34 % et 28 % des athlètes (Antic *et al.* 2013 ; Swinbourne *et al.* 2016). Toutefois, les scores de somnolence diurne obtenus sont surprenants, au regard de la qualité et quantité du sommeil de nos athlètes. Nous pouvons suggérer que l'échelle de somnolence d'Epworth n'est pas un outil adapté pour évaluer la somnolence de sportifs professionnels. Ce questionnaire ne donne aucun détail sur les circonstances qui entraînent cette somnolence. Et pourtant, selon Lastella *et al.* (2016), les athlètes sont plus susceptibles d'être somnolents durant une période d'entraînements intensifs ou de compétitions, que durant une période plus calme. Nous pouvons supposer que cette somnolence soit apparue après une fatigue aigüe, faisant suite à un entraînement quotidien, et non après une fatigue provoquée par un manque ou une mauvaise qualité de sommeil.

Dans cette étude, Il est important de mentionner que les mesures ont été enregistrées durant une période d'entraînement normal, sans le stress d'une compétition importante.

Nos résultats ont montré que les athlètes professionnels, spécialistes du VTT XCO, avaient un sommeil de qualité, sans troubles apparents, contrairement à ce qui est souvent rapporté dans une autre population de sportifs. Ces athlètes accordent ainsi une place

prépondérante au sommeil dans leur processus récupération et d'optimisation de la performance.

ORIGINAL ARTICLE
EPIDEMIOLOGY AND CLINICAL MEDICINE

Complete sleep evaluation of top professional cross-country mountain bikers' athletes

Lucas GARBELLOTTO ^{1,2,3,*}, Elisabeth PETIT ^{1,2}, Emmanuel BRUNET ³,
Valérie GILLET ⁴, Hubert BOURDIN ⁵, Fabienne MOUGIN ^{1,2}¹Research Unit EA3920 and Exercise Performance, Health, Innovation Platform, University of Bourgogne Franche-Comte, Besançon, France; ²Faculty of Sports Science, University of Bourgogne Franche-Comte, Besançon, France; ³French Cycling Federation, Montigny-le-Bretonneux, France; ⁴Sleep Medicine Center Ellipse, Besançon, France; ⁵Research Unit EA481, University of Bourgogne Franche-Comte, Unit of Sleep Disorder, Besançon, France*Corresponding author: Lucas Garbellotto, Faculty of Sports Science, University of Bourgogne Franche-Comte, 31 Chemin de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France. E-mail: lucas.garbellotto@edu.univ-fcomte.fr

ABSTRACT

BACKGROUND: Despite growing interest in athletes' sleep, few studies have focused on professional athletes, especially in individual sports. Moreover, limited investigations included female athletes. This study aimed to evaluate sleep chronotype, as well as objective and subjective sleep characteristics in male and female professional cross-country mountain bikers.**METHODS:** Thirteen athletes (7 males and 6 females) of the French national team took part in this study. The Chronotype was assessed by the Horne and Östberg Morningness-Eveningness Questionnaire and sleep by actigraphy for one month, by ambulatory polysomnography (PSG) for one night and by the Pittsburgh Sleep Quality Index.**RESULTS:** Most athletes (77%) are classified as moderately morning type and a minority of athletes (23%) are intermediate type. Athletes sleep on average 8 hours per night and during the night recorded by PSG, N3 and REM sleep stages represented 21.2±3.4% and 20.9±3.1% of the total sleep time, respectively. These good sleep parameters were confirmed by subjective data with 77% good sleepers. Except the poorer subjective sleep quality in female athletes (5.7±1.6) compared to male athletes (2.6±1.7, P<0.05), no significant sex difference was found for all characteristics evaluated.**CONCLUSIONS:** The professional status of these athletes and the organization of mountain bike calendar may explain their good sleep characteristics.*(Cite this article as: Garbellotto L, Petit E, Brunet E, Gillet V, Bourdin H, Mougin F. Complete sleep evaluation of top professional cross-country mountain bikers' athletes. J Sports Med Phys Fitness 2022;62:000-000. DOI: 10.23736/S0022-4707.21.12059-6)***KEY WORDS:** Athletes; Sleep; Polysomnography; Sleepiness; Actigraphy.

Athletes are increasingly becoming aware that sleep has a major impact on performance outcomes. Physical condition, proper nutrition, hydration and relaxation are critical in reaching optimal athletic performance, but sleep is often less considered. Both the quality and the quantity of sleep of elite athletes can tip the balance between winning or losing on the day of the competition. Sleep is already known to contribute to optimum health in the general population but is a crucial pillar of success in elite athletes. With regard to athletic performance, sleep plays

a role in reaction times, motor function, motivation, focus, stress regulation, muscle recovery, sprint performance, muscle glycogen, glucose metabolism, memory and learning, injury risk, illness rates, and involuntary weight gain.¹ Recent studies have indicated that many athletes suffer from poor sleep quality and quantity. Sleep can be influenced by many factors due to the timing of sports practice, such as early morning training, increasing training load, exposure to hypoxia, travel departure times, jet lag and competitions, but also societal issues, such as exposure

to electronic devices.²⁻⁴ Some authors evaluated sleep of non-professional athletes including soccer players,⁵ rugby players,⁶ netball players,⁷ combat sports athletes⁸ or cyclists,⁹ while other studies have focused on professional rugby^{10,11} or hockey¹² players. Furthermore, others examined the sleep of male elite soccer players, who are sea-level or high-altitude natives, while they live and train at high terrestrial altitude for several days.¹³ However, to the best of our knowledge, there have been no studies, especially, on professional athletes in individual sports.

Mountain bike (MTB), and its subdiscipline, cross-country Olympic (XCO), is a recent cycling discipline that was introduced as an Olympic sport in 1996. An MTB XCO race consists of climbs, technical descents and single tracks for approximately 90 minutes. The intermittent nature of MTB XCO requires a high level of solicitation of both aerobic and anaerobic metabolic pathways,¹⁴ as well as effective and rapid decision-making.

Gupta and Colleagues highlighted female athletes are under-represented in sleep studies.³ This point is of particular relevance given that in general, females report more sleep disturbances compared to males.¹⁵

Sleep architecture among male and female professional athletes who practiced individual sports, needs to be evaluated. Such data could provide useful information for coaches to help understand sleep behaviors in their athletes. This in turn could be used to optimize physical and cognitive recovery, as well as prevent daytime sleepiness of athletes.

This distribution of different sleep stages is considered as an essential component influencing the athlete's recovery and performance capabilities.

Therefore, the aim of this study was to present: 1) observational data regarding objective sleep variables in ecological settings; 2) subjective sleep quality; and 3) and to assess daytime sleepiness, in male and female professional cross-country mountain bikers.

Materials and methods

Ethics

The study was performed in accordance with the Declaration of Helsinki and approved by the institutional eth-

ics committee. All participants were fully informed of the experimental procedures and provided written informed consent.

Subjects

Elite MTB athletes from the French national team were eligible for inclusion. The athletes were chosen for inclusion and invited to participate by the staff. All athletes were professionals, practiced around 15.5±2.7 hours per week and hope to be qualified for the Tokyo Olympic games (now planned for 2021). Athletes did not report any current or previous health problems. None of them were smokers, none drink coffee in the evening or any other substance that might interfere with sleep. The characteristics of the athletes are presented in Table I.

Protocol

The study took place before the competitive season, during a normal training phase between January and March 2019. For each subject, all evaluations were performed over a period of one month.

Chronotype

The chronotype was evaluated using the self-assessment Horne and Östberg Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ), which classifies individual chronotype based on their preferred time of physical, mental performance, sleepiness and preferred sleep/wake phase.¹⁶ The overall score (ranging from 16 to 86) calculated from 19 questions indicates the chronotype of subjects according to 5 classifications: evening types (score from 16 to 30), moderately evening types (from 31 to 41), intermediate types (from 42 to 58), moderately morning types (from 59 to 69), definitely morning types (from 70 to 86).

Sleep evaluation

Sleep/wake

Objective sleep estimates were recorded, for one month, by means of an actigraphy (ActiGraph® GT3X-BT, Pensacola, FL, USA). To ensure that the subjects' sleep pat-

TABLE I.—Characteristics of athletes.

Variables	N.	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	Maximal aerobic power (Watts)	VO _{2max} (ml.min ⁻¹ .kg ⁻¹)	Training volume (hours per week)
All athletes	13	25.6±5.7	171.5±14.4	63.7±11.2	375±90	77.1±12.2	15.5±2.7
Male	7	26.0±3.7	179.0±2.8	67.7±3.4	452±27	84.9±6.2	17.1±2.7
Female	6	25.2±8.2	160.8±6.1*	54.1±4.0*	286±29*	64.1±6.3*	13.6±1.6*

*Significant differences between male and female athletes (P<0.05).

terms throughout the course of the study were typical (*i.e.* not unusually restricted or extended), actigraphy recording was edited with information listed in the subjective sleep diaries. The diaries were used to record the start and end (date, time) of night-time sleep and daytime naps.

The actigraph was worn every day from early evening until the next morning on the non-dominant wrist and was only removed when in contact with water.

The sleep diary was used in complement of the actigraphy to determine when athletes were awake and when they were asleep. All records were scored as awake unless: 1) the sleep diary indicated that the athlete was lying down attempting to sleep; and 2) the activity counts from the monitor were sufficiently low to indicate that the participant was immobile. When these two conditions were met simultaneously, time was scored as sleep.

The data were downloaded and analyzed using the Cole-Kripke algorithm on ActiLife (ActiGraph®) software in 60-s epochs.

Parameters of interest were bedtime (h:min), get-up time (h:min), time in bed (TIB, h:min), sleep latency (min), total sleep time (TST, h:min) and sleep efficiency (%) defined as $TST/TIB \times 100$.

Nights from Monday to Friday were considered as weeknights, and nights from Friday to Monday as weekend nights.

Polysomnographic assessment

All athletes underwent standard ambulatory polysomnography (PSG), (Morpheus, Micromed, Mogliano Veneto, Treviso, Italy), during a training camp, under the same conditions and on a weekday.

As previously described,¹⁷ sleep was assessed with standard PSG techniques using the 10-20 system¹⁸ and the following variables were also continuously measured and recorded throughout the night: Fz, Cz, F4-M1, C4-M1, O2-M1, F3-M2 and O1-M2, left and right electromyogram and electrocardiogram.

The electroencephalogram (EEG) recordings were visually scored in 30-second periods by an experienced board-certified sleep physician using the American Academy of Sleep Medicine's standard rules to obtain the overnight pattern of sleep stages.¹⁹

The following sleep parameters were recorded: bedtime (h:min), time in bed (h:min), total sleep time (TST, h:min), sleep efficiency (%), sleep onset latency (time from lights out to sleep onset, defined as the first epoch of any sleep stage, min), total time awake (min), total time in stage 1 sleep (min), percentage of stage 1 sleep

in TST (N1,%), total time in stage 2 sleep (min), percentage of stage 2 sleep in TST (N2,%), total time in stage 3 sleep (min), percentage of stage 3 sleep in TST (N3, %), total time in rapid-eye movement (REM) sleep (min), percentage of REM sleep stage in TST (REM, %), sleep quality [(total time in stage 3 and REM/TST) $\times 100$, %]. Respiratory parameters were studied by thoracic and abdominal inductance plethysmography and airflow by a nasal pressure cannula. Peripheral oxygen saturation (SpO₂) and heart rate were both recorded by pulse oximetry (Nonin medical, Inc. Plymouth, MN, USA). The electroencephalogram (EEG) and the respiratory recordings were visually scored by the same certified sleep physician in 30-second and 3-min periods, respectively according to the criteria of the American Academy of Sleep Medicine.¹⁹

Subjective sleep quality

Subjective sleep quality was assessed by the Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI), which is a validated, self-reported questionnaire providing a global score of sleep quality during the previous month.²⁰ It is an effective instrument used to measure the quality and patterns of sleep in adults. It differentiates "poor" to "good" sleep by measuring seven criteria: 1) subjective sleep quality; 2) sleep latency; 3) sleep duration; 4) habitual sleep efficiency; 5) sleep disturbances; 6) use of sleep medication; and 7) daytime dysfunctioning.

Subjects self-rate each of these seven criteria. Scoring of the answers is based on a 0 to 3 scale, whereby 3 reflects the negative extreme on the scale. A global sum of "5" or greater indicates a "poor sleeper."

Sleepiness

The Epworth Sleepiness scale (ESS) was used to evaluate sleepiness. It is a self-administered questionnaire with 8 items (each scored from 0-3) used to assess daytime sleepiness or identify problematic sleepiness.²¹ It evaluates the probability of the participants falling asleep in different situations. Adding the score of the eight items (ranging from 0-24) indicates the level of sleepiness, a score between 0-10 being considered normal while a score in the range 11-24 indicating excessive sleepiness.²²

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using JASP (Jeffrey's Amazing Statistics Program, Amsterdam, the Netherlands) software version 0.11.1 (University of Amsterdam).

Data are presented as mean±standard deviation (SD), with a level of significance set at $P<0.05$.

Means and standard deviations were calculated for sleep parameters and psychometric questionnaires for all subjects. The normality of the data distribution was assessed using the Shapiro-Wilk test. Differences between male and female athletes as well as between weeknights and weekend nights were evaluated using Student's *t*-test. Effect-size analyses were calculated for significant results using Cohen's effect sizes (ES)²³ in which the size of the effect is small if $ES<0.49$; moderate if ES is comprised between 0.5-0.79 and large if $ES \geq 0.8$.

Results

Thirteen elite mountain bikers (7 males [age: 26.0±3.7 years; height: 179.0±2.8 cm; weight: 67.7±3.4 kg; maximal aerobic power: 452±27 Watts; VO_{2max} 84.9±6.2 mL·min⁻¹·kg⁻¹] and 6 females [age: 25.2±8.2 years; height: 160.8±6.1 cm; weight: 54.1±4.0 kg; maximal aerobic power: 286±29 Watts; VO_{2max} : 64.1±6.3 mL·min⁻¹·kg⁻¹]) from the French national team took part in this study. Maximal aerobic power, VO_{2max} were significantly higher in male athletes compared to female athletes ($P<0.05$) (Table I). No athlete refused consent to participate.

Chronotype

Using the classification of Horne and Östberg (1976), 77% of athletes were moderately morning types, with an average score of 64±2; 23% were intermediate type with an average score of 53±5, and none were definitely morning type or definitely evening type. According to the sex, 71% of male athletes were moderately morning type (score: 65±1), 29% intermediate type (score: 53±7) whereas 83% of female athletes were moderately morning type (score: 63±3) and 17% intermediate type (score 65±1).

Sleep/wake

During the month of evaluation with the Actigraph, athletes spent 8:47±00:22 h:min in bed, fell asleep at 22:53±00:39,

woke up at 07:49±00:20. Total sleep time represented 08:01±00:24 h:min with a sleep efficiency of 91.3±2.7%. No difference was observed between male and female athletes. Furthermore, sleep parameters were similar between weeknights and weekend nights (Table II).

Polysomnographic variables

During formal PSG, athletes spent 8:50±00:37 h:min in bed, and slept 7:46±00:54 h:min. The amount of stage N1 sleep was 31.9±17.8 mins (*i.e.*, 7.0±4.2% of TST) and that of stage N2 sleep 240.3±35.2 mins (*i.e.* 51.0±3.5%). The amount of stage N3 sleep was 99.1±19.2 mins (*i.e.* 21.2±3.4%) and that of stage REM sleep, 98.2±19.1 mins (*i.e.* 20.9±3.1%). The sleep quality was 42.0±2.9%. No athlete presented respiratory problems (hypopnea or apnea). Sleep composition was identical in male and female athletes (Table III).

Subjective sleep quality

The mean score of subjective sleep quality was 4.0±2.3; 77% of athletes were considered as good sleepers ($PSQI \leq 5$), with an average score of 3.1±1.6, and 23% were

TABLE III.—Nocturnal sleep polysomnography characteristics.

Variables	All athletes	Male	Female
Bedtime (h:min)	22:43±00:26	22:52±00:25	22:33±00:26
Time in bed (h:min)	08:50±00:37	08:46±00:29	08:57±00:46
Total sleep time (h:min)	07:46±00:54	07:40±01:11	07:58±00:27
Sleep efficiency (%)	88.3±8.0	87.3±10.5	89.4±4.3
Sleep onset latency (min)	13.8±9.4	13.1±10.5	14.5±8.9
Total time awake (min)	44.5±41.9	49.1±54.3	39.1±24.8
Awake (%)	8.6±8.4	9.8±11.1	7.2±4.0
Total time in stage 1 (min)	31.9±17.8	35.7±18.9	27.4±16.9
N1 (%)	7.0±4.2	8.1±4.9	5.6±3.2
Total time in stage 2 (min)	240.3±35.2	231.1±45.3	251.0±16.1
N2 (%)	51.0±3.5	49.9±4.3	52.4±1.7
Total time in stage 3 (min)	99.1±19.3	97.2±22.5	101.3±16.7
N3 (%)	21.2±3.4	21.2±3.9	21.1±3.2
Total time in stage REM (min)	98.2±19.1	97.2±25.5	99.4±9.7
REM (%)	20.9±3.1	20.9±3.5	20.9±2.9
Sleep quality (%)	42.0±2.9	42.1±1.8	42.0±4.0

NB: No significant difference between sexes.

TABLE II.—Sleep/wake actigraphy data.

Variables	Bedtime (h:min)	Time in bed (h:min)	Get-up time (h:min)	Sleep latency (min)	Total Sleep time (h:min)	Sleep efficiency (%)	Sleep Fragmentation
All athletes	22:53±00:39	08:47±00:22	07:49±00:20	4.6±1.4	08:01±00:24	91.3±2.7	23.0±5.6
Male	23:05±00:27	08:48±00:19	07:55±00:16	4.7±2.0	07:55±00:21	90.1±2.0	23.3±4.3
Female	22:39±00:50	08:47±00:29	07:44±00:24	4.6±0.9	08:04±00:28	91.9±2.5	23.4±7.2
Weeknights	23:03±00:29	08:47±00:22	07:45±00:25	4.8±1.9	08:02±00:24	91.4±2.9	23.2±5.8
Weekend nights	22:59±00:40	08:55±00:30	07:54±00:18	4.4±1.6	08:09±00:30	91.4±2.4	22.6±6.2

NB: No significant difference between sexes. No significant difference between weeknights and weekend nights.

TABLE IV.—Subjective sleep quality and daytime sleepiness questionnaire scores.

Variables	PSQI			ESS		
	Total score	Good sleepers % (mean score±SD)	Poor sleepers % (mean score±SD)	Total score	Normal sleepiness % (mean score±SD)	Excessive sleepiness % (mean score±SD)
All athletes	4.0±2.3	77 (3.1±1.6)	23 (7.0±1.0)	8.8±5.4	62 (5.6±1.8)	38 (14.0±5.1)
Male	2.6±1.7	100 (2.6±1.7)	0 (0±0)	9.3±7.1	57 (4.5±1.3)	43 (15.7±6.4)
Female	5.7±1.6*	50 (4.4±0.5)	50 (7.0±1.0)	8.3±2.8	67 (6.7±1.6)	33 (11.5±0.7)

*Significant differences between male and female athletes ($P<0.05$).
PSQI: Pittsburgh Sleep Quality Index; ESS: Epworth Sleepiness Scale.

poor sleepers (PSQI>5), with an average score of 7.0 ± 1.0 . All male athletes were considered as good sleepers, while half of the female athletes were considered as poor sleepers. Indeed, the PSQI score in females was significantly higher (5.7 ± 1.6) than that of males (2.6 ± 1.7 , $P<0.05$) with a large effect size ($ES=1.84$) (Table IV).

Sleepiness

The mean sleepiness score from the Epworth Sleepiness Scale (ESS) was 8.8 ± 5.4 ; 62% of athletes were considered to have normal sleepiness (score: 5.6 ± 1.8) and 38% had excessive sleepiness (score: 14.0 ± 5.1). No difference in sleepiness was observed between males and females (Table IV).

Discussion

Despite the perceived importance of sleep for athletes, little is known regarding the sleep quality of XCO mountain bikers. The main findings of this study were that professional cross-country mountain bikers, whether males or females: 1) are either moderately morning or intermediate types, and none were classified as definitely morning type or evening type; 2) sleep on average 8 hours per night, have a normal distribution of sleep stages, describe an objective sleep quality of 42%, which corresponds to their perception of sleep with a large proportion considering themselves as good sleepers; and 3) more than half of them experience no excessive sleepiness.

In the present study, 77% of athletes were classified as moderately morning type and 23% as intermediate type. This distribution is different to that reported in the general, non-athletic population of the same age.²⁴ These authors found that most individuals were intermediate (70%), and few were morning (14%) or evening types (16%). Moreover, the distribution differs from that described by Lastella *et al.* in cyclists competing at a national or international level, of whom 38% were morning type, 59% intermediate type and 3% evening type.²⁵ These divergent results can be explained by the different status of the athletes. Indeed,

in our study, all the athletes were professionals who practice and compete during the day without time constraints and with a dedicated infrastructure, unlike amateur athletes or students, who practice before or after their work or school hours. Here, the large proportion of morning chronotypes has to be taken into account in certain situations that may modify the sleep-wake rhythm of athletes, such as jet lag, travel, or training camps. Indeed, unlike evening chronotype-athletes, who prefer to go to bed later, morning chronotype-athletes find it hard to stay awake beyond their usual bedtime.²⁶ In the present study, no XCO mountain bikers were definitely morning or evening types; all subjects practice and compete during the day. In agreement with Lastella *et al.*, athletes perform in a discipline according to their chronotype, and tend to practice sports that correspond to their sleep/wake rhythm preference.²⁵

Whether in athletes or the general population, sleep is now recognized as one of the most important modalities for recovery.²⁷ However, the quantity and quality of sleep required to support the training load, to recover efficiently, and to optimize performance are not well established.²⁸ For healthy individuals, the national sleep foundation (NFS) recommends 7 to 9 hours of sleep for young adults.²⁹ In the present study, total sleep duration was 08:01 h:min per night when sleep was recorded by actimetry, and 7:46 h:min when recorded by PSG. This quantity of sleep is in accordance with NSF recommendations and is also higher than that recorded by most authors having studied athletes of similar age, practicing various competitive sports, in whom total sleep time ranged from 6.5 to 7.5 hours.^{28, 30-33} Similarly, Thornton *et al.* and Carrigo *et al.*, reported a total sleep time of 6:55 h: and 6:36 h:min measured by actimetry in professional rugby or soccer players respectively.^{11, 34} Sleep-wake parameters were similar during the weekend compared to those recorded during the week. These results highlight that these professional athletes maintain a regular sleep rhythm whatever the day of the week.

Unlike athletes who practice a collective sport, professional mountain bikers have no training schedule con-

straints, they can easily organize their training while respecting both their chronotype and their sleep needs. In addition, the training schedules (most often during the day), and the organization of mountain bike cross-country competitions (only once a week and always during the day) might explain the good quality and sufficient amount of sleep achieved by these athletes.

While athletes often exhibit relatively bad sleep, in our study, 77% of the athletes were classified as good sleepers according to the PSQI threshold and only 23% as bad sleepers. This proportion of bad sleepers is lower than that reported by Samuels *et al.* who reported 78% of bad sleepers in a Canadian Bobsleigh Skeleton squad,³⁵ and by Blayer *et al.* who observed 38% of elite athletes from various sports of the State of Santa Catarina (Brazil) with poor sleep quality.³⁶ More recently, Swinbourne *et al.* found 65% of poor sleepers among athletes or highly trained rugby sevens, rugby union and cricket athletes.³⁷ In our study, only female athletes were considered as poor sleepers, with an average PSQI score that was significantly higher than that of their male counterparts. These results may be partly explained by anxiety, predominantly found in female athletes compared to male athletes.³⁸⁻⁴⁰ Indeed, Ramsawh *et al.* demonstrated that anxiety increases the PSQI score.⁴¹ However, to the best of our knowledge, subjective perception of poor sleep in females has never been confirmed by PSG data. Since the athlete's sleep perception may differ from objective sleep quality, our data highlight that PSG, being the reference test used to assess sleep quality, architecture of sleep and sleep efficiency (giving an overall sense of how well the subjects slept) provides results quite similar to those obtained by actigraphy.

Moreover, the distribution of sleep stages and sleep quality are consistent with the indications of the national sleep foundation for good sleepers.⁴² Very few studies have evaluated the sleep architecture of professional athletes, but those that have observed similar results. Tuomilehto *et al.* recorded 19.7% of N3 and 21.3% of REM in professional male ice hockey players, suspected of having sleep disturbances.¹²

The ESS provides a validated measure of daytime sleepiness and showed that 62% of mountain bikers can be considered to have a normal sleepiness (score of 5.6 ± 1.8) and 38% an excessive sleepiness (score of 14.0 ± 5.1). These scores are similar to those recorded in a general adult population with 32% of excessive sleepers.⁴³ They also are in agreement with those of George *et al.*, Antic *et al.* or Swinbourne *et al.* who respectively observed scores of 7.3 in American football players,⁴⁴ 8.1 in Australian

rules football players⁴⁵ or 8.5 in different team sports;³⁷ these scores made it possible to distinguish respectively 20%, 34% and 28% of athletes with excessive sleepiness. Although excessive daytime sleepiness may be related to sleep deprivation and/or poor sleep quality, the present investigation did not show any sleep disturbances in MTB XCO athletes. Thus, we may suppose that the Epworth questionnaire may not be the most relevant tool for use among professional athletes. Indeed, this questionnaire does not provide any details about the circumstances in which this excessive fatigue occurs. According to Lastella *et al.*, athletes are more likely to experience daytime sleepiness during intensive training and competition schedules.²⁵ We could suppose that this sleepiness occurs after their daily training and therefore is more likely to correspond to physical fatigue induced by daytime training, and not an accumulation of fatigue linked to lack of sleep or impaired sleep quality.

The specificities of XCO with high solicitation of aerobic and anaerobic metabolism,¹⁴ requiring optimal recovery to perform, might explain the good quality and sufficient quantity of sleep of the top athletes in this study. Nevertheless, it should be noted that our athletes' sleep performance was recorded during a normal training phase, outside of intensive training periods, and without the stress related to an approaching major competition, which could cause sleep disturbances.³ Other studies in professional athletes in individual sports, in different situations and periods of competition are necessary to confirm the results of the present study. These preliminary findings await confirmation by randomized controlled trials.

Conclusions

The present study highlights that professional cross-country mountain bike athletes are mostly morning type, have a good quality and a sufficient quantity of sleep. With the exception of subjective sleep quality, which was estimated to be worse by female athletes compared to their male counterparts, there was no difference between male and female athletes in the distinct sleep characteristics. Although it is widely recognized that physical activity improves sleep, it does not seem that professional sport increases sleep quantity beyond normal healthy population values. Along with physical and mental condition, mental preparation, proper nutrition and hydration, sleep is essential to perform at high level in an individual sport like cross-country mountain biking, with its high physiological demands. For all athletes, but even more so for professionals, sleep is

crucial to physiological, biochemical, and cognitive restoration of the body and should be a major part of any elite athlete's preparation.

References

- Fullagar HH, Skorski S, Duffield R, Hammes D, Coutts AJ, Meyer T. Sleep and athletic performance: the effects of sleep loss on exercise performance, and physiological and cognitive responses to exercise. *Sports Med* 2015;45:161–86.
- Roberts SS, Teo WP, Warmington SA. Effects of training and competition on the sleep of elite athletes: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2019;53:513–22.
- Gupta L, Morgan K, Gilchrist S. Does Elite Sport Degrade Sleep Quality? A Systematic Review. *Sports Med* 2017;47:1317–33.
- Nedelec M, Aloulou A, Duforez F, Meyer T, Dupont G. The Variability of Sleep Among Elite Athletes. *Sports Med Open* 2018;4:34.
- Fullagar HH, Bartlett JD. Time to wake up: individualising the approach to sleep promotion interventions. *Br J Sports Med* 2016;50:143–4.
- Scott A, Caia J, Forbes R, Kelly V. Sleep disordered breathing and cephalometric predictors in an Australian rugby league team. *Eur Respir J* 2017;50:2345.
- Jones MJ, Peeling P, Dawson B, Halson S, Miller J, Dunican I, et al. Evening electronic device use: the effects on alertness, sleep and next-day physical performance in athletes. *J Sports Sci* 2018;36:162–70.
- Dunican IC, Eastwood PR, Murray K, Caldwell JA, Reale RJ. The Effect of Water Loading for Acute Weight Loss Following Fluid Restriction on Sleep Quality and Quantity in Combat Sports Athletes. *J Exerc Nutr* 2019;2:1–9.
- Lastella M, Roach GD, Halson SL, Martin DT, West NP, Sargent C. Sleep/wake behaviour of endurance cyclists before and during competition. *J Sports Sci* 2015;33:293–9.
- Dunican IC, Walsh J, Higgins CC, Jones MJ, Maddison K, Caldwell JA, et al. Prevalence of sleep disorders and sleep problems in an elite super rugby union team. *J Sports Sci* 2019;37:950–7.
- Thornton HR, Delaney JA, Duthie GM, Dacombe BJ. Effects of pre-season training on the sleep characteristics of professional rugby league players. *Int J Sports Physiol Perform* 2018;13:176–82.
- Tuomilehto H, Vuorinen VP, Penttilä E, Kivimäki M, Vuorenmaa M, Venojärvi M, et al. Sleep of professional athletes: underexploited potential to improve health and performance. *J Sports Sci* 2017;35:704–10.
- Roach GD, Schmidt WF, Aughtey RJ, Bourdon PC, Sorris R, Claros JC, et al. The sleep of elite athletes at sea level and high altitude: a comparison of sea-level natives and high-altitude natives (ISA3600). *Br J Sports Med* 2013;47(Suppl 1):i114–20.
- Hays A, Devys S, Bertin D, Marquet LA, Brisswalter J. Understanding the Physiological Requirements of the Mountain Bike Cross-Country Olympic Race Format. *Front Physiol* 2018;9:1062.
- Mallampalli MP, Carter CL. Exploring sex and gender differences in sleep health: a Society for Women's Health Research Report. *J Womens Health (Larchmt)* 2014;23:553–62.
- Horne JA, Ostberg O. Individual differences in human circadian rhythms. *Biol Psychol* 1977;5:179–90.
- Roche J, Corgosinho FC, Dámaso AR, Isacco L, Miguet M, Fillon A, et al. Sleep-disordered breathing in adolescents with obesity: when does it start to affect cardiometabolic health? *Nutr Metab Cardiovasc Dis* 2020;30:683–93.
- Jasper H. The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Int Fed Clin Neurophysiol* 1958;10:371–5.
- Berry RB, Brooks R, Gamaldo C, Harding SM, Lloyd RM, Quan SF, et al. AASM Scoring Manual Updates for 2017 (Version 2.4). *J Clin Sleep Med* 2017;13:665–6.
- Buysse DJ, Reynolds CF 3rd, Monk TH, Berman SR, Kupfer DJ. The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Res* 1989;28:193–213.
- Johns MW. A new method for measuring daytime sleepiness: the Epworth sleepiness scale. *Sleep* 1991;14:540–5.
- Johns MW. What is excessive daytime sleepiness. In: *Sleep deprivation: causes, effects and treatment*. Melbourne: Nova Science; 2009. p.59–94.
- Cohen J. Statistical power analysis for the behavioural sciences. Second Edition. In: Hillsdale N, editor. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates; 1988.
- Rosenthal L, Day R, Gerhardstein R, Meixner R, Roth T, Guido P, et al. Sleepiness/alertness among healthy evening and morning type individuals. *Sleep Med* 2001;2:243–8.
- Lastella M, Roach GD, Halson SL, Sargent C. The Chronotype of Elite Athletes. *J Hum Kinest* 2016;54:219–25.
- Aden A, Archer SN, Hidalgo MP, Di Milia L, Natale V, Randler C. Circadian typology: a comprehensive review. *Chronobiol Int* 2012;29:1153–75.
- Venter RE. Perceptions of team athletes on the importance of recovery modalities. *Eur J Sport Sci* 2014;14(Suppl 1):S69–76.
- Sargent C, Lastella M, Halson SL, Roach GD. The impact of training schedules on the sleep and fatigue of elite athletes. *Chronobiol Int* 2014;31:1160–8.
- Hirshkowitz M, Whiton K, Albert SM, Alessi C, Bruni O, DonCarlos L, et al. National Sleep Foundation's sleep time duration recommendations: methodology and results summary. *Sleep Health* 2015;1:40–3.
- Fuller KL, Julliff L, Gore CJ, Peiffer JJ, Halson SL. Software thresholds alter the bias of actigraphy for monitoring sleep in team-sport athletes. *J Sci Med Sport* 2017;20:756–60.
- Caia J, Scott TJ, Halson SL, Kelly VG. Do players and staff sleep more during the pre- or competitive season of elite rugby league? *Eur J Sport Sci* 2017;19:964–72.
- Lastella M, Roach GD, Halson SL, Sargent C. Sleep/wake behaviours of elite athletes from individual and team sports. *Eur J Sport Sci* 2015;15:94–100.
- Van Ryswyk E, Weeks R, Bandick L, O'Keefe M, Vakulin A, Catcheside P, et al. A novel sleep optimisation programme to improve athletes' well-being and performance. *Eur J Sport Sci* 2017;17:144–51.
- Carriço S, Skorski S, Duffield R, Mendes B, Calvete F, Meyer T. Post-match sleeping behavior based on match scheduling over a season in elite football players. *Sci Med Footb* 2017;2:9–15.
- Samuels C. Sleep, recovery, and performance: the new frontier in high-performance athletics. *Neurol Clin* 2008;26:169–80, ix–x.
- Bleyer FT S, Barbosa DG, Andrade RD, Teixeira CS, Felden ÉPG. Sleep and musculoskeletal complaints among elite athletes of Santa Catarina. *Rev Dor* 2015;16:102–8.
- Swinbourne R, Gill N, Vaile J, Smart D. Prevalence of poor sleep quality, sleepiness and obstructive sleep apnoea risk factors in athletes. *Eur J Sport Sci* 2016;16:850–8.
- Junge A, Feddermann-Demont N. Prevalence of depression and anxiety in top-level male and female football players. *BMJ Open Sport Exerc Med* 2016;2:e000087.
- Schaal K, Tafflet M, Nassif H, Thibault V, Pichard C, Alcotte M, et al. Psychological balance in high level athletes: gender-based differences and sport-specific patterns. *PLoS One* 2011;6:e19007.
- Gulliver A, Griffiths KM, Mackinnon A, Batterham PJ, Stanimirovic R. The mental health of Australian elite athletes. *J Sci Med Sport* 2015;18:255–61.
- Ramsawh HJ, Stein MB, Belik SL, Jacobi F, Saroen J. Relationship of anxiety disorders, sleep quality, and functional impairment in a community sample. *J Psychiatr Res* 2009;43:926–33.

42. Ohayon M, Wickwire EM, Hirshkowitz M, Albert SM, Avidan A, Daly FJ, *et al.* National Sleep Foundation's sleep quality recommendations: first report. *Sleep Health* 2017;3:6–19.
43. Sanford SD, Lichstein KL, Durrence HH, Riedel BW, Taylor DJ, Bush AJ. The influence of age, gender, ethnicity, and insomnia on Epworth sleepiness scores: a normative US population. *Sleep Med* 2006;7:319–26.
44. George CF, Kab V, Kab P, Villa JJ, Levy AM. Sleep and breathing in professional football players. *Sleep Med* 2003;4:317–25.
45. Antic NA, Weeks R, McEvoy D, Sargent C, Jarema L, Okeefe M, *et al.* Prevalence of sleep disorders and excessive daytime sleepiness in an elite Australian rules football team. *Am J Respir Crit Care Med* 2013;3455.

Conflicts of interest.—The authors certify that there is no conflict of interest with any financial organization regarding the material discussed in the manuscript.

Authors' contributions.—All authors read and approved the final version of the manuscript.

History.—Article first published online: June 1, 2021. - Manuscript accepted: May 17, 2021. - Manuscript revised: May 12, 2021. - Manuscript received: November 24, 2020.

PROOF
MINERVA MEDICA

PUBLICATION N°2

GRADUAL ADVANCE OF SLEEP-WAKE SCHEDULES BEFORE AN EASTWARD FLIGHT AND PHASE ADJUSTMENT AFTER FLIGHT IN ELITE CROSS-COUNTRY MOUNTAIN BIKERS: EFFECTS ON SLEEP AND PERFORMANCE

Garbellotto L., Petit E., Brunet E., Guirronnet S., Clolus Y., Gillet V.,
Bourdin H., Mougín F.

Sous presse dans J Strength and Cond. Res.

1. Rationnel

En 2021, de nombreux athlètes de la délégation française ont disputé les Jeux Olympiques de Tokyo au Japon. Ce rendez-vous important pour tous ces athlètes nécessitait au-delà d'une préparation physique et psychologique optimale, de gérer au mieux le décalage horaire (-7 h vers l'Est) pour qu'ils puissent exploiter au maximum leur potentiel le jour de la compétition. Si certains sportifs sont très habitués aux déplacements internationaux avec décalage horaire, ce n'était pas le cas pour la majorité des cyclistes français. Il était alors pertinent de s'interroger sur les stratégies à mettre en place pour que les athlètes optimisent leurs performances. Nous avons, avec l'équipe encadrante et la cellule Recherche & Performance de la FFC, réfléchi à ce qu'il était possible de proposer, tout en prenant en compte les différentes contraintes des cyclistes. Généralement, la stratégie la plus communément utilisée consiste à observer une période récupération, à minima de 1,5 jour par heure de décalage après un voyage vers l'Est, afin de resynchroniser l'ensemble des rythmes biologiques sur les horaires du pays de destination. Pour les athlètes français, ce délai de resynchronisation devait donc être au minimum, de 10 jours avant le début des compétitions. Cependant, comme déjà évoqué, et pour réduire le temps sur place, plusieurs modalités pouvaient être envisagées en utilisant, soit une exposition à la lumière, soit une administration de mélatonine, pour accélérer la resynchronisation, et préserver au mieux le sommeil (Roach and Sargent 2019 ; Janse van Rensburg *et al.* 2020). En effet, comme déjà évoqué, la lumière est un puissant synchroniseur de l'horloge biologique interne. Elle permet de décaler, avancer ou retarder, en fonction de l'heure et du temps d'exposition, les rythmes circadiens. L'exposition, qu'elle soit naturelle ou artificielle (par l'uminothérapie), doit s'effectuer le plus tôt possible au réveil pour favoriser l'avance et donc la resynchronisation des rythmes circadiens sur l'heure du pays de destination.

L'administration exogène de mélatonine est aussi une méthode efficace. Une prise de 0,5 à 3 mg de mélatonine, entre 5 et 2 h avant le coucher, est recommandée quand on veut provoquer une avance de phase (Eastman and Burgess 2009). Toutefois, il est à noter qu'une administration trop précoce peut s'accompagner d'une augmentation de la somnolence, de par son action sédatrice et hypnotique, mais aussi son effet de désynchronisation.

Une autre stratégie consistait à anticiper une partie du décalage horaire, en amont du vol en avançant progressivement le rythme veille-sommeil, à domicile. En s'appuyant sur ce principe ainsi que sur les procédés de luminothérapie et de prise de mélatonine, plusieurs études conduites en laboratoire, avaient déjà investigué un décalage de phase par une avance du sommeil, d'une heure par nuit durant 3 jours, couplés à différentes modalités de luminothérapie et prise de mélatonine chez des sujets sains (Burgess *et al.* 2003 ; Eastman *et al.* 2005a ; Revell *et al.* 2006 ; Crowley et Eastman 2012 ; Crowley et Eastman 2015). Par ailleurs, Crowley et Eastman (2015) avaient démontré qu'une avance du rythme veille-sommeil d'une heure par jour avec 30 minutes de luminothérapie au réveil, complétée par 0,5 mg de mélatonine en fin d'après-midi représentait une stratégie efficace pour avancer le rythme circadien de la mélatonine sans altérer la quantité de sommeil de la nuit subséquente.

Cette dernière stratégie intéressait tout particulièrement les athlètes VTT XCO qui désiraient se rendre le plus tard possible au Japon avant la compétition olympique. En plus de présenter l'avantage de réduire les coûts économiques, les athlètes souhaitaient conserver le plus longtemps possible leur cadre de vie (terrain d'entraînement, habitudes alimentaires, équilibre familial, etc.), tout en réduisant la pression médiatique à l'approche de la compétition. C'est pourquoi, nous avons proposé aux vétérinaires d'expérimenter une stratégie d'avance de phase avant de se rendre à Izu (Japon), pour le « Test event ». Cette compétition qui s'est déroulée en 2019, était une répétition générale de l'épreuve olympique.

L'objectif de l'étude était donc d'évaluer, les effets d'une stratégie d'avance de phase avant le vol vers Tokyo, suivie d'une stratégie de resynchronisation active à destination, sur le sommeil, les aptitudes physiques (publication 2) et cognitives (données non publiées).

2. Matériels et méthodes

2.1 Design de l'étude

Les athlètes, inclus dans cette étude, ont été sélectionnés par le manager de l'équipe de France de VTT XCO, pour participer au « Test event » à Izu (Japon). À l'inclusion, une PSG ambulatoire (Morpheus, Micromed, Italie) a été réalisée et comprenait, en plus de l'EEG, l'EMG des jambiers, la saturation en oxygène ainsi que le débit et les efforts respiratoires.

Aucun athlète ne présentait de troubles du sommeil. Tous les athlètes avaient un chronotype « modérément du matin » ou « intermédiaire » selon le questionnaire de typologie circadienne de Horne et Östberg (score moyen de $63,3 \pm 3,0$). Le protocole expérimental, représenté sur la Figure 24 a été réalisé sur 15 jours consécutifs, et comportait 4 périodes.

Période de référence

La période de référence a été réalisée en France durant 3 jours consécutifs (J1 à J3) au cours de laquelle les athlètes suivaient leur rythme veille-sommeil habituel. Au cours de cette période, ils étaient tous logés dans le même hôtel.

Avance de phase

La stratégie d'avance de phase à domicile (J4 à J8) a consisté en une avance de l'horaire de coucher de 30 minutes par jour durant 6 jours. L'heure du coucher était programmée individuellement selon les habitudes de sommeil de chaque athlète, déterminées par un agenda de sommeil rempli sur 14 jours dans le mois précédant le début du protocole. Tout comme l'heure du coucher, les horaires d'entraînement et de repas ont été avancés selon le même rythme. La dernière nuit d'avance de phase (J9), avant le départ pour le Japon, a été passée à l'INSEP (Paris).

Voyage

Le voyage (J10) a été effectué en classe économique, sur un vol direct de 12h avec la compagnie aérienne Air France, de l'aéroport de Paris Charles De Gaulle (J10, départ à 15 h 40) à l'aéroport de Tokyo-Haneda (J11, arrivée à 12 h 45 heure locale). Durant le vol, les athlètes avaient pour consigne de respecter leurs horaires de sommeil de la dernière nuit d'avance de phase.

À destination

Une fois arrivés à Izu (Japon), les athlètes devaient se resynchroniser le plus rapidement possible, en respectant les horaires du nouveau fuseau horaire (J11 à J14).

A l'issue de ces 4 périodes, avait lieu la compétition VTT XCO « Test event ».

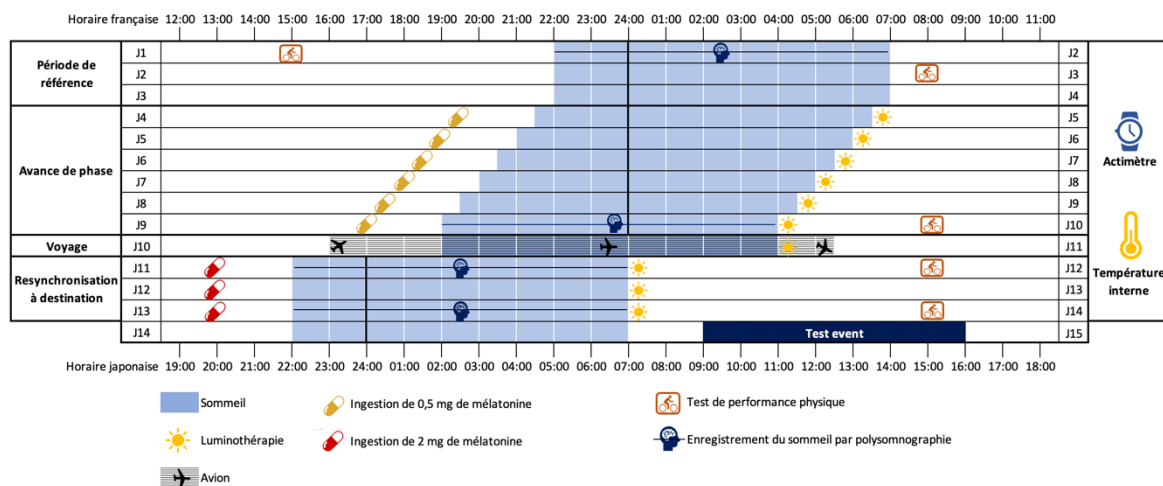


Figure 24 : Protocole expérimental pour un athlète se couchant à 22h et se levant à 7h.

Pour les 3 jours de référence (J1 à J3), les périodes de sommeil étaient programmées de 22h à 7h. L'heure du coucher était ensuite progressivement avancée de 30 minutes par jour durant 6 jours, entraînant une avance de 3h (J4 à J9). À destination, les horaires de coucher ont été resynchronisés à l'heure japonaise (J11 à J14). La mélatonine était administrée à la dose de 0,5 mg, 2h avant le coucher de J4 à J9, puis la dose était augmentée à 2 mg de J11 à J13. Immédiatement après le réveil, les athlètes étaient exposés à 20 min de luminothérapie à 1500 Lux de J5 à J14.

Durant l'avance de phase, 0,5 mg de mélatonine à libération rapide (laboratoire PiLeJe Paris, France Chronobioane, Mélatonine 30 comprimés de 1mg) a été administrée par voie orale, 2 h avant l'heure du coucher, à tous les athlètes. A destination (J11 à J13), cette posologie a été augmentée à 2 mg.

De plus, au cours de ces périodes, une exposition à la lumière, durant 20 minutes, grâce à des lunettes de luminothérapie (Luminette® ; Lucimed, Belgium) réglées sur l'intensité correspondant à 1500 Lux a été imposée le matin au réveil. Les athlètes avaient pour consigne de porter la Luminette® dès leur réveil. Pendant cette exposition, ils pouvaient prendre leur petit déjeuner et s'adonner à leurs occupations habituelles, les lunettes de luminothérapie permettant une exposition facile et transportable. La Luminette® comporte les normes de conformité européenne (CE), de sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes par la Commission Electrotechnique Internationale (norme CEI 62471). Elle possède 3 niveaux d'intensité : 500, 1000 et 1500 Lux. Le fabricant recommande une durée d'utilisation par jour de 45 minutes pour le 1^{er} niveau d'intensité, de 30 minutes pour le 2^{ème} niveau d'intensité et de 20 minutes pour le 3^{ème} niveau d'intensité.

2.2 Paramètres recueillis

Le sommeil a été enregistré par polysomnographie ambulatoire au moyen d'un Holter polysomnographe portable MORPHEUS 34 canaux (Micromed®, France) selon la méthode décrite dans l'étude 1 : à J1 (nuit de référence), J9 (dernière nuit d'avance de l'horaire de sommeil en France), J11 (première nuit de resynchronisation au Japon) et J13 (dernière nuit du protocole). Le rythme veille-sommeil a également été suivi quotidiennement par l'actimètre WGT3X-BT selon le même protocole que celui décrit dans la publication 1.

Le rythme de la température interne a été suivi en continu depuis la période de référence (J1) jusqu'à la fin du protocole (J14), grâce à des capsules ingérables e-Celsius (BodyCap, France). Les performances physiques ont été évaluées par un test Wingate et un Contre La Montre de 5 minutes (CLM5) à 5 reprises dont 2 correspondaient à des mesures de référence :

- À J1 à 15 h (heure française) soit à l'horaire habituel de compétition en France (1^{ère} mesure de référence),
- À J3 à 8 h (heure française), soit à l'horaire habituel de compétition au Japon (2^{ème} mesure de référence) ; les mesures ont été réalisées en été, et à cette période, 15 h en France correspondait à 8 h au Japon,
- À J10 à 8 h (heure française) soit à la fin de l'avance de phase, en France, et avant le vol pour le Japon. Tout comme la 2^{ème} évaluation, l'heure des mesures correspondait à l'heure de compétition à Izu,
- À J12 à 15 h (heure japonaise), soit le premier jour au Japon,
- À J14 à 15 h (heure japonaise), soit le 3^{ème} jour au Japon, correspondant à la fin du protocole.

Les cyclistes sont très habitués à ces 2 tests puisqu'ils les réalisent plusieurs fois par an, lors de leurs entraînements ; une familiarisation n'a donc pas été nécessaire.

Le test Wingate mesure la puissance et la capacité anaérobie, de façon fiable et reproductible (Ayalon *et al.* 1974 ; Bar-Or 1987 ; Inbar *et al.* 1996). Il consiste à pédaler à une puissance maximale durant 30 secondes contre une résistance constante. Les sujets avaient pour consigne de développer la plus grande puissance, en réalisant un exercice maximal sans

aucune gestion de celui-ci. Quant au CLM5, il consiste à développer la plus grande puissance mécanique sur 5 minutes de pédalage.

Ces tests ont été réalisés à la suite d'un échauffement standardisé de 20 minutes, avec une intensité progressivement croissante, sur home trainer Hammer (Cycleops, Wisconsin, EU), équipé des propres vélos des sujets. Un braquet fixe était imposé lors du test Wingate alors que celui-ci était laissé libre durant le CLM5.

Le Hammer est un home trainer à résistance électromagnétique comprenant un capteur de puissance dans le moyeu. Celui-ci mesure la puissance mécanique avec une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz à partir du couple mesuré sur le moyeu (N.m) multiplié par la vitesse de rotation du moyeu (Rad/s). Ce dispositif est considéré comme valide pour la mesure de la puissance mécanique (Lillo-Bevia et Pallarés 2018). Le home trainer est aussi équipé de la technologie ANT+ et Bluetooth 4.0. La connexion Bluetooth permet par le logiciel Mooky Center (Mtraining, France), disponible sur ordinateur Windows, d'appliquer les résistances durant les tests, de visualiser les données en temps réel et d'analyser ensuite ces données.

La puissance mécanique était mesurée au moyen du home trainer Hammer, comprenant un capteur de puissance. En cyclisme, cette puissance correspond à l'énergie produite pour avancer et lutter contre les résistances qui s'opposent à son déplacement.

Les études ont montré que le test CLM 5 est très fortement corrélé à la puissance maximale aérobie, déterminée habituellement par un test incrémental maximal (Nimmerichter *et al.* 2010 ; Bouillod *et al.* 2017). Ce test constitue donc un très bon prédicteur des aptitudes physiques maximales aérobies (Nimmerichter *et al.* 2010).

Ces deux tests étaient séparés par une récupération active de 5 minutes à 50 % de la $\dot{V}O_{2max}$.

Les paramètres mécaniques recueillis lors du test Wingate ont été la puissance maximale (P_{max} , exprimée en W et $W \cdot kg^{-1}$), la puissance moyenne soutenue durant les 30 sec (P_{moy} , exprimée en W et $W \cdot kg^{-1}$), la puissance minimale (P_{min} , exprimée en W et $W \cdot kg^{-1}$) et l'indice de fatigue (%) qui représente la baisse de puissance au cours du test ($P_{max} - P_{min} / P_{max}$). A l'issue du test 5 minutes, la puissance moyenne (P_{moy}), développée durant les 5 min, a été retenue (exprimée en W et $W \cdot kg^{-1}$).

Les paramètres cardio-respiratoires, recueillis uniquement durant le test de 5 minutes, ont été mesurés par calorimétrie indirecte, grâce à un système de mesures des échanges gazeux portable (Metamax[®] 3B-R2, Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Allemagne ; Figure 25 ; Vogler et al. 2010; Macfarlane et Wong 2012). Le Metamax[®] 3B-R2 est un système portable composé d'un module de mesure accompagné d'une batterie. Ces deux pièces de taille identique (120 x 110 x 45 mm) pour une masse totale de 1,1 kg sont introduites dans un harnais placé sur le dos du sujet. Cet appareil mesure les échanges gazeux à l'aide d'une turbine numérique bidirectionnelle. Un tube d'échantillonnage de Permapure d'une longueur de 60 cm est fixé à la turbine pour permettre l'analyse des concentrations en O₂ et CO₂ à l'aide d'une cellule électrochimique et d'un analyseur à infrarouge. La consommation d'O₂ et la production de CO₂ sont calculées à l'aide d'algorithmes métaboliques standards (Wasserman 1999). Toutes les données sont immédiatement transmises via Bluetooth sur le logiciel MetaSoft[®] studio (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Allemagne), installé sur un ordinateur. Une fois l'enregistrement terminé, les données sont enregistrées et exportées sous la forme d'un tableur (fichier CSV). Avant son utilisation, le système doit être mis sous tension pendant au moins 20 minutes et calibré selon les recommandations du fabricant. Cela implique tout d'abord de calibrer les analyseurs de gaz, en utilisant un gaz de référence (14,97 % O₂ et 4,96 % CO₂) puis de vérifier l'étalonnage par rapport à l'air ambiant. Ensuite, un étalonnage de volume doit être réalisé à l'aide d'une seringue standard de 3 litres (5530 séries, Hans Rudolph, Inc., MO, USA).

Ainsi, ont été recueillis consommation moyenne d'oxygène ($\dot{V}O_2$, ml.kg⁻¹.min⁻¹ et L.min⁻¹), le rejet moyen de CO₂ ($\dot{V}CO_2$, ml.kg⁻¹.min⁻¹ et L.min⁻¹), le débit ventilatoire moyen ($\dot{V}E$, L.min⁻¹), le quotient respiratoire moyen (QR, $\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$, u.a.), l'équivalent respiratoire en oxygène moyen ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$). La fréquence cardiaque moyenne (FC, bpm) a été mesurée en continu au moyen d'une ceinture Polar H7 (Polar Electro Oy, Kempele, Finland), synchronisée au système Metamax 3B-R2 par télémétrie Bluetooth.



Figure 25 : Système Metamax 3B-R2 avec la ceinture Polar H7.

La température interne a été suivie par télémétrie au moyen de capsules ingérables e-Celsius (BodyCap, France), dont le dispositif a été validé récemment avec une précision de 0,2 °C (Bogerd *et al.* 2018). Tous les athlètes ont été formés à l'utilisation du dispositif e-Celsius. Ces capsules communiquent par télémétrie avec un moniteur externe, e-Viewer® (BodyCap, Caen, France, Figure 26) lorsqu'elles se trouvent à moins de 1 mètre du moniteur. Si la capsule ne communique pas avec le moniteur, les données sont stockées sur la capsule et sont ensuite transmises au moniteur. La capsule peut stocker jusqu'à 2000 mesures avant la suppression de premières données. Un boîtier d'activation permet d'associer chaque capsule, avec le moniteur pour la réception des données. Le logiciel, e-Performance Manager (BodyCap, Caen, France) permet lui, le paramétrage du moniteur, la visualisation des données et l'export au format .CSV pour une exploitation ultérieure. Les capsules étaient paramétrées sur une fréquence d'échantillonnage de 30 secondes. Durant la période d'enregistrement, avant chaque défécation, les sujets vérifiaient la synchronisation de la capsule avec le moniteur. Après le passage aux toilettes, si cette synchronisation n'était plus possible, les sujets activaient et ingéraient une nouvelle capsule afin de poursuivre l'enregistrement. Afin d'éviter tout artefact lié à une prise alimentaire ou hydrique, les données étaient prises en compte qu'à partir de la 3^{ème} heure après l'ingestion. Sur l'ensemble de l'enregistrement, les sujets gardaient autant que possible leur moniteur e-Viewer à proximité (moins de 1 mètre) pour éviter toute perte de données. Ils étaient aussi équipés d'un bracelet « No IRM », bracelet d'identification permettant de signaler l'ingestion d'une capsule, par le sujet, interdisant la passation d'une Imagerie par résonance magnétique (IRM). Les données de température étaient analysées sous un tableur Excel, moyennées par période de 5 minutes. La valeur la plus faible était considérée comme le nadir (°C) et l'heure qui correspondait à cette valeur la plus faible, la batyphase (h:min). Des représentations graphiques sur des périodes de 24 h permettaient de s'assurer que des artefacts n'étaient pas pris en considération.



Figure 26 : Gélule e-Celsius®, boîtier d'activation et moniteur e-Viewer.

Bien que n'ayant pas fait l'objet de publication, les aptitudes cognitives et les symptômes subjectifs au décalage horaire ont aussi été évalués.

Dès la fin des tests physiques, les aptitudes cognitives ont été évaluées grâce au « *psychomotor vigilance task* » (PVT) sous sa forme raccourcie (Roach *et al.* 2006). Considéré comme valide (Dorrian *et al.* 2005), ce test mesure l'attention soutenue, à partir de répétitions de temps de réaction, en réponse à un stimulus simple. Il consiste pour le sujet à appuyer sur une touche du clavier préalablement défini, le plus rapidement possible, après l'apparition d'un stimulus visuel présenté selon un intervalle variable entre 2 à 10 secondes, durant 5 minutes. Pour la réalisation du test, les athlètes étaient isolés afin de ne pas être perturbés. Ils avaient pour consigne de rester concentrés et de répondre le plus rapidement possible à l'apparition de chaque stimulus visuel. Les paramètres recueillis étaient le temps de réponse moyen à tous les essais (ms) et le nombre d'erreurs (temps de réponse supérieur ou égal à 500 ms).

Les symptômes du décalage horaire ont été mesurés de manière subjective par le questionnaire « Liverpool John Moores University jet-lag questionnaire », traduit en langue française, initialement développé à l'Université de John Moores de Liverpool (Waterhouse *et al.* 2000a). Le questionnaire comprend des échelles visuelles analogiques dont la plupart ont le même format, à savoir une ligne divisée en 10 parties dont le centre est marqué 0 (sensation « normale ») et les extrêmes, +5 (sensation « beaucoup moins que la normale ») et -5 (sensation « beaucoup plus que la normale »). Pour la question relevant du décalage horaire, l'échelle est marquée de 0 (« pas de décalage horaire ») à 10 (« décalage horaire très important »). Les résultats indiquent les symptômes du décalage horaire selon

différentes composantes à différents moments de la journée : le décalage horaire, le sommeil, l'appétit, la fatigue, les performances mentales et l'humeur ainsi que l'activité intestinale. Plus le score des différentes questions est important, plus les symptômes du décalage horaire sont importants.

Ce questionnaire était rempli une fois à destination à plusieurs reprises en journée (J11 à J15), en fonction des catégories d'items :

- Au réveil, étaient renseignées les catégories « décalage horaire, sommeil et fatigue »,
- À 12 h et 16 h, les catégories « décalage horaire, fatigue, repas et performances mentales et humeur »,
- À 20 h, les catégories « décalage horaire et fatigue »
- Au coucher, les catégories « décalage horaire, fatigue et activité intestinale de la journée ».

3. Analyses statistiques

L'analyse statistique a été effectuée *via* le logiciel JASP (*Jeffrey's Amazing Statistics Program*) version 0.11.1 (Université d'Amsterdam). Les données sont présentées par la moyenne \pm écart-type. Le test de normalité de Shapiro-Wilk a été utilisé afin de vérifier si les données suivaient une loi normale. Comme toutes les distributions suivaient une loi normale, le facteur temps a été analysé pour chaque variable, en effectuant une ANOVA à mesures répétées unidirectionnelle, avec un niveau de significativité fixé à $p \leq 0,05$. En cas de violation de la sphéricité, des corrections de Greenhouse-Geisser ont été appliquées. Les effets significatifs ont été spécifiés par les tests post hoc de Holm pour les données de PSG, de l'actimètre, de la température interne, et des performances physiques, comparées aux données obtenues lors de la période de référence (*i.e.* J1 pour la PSG, J1 à J3 pour l'actimètre et la température interne et J1 et J3 pour les performances physiques). La taille de l'effet a été analysée sur les différences significatives, catégorisées comme insignifiant si $\leq 0,2$, petit si compris entre 0,21 à 0,60, modéré si compris entre 0,61 à 1,2, grand si compris entre 1,21 à 2,0 et très grand si $\geq 2,0$ (Hopkins 2000).

4. Résultats

Les données de la PSG (Tableau 8) montrent que l'avance de phase n'a pas modifié la composition du sommeil. Le TTS, le TPL, le TEE, le temps passé éveillé, le temps passé en N1, N2, N3 et R n'étaient pas différents à J9 comparés aux données enregistrées lors de la période de référence. Comme prévu, à J9, l'heure du coucher était précoce (19 h 48 ± 26 min) comparé à celle de J1 (22 h 49 ± 6 min, $p \leq 0,001$). La période de resynchronisation à destination n'a pas non plus modifié l'architecture du sommeil (J11 et/ou J13). Seule l'heure du coucher était précoce à J11 (22 h 09 ± 12 min) comparée à J1 (22 h 49 ± 6 min, $p \leq 0,01$).

Les données enregistrées par l'actimètre (Tableau 9) confirment les données de la PSG. Les heures du coucher et du lever apparaissent précocement à J9 (19 h 49 ± 29 min et 4 h 52 ± 13 min, respectivement ; $p \leq 0,01$,) comparées à celles de la période de référence (22 h 41 ± 45 min et 7 h 47 ± 31 min). L'avance du rythme veille-sommeil était également significative durant le vol (J10), les heures de coucher et de lever étaient avancées (18 h 38 ± 56 min ; $p \leq 0,01$ et 2 h 56 ± 13 min ; $p \leq 0,001$) comparées à celle de la période de référence. Les autres paramètres mesurés par l'actimètre n'ont pas été affectés, que ce soit durant l'avance de phase ou une fois à destination, comparées aux données recueillies durant la période de référence.

À l'issue de l'avance de phase (J9), la batyphase de température interne tendait à se décaler (1 h 54 ± 1 h 26 vs 4 h 28 ± 30 min durant la période de référence ($p = 0,07$). Pendant le vol (J10), la batyphase a été avancée à 1 h 52 ± 1 h 07 ($p \leq 0,05$). À destination (D11 et D13), la batyphase n'était pas significativement différente de celle mesurée durant la période de référence.

Les variables enregistrées lors des tests Wingate et CLM5 n'étaient pas différentes lorsque les tests étaient effectués en France à 8 h, ou en « post-avance de phase » (J10) ou encore au Japon, à destination (J12 et J14), comparées à celles mesurées en France lors du test réalisé à 15 h (J1).

Les résultats aux tests PVT sont illustrés sur la Figure 27. Aucune différence significative n'a été observée sur le temps de réaction, ni sur le nombre d'erreurs moyen au PVT, et ce quel que soit le jour d'exécution (J1, J3, J10, J12 ou encore J14).

Les données du « Liverpool John Moores University jet-lag questionnaire » n'ont pas été traitées car la quantité des données manquantes était trop importante.

Tableau 8 : Paramètres du sommeil (enregistrés par PSG) lors de la période de référence (J1), durant l'avance de phase (J9) et sur la période de resynchronisation à destination (J11 et J13).

	Période de référence		À destination	
	1 ^{ère} nuit J1	Dernière nuit J9	1 ^{ère} nuit J11	Dernière nuit J13
Heure de coucher (h:min)	22h49±00h06.	19h48±00h26***	22h09±00h12**	22h18±00h11
TPL (h)	9,1±0,4	9,3±0,8	9,5±0,5	8,9±0,3
TPL (min)	544,4±23,9	569,8±46,5	567,0±29,1	532,3±17,4
TTS (h)	8,5±0,4	7,9±0,9	8,0±1,2	8,0±0,4
TTS (min)	508,8±24,8	472,7±54,3	479,7±73,6	477,3±22,6
ES (%)	93,5±3,2	84,5±7,1	84,6±11,7	89,7±3,6
Latence d'endormissement (min)	9,8±7,2	48,0±22,9 [#]	23,7±18,1*	17,0±5,7
TEE (min)	30,2±13,8	17,6±11,1	60,5±59,4	32,3±24,7
Temps passé éveillé (%)	5,9±2,7	3,9±2,9	14,3±15,8	6,9±5,5
TTN1 (min)	29,1±24,0	20,5±6,2	19,3±7,7	26,5±8,5
N1 (%)	5,9±4,4	4,4±1,7	3,5±1,3	5,5±1,8
TTN2 (min)	258,8±30,8	238,6±25,4	240,6±40,5	231,0±21,4
N2 (%)	59,9±6,7	59,7±3,0	46,4±8,1	47,7±3,1
TTN3 (min)	108,0±4,8	99,7±13,3	109,3±15,0	102,9±6,5
N3 (%)	20,7±0,3	20,7±0,9	21,1±3,4	21,1±0,8
TTR (min)	110,5±5,8	114,7±22,0	116,8±24,5	116,9±9,5
R (%)	21,4±0,6	23,7±1,8	22,3±3,4	24,0±2,2
Qualité du sommeil (%)	43,0±1,8	45,1±2,5	47,0±1,7	46,1±2,0

Données exprimées en moyenne ± écart-type. TPL : temps passé au lit ; TTS : temps total de sommeil ; ES : efficacité du sommeil ; TEE : temps d'éveil après endormissement ; TTN1 : temps total de sommeil en stade 1 ; TTN2 : temps total de sommeil en stade 2 ; TTN3 : temps total de sommeil en stade 3 ; TTR : temps total de sommeil paradoxal ; qualité du sommeil = (temps total de sommeil en N3 + REM)/TTS. [#] p = 0,08 ; * p ≤ 0,05 ; ** p ≤ 0,01 ; *** p ≤ 0,001 en comparaison à la période de référence.

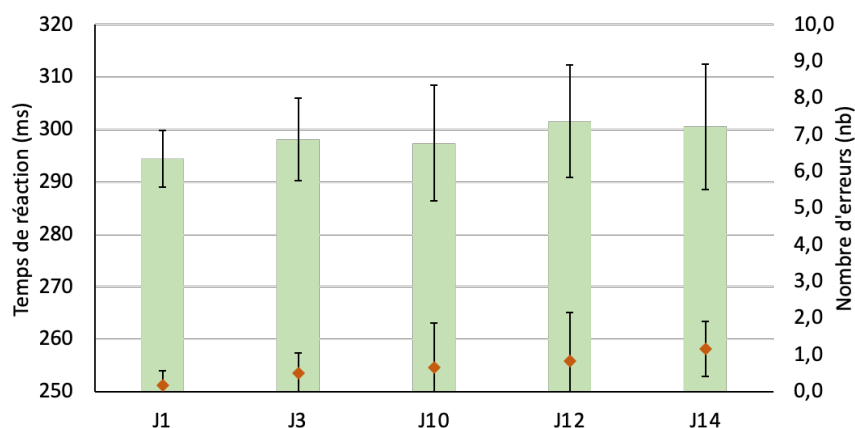


Figure 27 : Temps de réaction et nombre d'erreurs enregistrés lors de la période de référence (J1 et J3), après l'avance de phase (J10) et à destination (J12 et J14) grâce au « psychomotor vigilance task ».

En vert : temps de réaction moyen. En rouge : nombre d'erreurs moyen

Tableau 9 : Paramètres du sommeil (mesuré par actimétrie) pendant la période de référence (J1 à J3), lors de l'avance de phase (J9), le voyage (J10) et la resynchronisation à destination (J11 à J13).

	Période de référence	Avance de phase	Vol	Période à destination	
	J1 à J3	Dernière nuit	J10	1 ^{ère} nuit	Dernière nuit
		J9		J11	J13
Heure de coucher (h:min)	22h41±00h45	19h49±00h29	18h38±00h56	22h10±00h11	22h15±00h07
Latence d'endormissement (min)	6,8±2,9	6,6±1,5	14,6±15,8	7,4±3,1	5,8±4,2
Heure du lever	7h47±00h31	4h52±00h13	2h56±00h33	7h42±00h21	7h09±00h13
TEE (min)	45,8±15,6	42,2±20,1	88,4±98,5	47,4±11,0	54,3±12,8
TPL (h)	9,1±0,6	9,1±0,6	8,3±0,9	9,5±0,4	9,2±0,2
TPL (min)	545,5±36,5	543,8±37,9	498,4±51,7	568,2±25,8	549,8±11,0
TTS (h)	8,2±0,4	8,3±0,8	6,6±1,4	8,6±0,5	8,2±0,3
TTS (min)	493,0±25,1	495,0±45,3	395,4±85,1	513,4±30,7	489,8±16,7
ES (%)	90,5±2,4	91,0±3,7	80,4±19,0	90,3±2,0	89,1±1,9

Données exprimées en moyenne ± écart-type. La période de référence comprend la moyenne de l'ensemble des nuits. TEE : temps d'éveil après endormissement ; TPL : temps passé au lit ; TTS : temps total de sommeil ; ES : efficacité du sommeil

5. Discussion

Nos résultats ont montré qu'une avance progressive du rythme veille-sommeil de 3 h pendant les 6 derniers jours précédant le vol, combinée à l'ingestion de 0,5 mg de mélatonine 2 h avant le coucher et à de la luminothérapie au réveil, a permis de limiter les effets délétères observés généralement après un vol vers l'Est. Cette stratégie a contribué notamment, à conserver la quantité de sommeil, sans en modifier sa composition. Plusieurs auteurs avaient déjà montré qu'une avance du rythme veille-sommeil n'affectait ni la quantité ni l'efficacité du sommeil (Burgess *et al.* 2003 ; Eastman *et al.* 2005 ; Revell *et al.* 2006 ; Crowley et Eastman 2012 ; Crowley et Eastman 2015). Néanmoins, dans ces études, le sommeil était mesuré par actimètre ou agenda du sommeil. L'originalité de notre étude repose sur le fait que le sommeil était mesuré aussi par PSG et l'avance du rythme veille-sommeil s'effectuait en situation écologique. La conservation de la qualité et de l'architecture du sommeil s'explique très probablement par l'avance rapide de la température interne, pour laquelle la batyphase était déjà décalée de 2 h 30 (sur les 3 h imposées) en fin de période d'avance de phase. Comme démontré par Revell *et al.* (2006), et confirmé par plusieurs autres études (Crowley et Eastman 2012 ; Crowley et Eastman 2015), l'administration de mélatonine, couplée à une exposition à la lumière est plus efficace pour

réaliser une avance de phase, qu'une simple utilisation de mélatonine. Ainsi, on peut supposer que les effets (mélatonine/lumière) se soient potentialisés pour modifier rapidement (bien que partiellement) la rythmicité de la température interne. Enfin, à destination, la batyphase de la température était déjà « à l'heure locale japonaise », ce qui a, probablement, contribué à conserver l'architecture du sommeil.

Quant aux performances physiques et aux variables cardiorespiratoires, elles ont été maintenues non seulement après l'avance de phase, mais aussi à destination. Si certaines études ont rapporté une réduction des performances en sauts (Chapman *et al.* 2012 ; Fowler *et al.* 2017a) ou de la force de préhension (Reilly *et al.* 2001 ; Lemmer *et al.* 2002) en post-décalage, Bullock *et al.* (2007), quant à eux, n'ont pas montré, de différence dans les performances sur un sprint de 30 m après 24 h de voyage et 16 fuseaux horaires traversés. Nous pouvons suggérer que le maintien des performances de nos athlètes soit lié à un ajustement rapide des rythmes biologiques, notamment celui de la température interne.

Enfin, tout comme les performances réalisées sur les tests Wingate et CM5, les performances cognitives se sont aussi maintenues en fin d'avance de phase et à destination. Ces résultats s'expliquent aussi par la conservation d'un sommeil tant en qualité qu'en quantité, quelle que soit la période considérée et probablement par le maintien, à un niveau optimal, de la vigilance. Pour autant, en l'absence de données dans la littérature, il est difficile de comparer nos observations à celles d'autres études.

Bien que le « Liverpool John Moores University Jet-Lag questionnaire » soit très simple à remplir, la passation de ce test devient vite très fastidieuse pour les athlètes, surtout s'il est demandé de le renseigner à plusieurs périodes dans la journée (dans la présente étude : au réveil, à 12 h, 16 h et à 20 h). Il est à noter aussi que certains horaires de passation correspondaient à ceux de leurs entraînements (12 h et 16 h), ce qui ne nous a pas permis de recueillir toutes les données. En plus du faible nombre de sujets, ces données n'étaient malheureusement pas exploitables.

L'avance de phase en préparation à un vol transméri dien vers l'Est semble être une stratégie efficace pour minimiser les effets indésirables du décalage horaire en conservant la quantité et qualité du sommeil mais aussi en maintenant les performances physiques et cognitives

Gradual advance of sleep-wake schedules before an eastward flight and phase adjustment after flight in elite cross-country mountain bikers: effects on sleep and performance

Lucas Garbellotto,^{1,2} Elisabeth Petit,¹ Emmanuel Brunet,² Sandrine Guirronnet,² Yvan Clolus,² Valérie Gillet,³ Hubert Bourdin,^{4,5} Fabienne Mougin¹

¹Research Unit EA 3920 and Exercise Performance, Health, Innovation Platform, University of Bourgogne Franche-Comte, 25000 Besançon, France; ²French Cycling Federation, 78180 Montigny-le-Bretonneux, France; ³Sleep Medicine Center Ellipse, 25000 Besançon, France; ⁴Research Unit EA 481, University of Bourgogne Franche-Comte; ⁵Sleep Disorder Unit Hospital, 25000 Besançon, France.

Abstract

Strategies, for alleviating jet lag, specifically targeted to competitive athletes, have never been studied, in ecological conditions. This study aimed to assess, in professional mountain bikers, the effects, on sleep and physical performance, of a phase advance before a 7 h eastward flight followed by a strategy of resynchronization at destination. Six athletes participated in this study divided into 4 periods: (i) baseline (usual sleep-wake rhythm); (ii) phase advance (advance sleep-wake schedules of 3 h for 6 days); (iii) travel (flight: Paris-Tokyo); and (iv) phase adjustment (resynchronization of sleep-wake schedules). Melatonin pills and light therapy were administered during the phase advance and phase adjustment. Sleep was recorded by polysomnography and actigraphy, core body temperature (CBT) rhythm was assessed by ingestible capsules, and physical performances were tested by the Wingate and 5-Min Maximal Exercise tests. Results showed that bedtime was advanced by 2.9 h at the end of the phase advance ($p \leq 0.01$) with a batyphase of CBT advanced by 2.5 h ($p = 0.07$). Bedtime was similar at destination compared to baseline. Total sleep time and sleep composition were unchanged at the end of the phase advance or at destination, compared to baseline. Physical performances were maintained after phase advance and at destination. The phase advance enabled to pre-shift part of the time zones without disturbing sleep and physical performances, and contributed to preserving them once at destination. A phase advance before eastward travel represents an effective strategy to counter harmful effects of jet lag.

Key words: Phase advance, Transmeridian flight, Jet lag, Polysomnography, Core body temperature

Introduction

Travel across multiple time zones is an inevitable feature of participation in international competitions or training camps for elite athletes. Rapid airline travel across multiple time zones results in several symptoms, collectively termed "jet lag" (17,18,27). It is defined as a syndrome involving insomnia or excessive daytime sleepiness following travel across at least 3 time zones. It is associated with impaired daytime function and may include other somatic complaints, such as gastrointestinal disorders, and/or loss of appetite in the days immediately following travel. Furthermore, air travel can confer a physical and emotional burden on athletes, due to prolonged exposure to mild hypoxia, cramped conditions and cabin noise during travel (2). Jet lag is a recognized circadian rhythm sleep disorder caused by conflict between the internal pacemaker and changed external conditions (35,39). It can negatively affect the abilities of athletes who are hoping to achieve their best physical performance (35). Jet lag symptoms typically persist for one day for each time zone crossed until the body realigns its circadian clock, regardless of direction traveled. Although the sleep-wake rhythm resynchronizes within a few days after transmeridian flight, circadian rhythms such as melatonin or core body temperature (CBT) rhythms take longer (up to 10 days) to resynchronize (28). Although jet lag symptoms have been reported for both eastward and westward travel, eastward travel has been associated with more severe symptoms and of longer duration compared to those induced by travelling west (for review, see 29). Hence, eastward travel may require effective interventions to

counter symptoms of jet lag, especially in elite athletes who have to compete at international level at destination. Two interesting approaches have been proposed: rapid adaptation at destination and phase advance before travel.

The 1st focuses on rapid adaptation of the circadian system to the new time zone after a transmeridian flight. This can be done by ingestion of exogenous melatonin and/or the use of timed light exposure (3,16,22,38). The 2nd approach is based on a phase advance of the circadian clock before travel to minimize jet lag at destination (16). Indeed, it has been shown, in healthy and sedentary subjects, that an advance of the sleep-wake rhythm by 1 h a day for 3 days combined with 0.5 mg of melatonin, 5 h before the baseline bedtime, and 30-min of bright-light (5000 lux) upon waking, was an efficient treatment to phase-advance circadian rhythms (13). These results confirm previous observations that a combination of light and melatonin time cues was effective to phase-shifting the human circadian clock, not only to adapt to jet lag or shift work, but also to design effective treatments for circadian sleep-wakefulness disorders (10,14,31). However, extrapolations of these results to other conditions or participants are difficult, since these previous studies involved healthy subjects, sleep was assessed only by actigraphy (which is not the gold-standard measure), and the studies were performed in laboratory conditions without any ecological evaluations of the jet lag consequences.

To the best of our knowledge, limited field studies have investigated the effects of a preflight adjustment on sleep (26). Moreover, the achievement of a phase advance preceding real international travel to the east, with an evaluation of sleep by ambulatory polysomnography (PSG), has never been studied, especially in elite Mountain Bike (MTB) athletes preparing for an international competition. MTB, and its subdiscipline,

Address correspondence to Lucas Garbellotto, garbellotto.lucas@gmail.com
Journal of Strength and Conditioning Research

Cross-Country Olympic (XCO), was recently introduced as an Olympic sport (in 1996). A MTB XCO race consists of climbs, technical descents and single-tracks for approximately 90-min. The intermittent nature of MTB XCO requires a high level of solicitation of both aerobic and anaerobic metabolic pathways (21), as well as effective and rapid decision-making.

The purpose of this study was to assess, in elite MTB XCO athletes, the effects, on sleep and physical performances, of a gradual phase advance of sleep by 30-min/day for 6 days, before a long-haul flight (7 h eastward) with evening melatonin, morning bright light, and, at destination, an active strategy of synchronization also with evening melatonin and morning bright light. We hypothesized that this strategy would induce an advance in circadian rhythms without altering sleep and physical capacities and hence limit the detrimental effects of jet lag on arrival at destination.

Methods

Experimental approach of the problem

This study was an observational design. The experimental protocol is described in detail in Figure 1. Subjects were selected by the manager of French Mountain bike national team, to participate in September 2019 at Tokyo, to an international competition of Cross-Country Olympic (XCO), called "Test Event". The eastward flight, from France to Japan, exposes the athletes to a shift in circadian rhythms, due to 7 time zones crossed. To act on the resynchronization period, an active strategy in France (from D4 to D10: phase advance of sleep-wake schedules) followed by an active phase adjustment at destination (D11 to D14), with an exposure to bright light and a melatonin administration, have been investigated, in order, to evaluate their effects on sleep and physical performances.

Subjects

The study was performed in accordance with international ethical standards (20) and approved by the local ethics committee for use of human participants in accordance with guidelines of the Declaration of Helsinki. Before participation, every athlete received a description of the procedure explaining the general purpose of the experiment, and provided written informed consent. Six elite professional mountain bikers of the French national team [(5 males (age: 28.2 ± 4.5 years; height: 178.6 ± 4.1 cm; body mass: 66.5 ± 3.6 kg) and 1 female (age: 19 years; height: 166 cm; weight: 56.1 kg)] took part in this study. Athletes did not report any significant previous or current health problems. At enrolment, athletes underwent a standard ambulatory PSG (Morpheus, Micromed, Italy). Plethysmography, airflow and respiratory parameters were recorded through nasal pressure cannulae, thoracic and abdominal inductance belts. Finally, no athlete presented sleep disorders. The circadian typology score, according to the Horne and Östberg "morningness-eveningness" questionnaire (25), averaged 63.3 ± 3.0. All athletes had a moderately morning chronotype except one subject who had an intermediate chronotype. None of them were smokers and none drank coffee in the evening or any other substance that might interfere with sleep and performance.

Procedures

The protocol started with three days of baseline period (D1 to D3) during which athletes maintained their usual sleep-wake

schedules and were grouped together within the same hotel. Then, at home (phase advance period, i.e. D4 to D10), bedtime was gradually advanced by 30-min each day, for 6 days (D4 to D9) before the flight. The advance of bedtime was individually programmed, based on the usual bedtime of each athlete, collected from a sleep diary completed for 14 days during the month preceding the start of the protocol. As for sleep schedules, meals and training times were also advanced in the same way. Before departure to Tokyo, the last night (i.e. D9) was spent in a hotel near Paris airport. Travel (travel period, D10) was in economy class with Air France for a 12 h nonstop flight. The flight took off from Paris (Charles De Gaulle; France, D10) at 3:40 p.m. local time and arrived at 12:45 p.m. (local time) in Tokyo Haneda (Japan, D11). All athletes took the same flight and had to respect their sleep-wake schedules, corresponding to those of the last night of phase advance. At destination (phase adjustment period, D11 to D14), sleep-wake schedules were immediately resynchronized to those of the Japanese time zone, so that athletes quickly recovered their habitual circadian rhythms. From D4 to D9, 2 h before bedtime, 0.5 mg of melatonin was administered to each athlete, while, at destination (D11 to D13), the dose increased to 2.0 mg to yield a greater hypnotic effect.

Furthermore, from D5 to D14, including on arrival after the flight, upon waking, athletes were exposed to 1 500 lux of light therapy for 20-min with light glasses (Luminette®, Lucimed, Villers-Le-Bouillet, Belgium).

Polysomnographic assessment

Objective sleep was recorded by a standard ambulatory PSG (Morpheus, Micromed, Italy), for four nights as followed:

- On D1 or reference night
- On D9 or last night of phase advance in France,
- On D11 or 1st night of resynchronization in Japan,
- On D13 or last night of resynchronization at destination, the day before the start of competition schedules.

During their sleep episodes, subjects were instructed to lie in bed in the dark even if they could not sleep.

As previously described (19), sleep was assessed with standard ambulatory PSG techniques using the 10-20 system and the following variables were also continuously measured and recorded throughout the night: Fz, Cz, F4-M1, C4-M1, O2-M1, F3-M2, C3-M2 and O1-M2, left and right chin electromyogram, electrooculograms and electrocardiogram.

The following sleep parameters were recorded: bedtime (h:min), time in bed (TIB, h), total sleep time (TST, h), sleep efficiency (SE, %), sleep onset latency (SOL, min, time from lights out to sleep onset, defined as the 1st epoch of any sleep stage, min), wake after sleep onset (WASO, min, number of minutes scored as wake-up time during sleep period, min), number of awakenings (nb), awake time (%), total time in stage 1 sleep (TTN1, min), percentage of stage 1 sleep in TST (N1, %), total time in stage 2 sleep (TTN2, min), percentage of stage 2 sleep in TST (N2, %), total time in stage 3 sleep (TTN3, min), percentage of stage 3 sleep in TST (N3, %), total time in rapid-eye movement sleep (TTREM, min), percentage of REM sleep stage in TST (REM, %) and sleep quality (SQ = [(total time in stage 3 and REM / TST) x 100], %). PSG data were visually scored in 30 s periods by an experienced board-certified sleep physician using the American Academy of Sleep Medicine's standard rules (5).

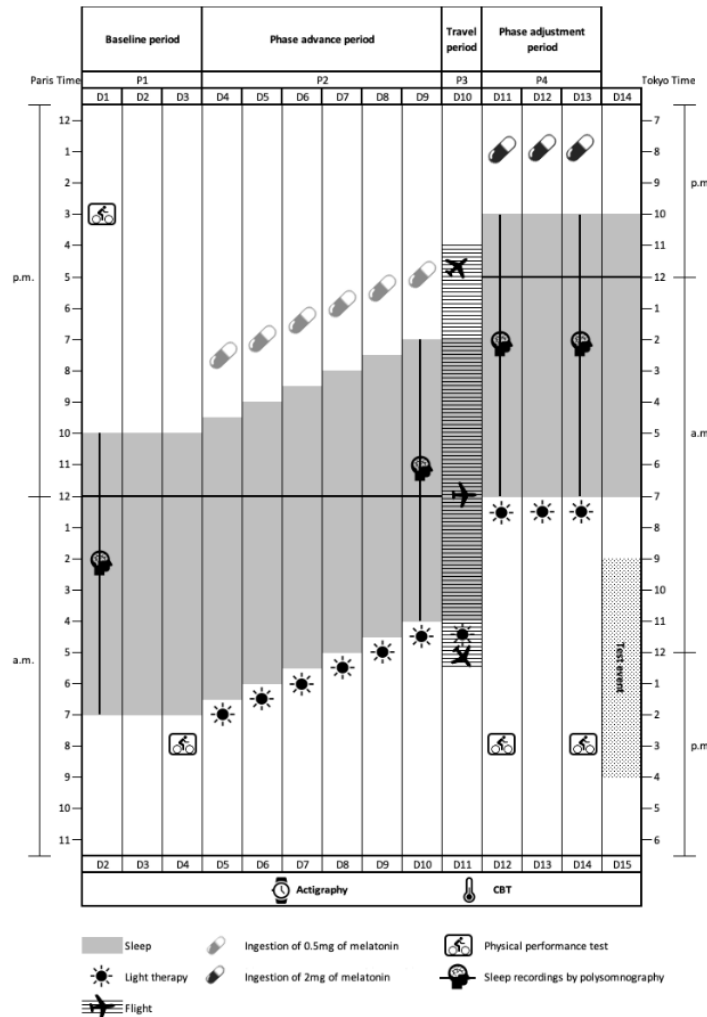


Figure 1. Raster plot of the experimental protocol for an athlete going to bed at 10:00 p.m. and getting up at 7:00 a.m. For 3 baseline days (D1 to D3), sleep episodes were scheduled from 10:00 p.m. to 7:00 a.m. Thereafter, the bedtime was gradually advanced resulting in a 3 h advance (30-min each day) of the bedtime over 6 days (D4 to D9). Then, at destination, sleep-wake schedules were resynchronized to Japanese time (D11 to D14). Melatonin was given at a dose of 0.5 mg, 2 h before bedtime, from D4 to D9, then the dose was increased to 2 mg from D11 to D13. Immediately after waking up, athletes were exposed to 20-min of light therapy at 1500 lux from D5 to D14.

Actigraphy assessment

Throughout the duration of the protocol (D1 to D14), athletes wore an actimeter on their non-dominant wrist (ActiGraph® GT3X-BT, Pensacola, FL, USA) from early evening until the next morning after waking up. The sleep diary was used, as a complement to actigraphy, to determine when athletes were awake and when they were lying down attempting to sleep. Data from actigraphy were downloaded and analyzed on ActiLife (ActiGraph®, Pensacola, FL, USA) software. All records were scored as awake unless: (i) the sleep diary indicated that the athlete was lying in bed attempting to sleep and (ii) the activity counts from the monitor were sufficiently low to indicate that the participant was immobile. When these two conditions were met simultaneously, time was scored as sleep. Data were downloaded and analyzed using Cole-Kripke algorithm on ActiLife software in 60 s epochs. Once the bedtime and wake-up time were defined, automatic Cole-Kripke algorithm analyses were run to extract the following sleep parameters: (a) bedtime (h:min), (b) wake-up time (h:min), (c) time in bed (TIB, time duration between bed-

time and wake-up time, h), (d) total sleep time (TST, estimated amount of time scored as sleep, h), (e) sleep onset latency (SOL, amount of time elapsing from bedtime to the 1st period of sleep, min), (f) wake after sleep onset (WASO, number of minutes scored as wake-up time during sleep period, min) and (g) sleep efficiency (SE, defined as TST/TIB x 100, %).

To obtain a more accurate representation of sleep parameters over the basal period, the data collected between D1 and D3 were averaged.

Core body temperature (CBT) measurement

CBT was recorded continuously from D1 to D14 using miniaturized e-Celsius® ingestible capsules and e-Viewer (Bodycap, Caen, France). The performance and reliability of this device have been validated in clinical trials demonstrating good heat homogeneity of the gastrointestinal tract and equivalence with data from rectal probes (precision of 0.2°C) (6). Temperature from the e-Celsius® capsule is sampled every 30-sec while traveling through the gastrointestinal tract and is displayed in real time on the dedicated monitor, e-Viewer®.

The capsule is also equipped with a memory chip, which enables storage of data in case of a loss of connection. The 1st capsule was provided to the athletes on D1. Athletes were equipped with a bracelet marked “No MRI” indicating the ingestion of a capsule that prohibits performance of magnetic resonance imaging. Before each defecation, athletes had to synchronize the capsule with the monitor to avoid any loss of data. After each defecation, athletes had to check if the capsule was still synchronized to the monitor. If the capsule was ejected, a new one was activated and ingested to continue recordings.

Data were downloaded onto a dedicated Bodycap interface and then exported in CSV format for use on an Excel spreadsheet. Data were averaged by 5-min increments and presented in the form of graphs by 24 h period. Only the nadir (°C) and the batyphase (h:min) were selected for this study.

Physical performances

After a standardized warm-up of 20-min, athletes performed a Wingate test followed by a 5-Min Maximal Exercise (ME5) separated by 10-min of active pedaling recovery. These two tests are commonly used by the French Cycling Federation to determine the physical performance level of cross-country mountain bikers. These tests were performed 5 times as follows:

- On D1 at 3:00 p.m. The 1st reference performance was performed at the French scheduled competition time, planned in Japan at precisely 3:00 p.m., as if the athlete would have no flight time. These tests were performed before the gradual advance of athletes' sleep-wake cycles.
- On D3 at 8:00 a.m. The 2nd reference performance was considered as another baseline performance, since it corresponded to time schedule of the competition in Japan, with the French body clock of an athlete who would fly to Japan without any effort of desynchronization. Indeed, in summer time, when it is 8:00 a.m. in France, it is 3:00 p.m. in Japan. This test was also performed before gradual advance of athletes' sleep-wake cycles.
- On D10 at 8:00 a.m. The tests were performed at the end of the gradual advance of sleep-wake cycle, and in France, before the flight to Japan.
- On D12 at 3:00 p.m. The tests were performed on the 1st day in Japan.
- On D14 at 3:00 p.m. The last tests were performed on the 3rd day in Japan and corresponded to the end of the phase adjustment period.

The Wingate test is a 30-sec all-out sprint test against a constant resistance that assesses anaerobic performance (4). The ME5 consists in developing maximal power output over 5-min. This test is a good predictor of the maximal aerobic power and thus of the power output reached at maximal oxygen uptake (1). Strong verbal encouragements were given to subjects during the tests.

These tests were performed on an indoor Hammer H2 trainer (Cycleops, Wisconsin, USA) with the athlete's own bike. This indoor trainer was validated against the crank based power meter SRM (SRM, Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Germany) to measure the power output (30). The resistance set-up on the indoor trainer for the Wingate and ME5 tests were determined in pre-experimentations.

During the Wingate test, mean power (Pmean in W and W.kg⁻¹), maximal power (Pmax expressed in W and W.kg⁻¹), minimal power (Pmin expressed in W and W.kg⁻¹), and fatigue index (%) were calculated. Pmean is the average power

sustained throughout the 30-sec. Pmax is the highest mechanical power elicited during the test. Pmin is the minimal mechanical power elicited during the test. Fatigue index is determined from the decline in power and represents (Pmax-Pmin)/Pmax. During the ME5, only Pmean (W and W.kg⁻¹) sustained throughout the 5-min was calculated.

Athletes were equipped for the ME5 with a breath-by-breath portable gas analyzer (Metamax 3B-R2, Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Germany) and a heart rate monitor (Polar H7, Polar Electro Oy, Kempele, Finland). Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$ ml.kg⁻¹.min⁻¹ and L.min⁻¹), ventilation minute ($\dot{V}E$, L.min⁻¹), respiratory exchange ratio (RER), heart rate (HR, bpm) and ventilatory equivalent ratio for oxygen ($\dot{V}E / \dot{V}O_2$) values were collected. In all performance tests, participants were not allowed to see their results from the beginning to the end of the study.

Statistical analyses

Statistical analyses were performed using JASP (Jeffrey's Amazing Statistics Program) software version 0.11.1 (University of Amsterdam). Data are presented as mean ± standard deviation (SD). The normality of data distribution was assessed using the Shapiro–Wilk test. As all distributions were normal, time factor was performed for each variable using one-way repeated measures ANOVA with a level of significance set at $p \leq 0.05$. Greenhouse-Gaisser corrections were applied when appropriate. Significant effects were specified by Holm post hoc testing for PSG, Actigraphy, CBT and physical performance data compared to baseline period (i.e. D1 for PSG, D1 to D3 for actigraphy as well as CBT and D1 and D3 for physical performances). Significant differences were appreciated using effect-size analysis (ES), categorized using the thresholds of ≤ 0.2 trivial, 0.21 to 0.60 small, 0.61 to 1.20 moderate, 1.21 to 2.0 large and > 2.0 very large (24) and Confidence Intervals (CI 90%).

Results

Polysomnography data (PSG)

PSG data are presented in Table 1. The phase advance period did not modify sleep composition. Indeed, TST, TIB, WASO, awake time, TTN1, TTN2, TTN3, TTREM, N1, N2, N3 and REM percentages were not significantly different at D9 compared to baseline values recorded at D1. As per protocol, bedtime was earlier on D9 (7:48 ± 00:26 p.m.) compared to the bedtime on D1 (10:49 ± 00:06 p.m.; $p \leq 0.001$, ES = 3.1, CI 90%: 02:18-03:43). However, despite a large increase (ES = 1.5), SOL on D9 was not significantly different (48 ± 23 min; $p = 0.08$, CI 90%: 0-76) from D1 (10 ± 7 min on D1).

As for the phase advance period, the phase adjustment period did not change sleep composition on D11 or on D13. Only bedtime appeared earlier on D11 (10:09 ± 00:12 p.m.) and D13 (10:18 ± 00:11 p.m.) compared to D1 (10:49 ± 00:06 p.m.; $p \leq 0.01$, ES = 6.2, CI 90%: 00:21-00:59 and $p \leq 0.01$, ES = 2.0, CI 90%: 00:08-00:51, respectively). Furthermore, SOL was higher only on D11 (24 ± 18 min) compared to that measured at D1 (10 ± 7 min; $p \leq 0.05$, ES = 2.3, CI 90%: 2-10).

Table 1: Polysomnography data on baseline (D1), phase advance (D9) and phase adjustment (D11 and D13) periods

	Baseline	Phase advance	Phase adjustment	
	1 st night D1	Last night D9	1 st night D11	Last night D13
Bedtime (h:min)	10:49±00:06 p.m.	7:48±00:26 p.m. ***	10:09±00:12 p.m. **	10:18±00:11 p.m.
TIB (h)	9.1±0.4	9.3±0.8	9.5±0.5	8.9±0.3
TIB (min)	544.4±23.9	569.8±46.5	567.0±29.1	532.3±17.4
TST (h)	8.5±0.4	7.9±0.9	8.0±1.2	8.0±0.4
TST (min)	508.8±24.8	472.7±54.3	479.7±73.6	477.3±22.6
SE (%)	93.5±3.2	84.5±7.1	84.6±11.7	89.7±3.6
SOL (min)	9.8±7.2	48.0±22.9 #	23.7±18.1	17.0±5.7
WASO (min)	30.2±13.8	17.6±11.1	60.5±59.4 *	32.3±24.7
Awake (%)	5.9±2.7	3.9±2.9	14.3±15.8	6.9±5.5
TTN1 (min)	29.1±24.0	20.5±6.2	19.3±7.7	26.5±8.5
N1 (%)	5.9±4.4	4.4±1.7	3.5±1.3	5.5±1.8
TTN2 (min)	258.8±30.8	238.6±25.4	240.6±40.5	231.0±21.4
N2 (%)	59.9±6.7	59.7±3.0	46.4±8.1	47.7±3.1
TTN3 (min)	108.0±4.8	99.7±13.3	109.3±15.0	102.9±6.5
N3 (%)	20.7±0.3	20.7±0.9	21.1±3.4	21.1±0.8
TTREM (min)	110.5±5.8	114.7±22.0	116.8±24.5	116.9±9.5
REM (%)	21.4±0.6	23.7±1.8	22.3±3.4	24.0±2.2
Sleep quality (%)	43.0±1.8	45.1±2.5	47.0±1.7	46.1±2.0

Values expressed as mean ± SD. TIB: time in bed; TST: total sleep time; SE: sleep efficiency; SOL: sleep onset latency; WASO: wake after sleep onset; TTN1: total time in stage 1; TTN2: total time in stage 2; TTN3: total time in stage 3; TTREM total time in rapid-eye movement sleep; REM: rapid eye movement; sleep quality = (total time in stage 3 + REM)/total sleep time. # p = 0.08; * p ≤ 0.05; ** p ≤ 0.01; *** p ≤ 0.001 vs. baseline period.

Actigraphic data

Only bedtime and wake-up time occurred earlier on D9 (7:49 ± 00:29 p.m. and 4:52 ± 00:13 a.m.) compared to those observed on baseline period (10:41 ± 00:45 p.m. and 7:47 ± 00:31 a.m.; p ≤ 0.01, ES = 4.1 and 5.7, CI 90%: 01:12-04:32 and 01:55-03:54, respectively) Moreover, bedtime and wake-up were largely advanced on D10 (6:38 ± 00:56 p.m. and 2:56 ± 00:13 a.m.) in comparison with the baseline period (p ≤ 0.01 and p ≤ 0.001, ES = 6.5 and 3.7, CI 90%: 02:08-05:58 and 03:23-06:18, respectively). Conversely, no significant difference was noted for other variables, whether after phase advance, during the travel or at destination, compared to values recorded during baseline period (from D1 to D3).

Core body temperature data (CBT)

During the baseline period, batyphase appeared at 4:28 ± 00:30 a.m. with a nadir value of 36.1 ± 0.1°C. At the end of the phase advance period (D9), batyphase occurred at 1:54 ± 01:26 a.m. with a nadir at 36.0 ± 0.2 °C but the difference was not statistically significant (p = 0.07, ES = 1.5, CI 90%: 00:11-05:24) compared to baseline. During the travel period, batyphase significantly shifted to 1:52 ± 01:07 a.m. with a nadir of 35.9 ± 0.2°C compared to that of the baseline period (p ≤ 0.05, ES = 1.8, CI 90%: 00:56-04:16). At destination, CBT quickly resynchronized since batyphase appeared at 6:08 ± 01:06 a.m. (nadir: 35.8 ± 0.2°C) and 5:07 ± 00:56 a.m. (nadir: 36.1 ± 0.3°C) at D11 and D13, respectively, without significant difference compared to the baseline period.

Figure 2 illustrates a view of sleep-wake rhythm (obtained by actigraphy) and CBT circadian rhythm on the entire protocol. Advance of sleep-wake schedules was progressive from D4 to D9 and was confirmed on D10. At the same time, CBT nadir shifted in parallel with sleep-wake rhythm. On arrival, the sleep-wake rhythm resynchronized to the new time despite the 7 h jet lag, whereas CBT rhythm took longer to recover baseline batyphase. Only after 3 days in Japan had CBT recovered the baseline rhythm. WASO was comprised between 35 min and 54 min throughout the protocol. It only increased during travel to reach 88 min.

Physical performance variables

During the Wingate test, Pmean, Pmax, Pmin and fatigue index were not significantly different whether exercise was performed at 3:00 p.m. (D1) or 8:00 a.m. (D3). No significant main effect of phase advance (D10) or phase adjustment (D12 and D14) was observed. During ME5 test, Pmean developed at D1 was not different to that recorded at D3 and after the phase advance (D10) or phase adjustment (D12 and D14). Furthermore, none of cardiorespiratory parameters (VO₂, VE, RER, HR and VE/VO₂) were changed on D3, after the phase advance (D10) or phase adjustment period (D12 and D14).

Table 1:

Actigraphy data during baseline (D1 to D3), phase advance (D9), travel (D10) and phase adjustment (D11 and D13) periods.

	Baseline	Phase advance	Travel	Phase adjustment	
	all nights D1 to D3	Last night D9	Night D10	1 st night D11	Last night D13
Bedtime	10:41±00:45 p.m.	7:49±00:29 p.m.***	6:38±00:56 p.m. **	10:10±00:11 p.m.	10:15±00:07 p.m.
SOL (min)	6.8±2.9	6.6±1.5	14.6±15.8	7.4±3.1	5.8±4.2
Wake-up time	7:47±00:31 a.m.	4:52±00:13 a.m.	2:56±00:33 a.m.	7:42±00:21 a.m.	7:09±00:13 a.m.
WASO (min)	45.8±15.6	42.2±20.1**	88.4±98.5***	47.4±11.0	54.3±12.8*
TIB (h)	9.1±0.6	9.1±0.6	8.3±0.9	9.5±0.4	9.2±0.2
TIB (min)	545.5±36.5	543.8±37.9	498.4±51.7	568.2±25.8	549.8±11.0
TST (h)	8.2±0.4	8.3±0.8	6.6±1.4	8.6±0.5	8.2±0.3
TST (min)	493.0±25.1	495.0±45.3	395.4±85.1	513.4±30.7	489.8±16.7
SE (%)	90.5±2.4	91.0±3.7	80.4±19.0	90.3±2.0	89.1±1.9

Values expressed as mean ± SD. SOL: sleep onset latency; WASO: wake after sleep onset; TIB: time in bed; TST: total sleep time; SE: sleep efficiency. * p ≤ 0.05; ** p ≤ 0.01; *** p ≤ 0.001 vs. baseline period.

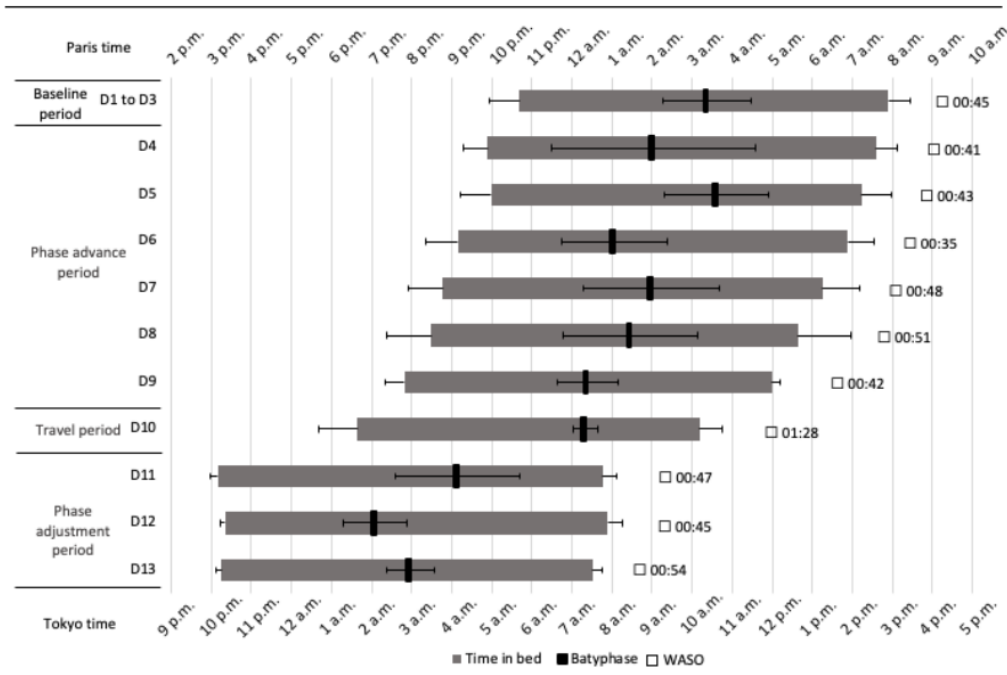


Figure 2. Actigraphy data [Bedtime (mean and SD), time in bed (mean), get-up time (mean and SD), WASO (mean)] and batyphase of core body temperature (mean and SD) during baseline (D1 to D3), phase advance (D4 to D10), travel (D10 to D11) and phase adjustment (D11 to D14) periods.

Discussion

Long-haul flights over several time zones cause both travel fatigue and jet lag. The most obvious consequences of jet lag in athletes are poor sleep at night, excessive daytime sleepiness, and weakened mental and physical performances. These occur because the human circadian system cannot immediately adapt to a new time zone. Therefore, this study evaluated in elite athletes, the effects on nocturnal sleep architecture and physical performances of a gradual shift of sleep-wake schedules, using timed ingestion of exogenous melatonin and light exposure, to facilitate adaptation of the circadian system to a new time zone. Once at destination and for the 3 following days, the sleep-wake cycle was adjusted to the local time, with continued administration of melatonin in the

evening and light therapy upon waking. To date, the efficacy of such a strategy, aimed at reducing the deleterious effects of jet lag after a rapid time-zone shift of 7 h eastwards (France to Japan), has never been studied in field-based settings in elite athletes. The potential advantages of pre-adjusting the internal clock are that it may help reduce sleep disruption at the arrival time zone, and limit the magnitude and duration of jet lag symptoms.

Our results indicate that a gradual advance of sleep-wake rhythm of 3 h over 6 days before departure, combined with ingestion of melatonin 2 h before bedtime and light therapy on waking, made it possible to limit the dramatic changes that are usually observed with eastward travel, especially by maintaining the quantity and composition of sleep. Only SOL as assessed by PSG tended to increase on D9, i.e. the last night

of the phase advance period, which might be due to the environmental conditions, especially noise in the hotel not conducive to falling asleep. Unfortunately, the data obtained in the present study do not provide any explanation for this result. Moreover, the 12 h long-haul eastward travel that took place after the phase advance period, increased only SOL, whereas the quantity and composition of sleep once at destination were not affected. Furthermore, neither the phase advance nor the long-haul travel impacted aerobic and anaerobic performances.

Several authors have already shown that a phase advance of sleep-wake did not modify sleep quantity or sleep efficiency (8,12,13,15,37). For instance, Burgess et al. (8) found, in healthy adults, that a gradual advance of the sleep-wake schedules (1 h each day over 3 days), associated with morning bright light exposure (mean intensity of 6300 lux) for 3.5 h, reduced the total sleep time only during the 1st night. Other studies, using progressively advancing schedules, combined with different modalities of melatonin administration or bright light exposure, have not reported nocturnal sleep abnormalities (12,13,15,37). It should be noted that, in these latter studies, sleep was measured only by actigraphy or using a sleep diary. The originality of the present study is that sleep was measured by ambulatory PSG in a field-based setting. To the best of our knowledge, no study to date has been specifically designed to assess the impact of a phase advance period on subsequent composition and sleep architecture, in very high-level athletes, preparing for an international competition. The maintenance of sleep structure and sleep duration may be explained by the phase advance of CBT, with a batyphase shifted by 2.5 h after 6 days (ES = 1.5, i.e. a misalignment of 30-min with the sleep-wake rhythm).

Revell et al. (37) tested phase advancing strategies among healthy young adults with afternoon melatonin, morning intermittent bright light and gradually advancing sleep schedules. They observed very little circadian misalignment, while DLMO was advanced by 2.5 h, and subjects did not experience side effects or jet lag type symptoms. More recently, Crowley and Eastman (12,13) also reported that a similar advance of sleep-wake induced a shift of DLMO either by 1.8 h with 0.5 mg of melatonin combined with 30-min of morning bright light exposure, or by 1.3 h with 3 mg of melatonin without bright light exposure. DLMO is the most accurate marker for assessing the circadian pacemaker but its determination is difficult to apply in high level athletes. Telemetric core body temperature systems are fundamental to the study of human temperature regulation (33).

As show by Revell et al. (37), co-administration of melatonin and bright light is more effective to phase shift human circadian rhythms than administration of melatonin alone. Based on these observations, our strategy, combining co-administration of melatonin and light therapy, enabled our athletes to arrive in Japan with their circadian rhythms already partially resynchronized to local time. Moreover, at destination, the higher dose of melatonin probably facilitates initial sleep. Indeed, the phase advance response curve of the melatonin administration is similarly sized, regardless of the dose intake, but there is a potentially greater soporific effect with increasing doses (9).

During the flight, given that it was impossible to perform a PSG, athletes wore an actimeter on their wrist to enable us to monitor sleep, which was not affected. However, these results should be interpreted with caution, since actigraphy has some limitations for assessing sleep in flight (17). In order to respect bedtime and wake-up times corresponding to those of the end of the phase advance period, the flight schedules were chosen accordingly. The non-stop night flight between Paris

(take-off at 3:40 p.m.) and Tokyo (landing at 12:45 p.m.) made it easier for the athletes to sleep through the flight.

On the 1st night at destination, CBT batyphase already occurred at 6:08 a.m., Japanese time, which indicates that the chronobiological rhythms had already shifted by 5.3 h (out of the 7 h time zones). It shifted to 6.3 h on the 3rd night with a batyphase at 5:07 a.m. If the strategy implemented in this study was effective, more days of preflight strategy would have been necessary to obtain a larger phase advance of rhythms.

Variations in the human circadian rhythm have been shown (23) depending on the relative strength of photoperiod (40), namely in the times of sunrise and sunset. The present study took place in autumn, a period during which the times of sunrise and sunset differ between France and Japan. Indeed, in France, they occur respectively at 7:45 a.m. and 07:30 p.m. while in Japan, they appeared at 5:45 a.m. and 05:30 p.m. The earlier time of sunrise in Japan contributed to a faster adjustment of the CBT rhythm, since light is one of the most powerful zeitgebers of biological rhythms (3). Furthermore, phase advance might be less impactful for athletes than it would have been in summer when exposure to daylight is greater.

As expected, physical performances and cardiorespiratory variables were maintained not only after the gradual phase advance of sleep-wake schedules, but also after the eastward international travel. To date, studies are lacking into the effects of a phase shift preceding such a trip to the east, in terms of physiological responses to anaerobic and aerobic exercises in athletes. Consequently, no compelling evidence exists demonstrating that a phase advance influences athletic performance in athletes. Several field studies of the relationships between athletic performances and jet lag have reported that travel across several time zones is accompanied by poor performances, such as reduced grip strength (29,34), or lower jumping performance (11,18). This was mainly explained by disruption of circadian rhythms, sleep disorders or travel fatigue (36). Conversely, Bullock et al. (7), reported no change in 30 m sprint time after 24 h of eastward travel across 16 time zones in elite skeleton athletes.

One of the objectives of our previous study by Petit et al. (32) was to evaluate the effectiveness of a simulated, 5 h advance phase shift of the sleep-wake cycle, in high level athletes, on the physiological responses to a short exercise (Wingate test). We found that phase advance did not markedly alter peak power and fatigue index during the anaerobic exercise. However, it should be noted that in that study, the strategy of phase advance was different from that implemented here, since it was not progressive and was simulated in laboratory conditions, therefore without the constraining conditions of flight.

As regards physical performance data, the maintenance of performance may result from the incomplete but rapid phase adjustment of CBT and be linked to sleep being undisturbed by the phase advance and the flight. In addition, the 12 h non-stop flight likely caused less travel fatigue compared to longer travel (7). Finally, although the choice of tests (i.e. Wingate test and 5-Min Maximal Exercise) was specific to the cycling discipline (MTB XCO), the performances were measured in laboratory conditions, without considering technical skills related to the discipline. Thus, our results may be not fully reflective of the true physical performances that could have been achieved in the real competition.

Practical applications

Our results suggest that coaches and support staff can propose a gradual advance of sleep-wake schedules, followed by a phase adjustment with evening melatonin administration and bright light upon waking, to prepare their athletes before an eastward flight. This strategy is effective, without altering sleep and physical performances. Phase advance and phase adjustment at destination may be facilitated with evening melatonin administration and light therapy upon waking. The phase adjustment period contributes to countering the harmful effects of jet lag by maintaining sleep duration, sleep patterns and physical performances after an eastward flight.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Sleep Medicine Center Ellipse for technical support, Fanny Capellier for technical advice, Fiona Ecarnot for editorial assistance and Philippe Gimenez for statistical analysis guidance. The authors would like to address a special word of thanks to the athletes who took part in the study. They would like to acknowledge Philippe Chanteau, Marc Colom, Tom Lejeune and Olivier Maignan, the personal trainers of athletes for the trust accorded. They are grateful to Mathieu Nadal, national trainer of the French Cycling Federation and to the bike mechanics of the federation for technical assistance. The authors also express their gratitude to Jacky Maillot, doctor of the French national mountain bike team for the confidence in carrying out this study.

References

- Allen, H, Coggan, AR, and McGregor, S. Training and racing with a power meter. VeloPress, 2010.
- American Academy of Sleep Medicine. International classification of sleep disorders. 3rd ed. 2014.
- Arendt, J. Approaches to the Pharmacological Management of Jet Lag. *Drugs* 78: 1419–1431, 2018.
- Bar-Or, O. The Wingate anaerobic test. An update on methodology, reliability and validity. *Sport Med* 4: 381–394, 1987.
- Berry, RB, Quan, SF, Abreu, AR, Bibbs, ML, DelRosso, L, Harding, SM, et al. The AASM manual for the scoring of sleep and associated events: rules, terminology and technical specifications. American Academy of Sleep Medicine, 2020.
- Bongers, CCWG, Daanen, HAM, Bogerd, CP, Hopman, MTE, and Eijsvogels, TMH. Validity, Reliability, and Inertia of Four Different Temperature Capsule Systems. *Med Sci Sports Exerc* 50: 169–175, 2018.
- Bullock, N, Martin, DT, Ross, A, Rosemond, D, and Marino, FE. Effect of long haul travel on maximal sprint performance and diurnal variations in elite skeleton athletes. *Br J Sport Med* 41: 569–73, 2007.
- Burgess, HJ, Crowley, SJ, Gazda, CJ, Fogg, LF, and Eastman, CI. Preflight adjustment to eastward travel: 3 days of advancing sleep with and without morning bright light. *J Biol Rhythm* 18: 318–328, 2003.
- Burgess, HJ, Revell, VL, Molina, TA, and Eastman, CI. Human phase response curves to three days of daily melatonin: 0.5 mg Versus 3.0 mg. *J Clin Endocrinol Metab* 95: 3325–3331, 2010.
- Burke, TM, Markwald, RR, Chinoy, ED, Snider, JA, Bessman, SC, Jung, CM, et al. Combination of light and melatonin time cues for phase advancing the human circadian clock. *Sleep* 36: 1617–1624, 2013.
- Chapman, DW, Bullock, N, Ross, A, Rosemond, D, and Martin, DT. Detrimental effects of West to East transmeridian flight on jump performance. *Eur J Appl Physiol* 112: 1663–1669, 2012.
- Crowley, SJ and Eastman, CI. Melatonin in the afternoons of a gradually advancing sleep schedule enhances the circadian rhythm phase advance. *Psychopharmacology (Berl)* 225: 825–837, 2012.
- Crowley, SJ and Eastman, CI. Phase advancing human circadian rhythms with morning bright light, afternoon melatonin, and gradually shifted sleep: can we reduce morning bright-light duration? *Sleep Med* 16: 288–297, 2015.
- Dijk, DJ, Duffy, JF, Silva, EJ, Shanahan, TL, Boivin, DB, and Czeisler, CA. Amplitude reduction and phase shifts of Melatonin, cortisol and other circadian rhythms after a gradual advance of sleep and light exposure in humans. *PLoS One* 7: e30037, 2012.
- Eastman, C, Gazda, CJ, Burgess, HJ, Crowley, SJ, and Fogg, LF. Advancing Circadian Rhythms Before Eastward Flight: A Strategy to Prevent or Reduce Jet Lag. *Sleep* 28: 33–44, 2005.
- Eastman, CI and Burgess, HJ. How to Travel the World Without Jet Lag. *Sleep Med Clin* 4: 241–255, 2009.
- Fowler, PM, Duffield, R, Morrow, I, Roach, G, and Vaile, J. Effects of sleep hygiene and artificial bright light interventions on recovery from simulated international air travel. *Eur J Appl Physiol* 115: 541–553, 2015.
- Fowler, PM, Knez, W, Crowcroft, S, Mendham, AE, Miller, J, Sargent, C, et al. Greater Effect of East versus West Travel on Jet Lag, Sleep, and Team Sport Performance. *Med Sci Sports Exerc* 49: 2548–2561, 2017.
- Garbellotto, L, Petit, E, Brunet, E, Gillet, V, Bourdin, H, and Mouglin, F. Complete sleep evaluation of top professional cross-country mountain bikers athletes. *J Sports Med Phys Fitness* 62: 265–272, 2022.
- Harriss, DJ, MacSween, A, and Atkinson, G. Standards for ethics in sport and exercise science research: 2018 update. *Int J Sports Med* 38: 1126–1131, 2017.
- Hays, A, Devys, S, Bertin, D, Marquet, L, and Brisswalter, J. Understanding the Physiological Requirements of the Mountain Bike Cross-Country Olympic Race Format. *Front Physiol* 9: 1062, 2018.
- Herxheimer, A and Petrie, KJ. Melatonin for the prevention and treatment of jet lag. *Cochrane Database Syst Rev* CD001520, 2002.
- Honma, K, Honma, S, Kohsaka, M, and Fukuda, N. Seasonal variation in the human circadian rhythm: dissociation between sleep and temperature rhythm. *Am J Physiol Integr Comp Physiol* 262: R885–R891, 1992.
- Hopkins, WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sport Med* 30: 1–15, 2000.
- Horne, JA and Östberg, O. Individual differences in human circadian rhythms. *Biol Psychol* 5: 179–190, 1976.
- Hoshikawa, M, Uchida, S, and Dohi, M. Effect of pre-flight circadian phase-shifting approach on sleep variables after 9 time-zone eastward transition: a

- case report. *Sleep Biol Rhythms* 16: 457–461, 2018.
27. Leatherwood, WE and Dragoo, JL. Effect of airline travel on performance: A review of the literature. *Br J Sports Med* 47: 561–567, 2013.
 28. Lee, A and Galvez, JC. Jet Lag in Athletes. *Sports Health* 4: 211–216, 2012.
 29. Lemmer, B, Kern, RI, Nold, G, and Lohrer, H. Jet lag in athletes after eastward and westward time-zone transition. *Chronobiol Int* 19: 743–764, 2002.
 30. Lillo-Bevia, J and Pallarés, JG. Validity and reliability of the cycleops hammer cycle ergometer. *Int J Physiol Perform* 13: 853–859, 2018.
 31. Paul, MA, Miller, JC, Gray, GW, Love, RJ, Lieberman, HR, and Arendt, J. Melatonin treatment for eastward and westward travel preparation. *Psychopharmacology (Berl)* 208: 377–386, 2010.
 32. Petit, E, Mougin, F, Bourdin, H, Tio, G, and Haffen, E. Impact of 5-h phase advance on sleep architecture and physical performance in athletes. *Appl Physiol Nutr Metab* 39: 1230–1236, 2014.
 33. Reid, KJ. Assessment of Circadian Rhythms. *Neurol Clin* 37: 505–526, 2019.
 34. Reilly, T, Atkinson, G, and Budgett, R. Effect of low-dose temazepam on physiological variables and performance tests following a westerly flight across five time zones. *Int J Sports Med* 22: 166–174, 2001.
 35. Reilly, T, Atkinson, G, Edwards, B, Waterhouse, J, Åkerstedt, T, Davenne, D, et al. Coping with jet-lag: A Position Statement for the European College of Sport Science. *Eur J Sport Sci* 7: 1–7, 2007.
 36. Reilly, T, Waterhouse, J, and Edwards, B. Jet lag and air travel: Implications for performance. *Clin Sports Med* 24: 367–380, 2005.
 37. Revell, VL, Burgess, HJ, Gazda, CJ, Smith, MR, Fogg, LF, and Eastman, CI. Advancing Human Circadian Rhythms with Afternoon Melatonin and Morning Intermittent Bright Light. *J Clin Endocrinol Metab* 91: 54–59, 2006.
 38. Roach, GD and Sargent, C. Interventions to Minimize Jet Lag After Westward and Eastward Flight. *Front Physiol* 10: 1–11, 2019.
 39. Samuels, CH. Jet Lag and Travel Fatigue: A Comprehensive Management Plan for Sport Medicine Physicians and High-Performance Support Teams. *Clin J Sport Med* 22: 268–273, 2012.
 40. Yoneyama, S, Hashimoto, S, and Honma, K. Seasonal changes of human circadian rhythms in Antarctica. *Am J Physiol Integr Comp Physiol* 277: R1091–R1097, 1999.

PUBLICATION N°3

COMPARISON OF TWO STRATEGIES TO MINIMIZE JET LAG AFTER AN EASTWARD FLIGHT IN OLYMPIC CYCLISTS

Garbellotto L., Petit E., Brunet E., Gillet V., Bourdin H., Cassirame J., Mougin F.

Soumis dans : Res. Q. Exerc. Sport.

1. Rationnel

Comme pour les épreuves de VTT XCO, en cyclisme traditionnel, les compétitions internationales les plus importantes se déroulent le plus souvent en Europe (à titre d'exemple, en 2022, sur les 33 compétitions World Tour en cyclisme sur route, seule une compétition a eu lieu hors Europe). Par conséquent, les meilleurs cyclistes français sont peu habitués à gérer le décalage horaire. Malgré les bénéfices démontrés d'une stratégie d'avance du rythme veille-sommeil précédant un vol avec la traversée de 7 fuseaux horaires, telle qu'étudiée chez les vététistes, les routiers ne pouvaient pas anticiper ce décalage horaire. En effet, le profil du parcours de la course lors des JO de Tokyo correspondait aux meilleurs grimpeurs et ces meilleurs cyclistes français, pressentis pour participer aux JO de Tokyo, participaient aussi au Tour de France, qui se terminait seulement 7 jours avant la course en ligne.

Dans la publication 2, nous avons, montré qu'une stratégie d'avance progressive de l'horaire du coucher, avant le vol en direction de Tokyo, suivie d'une période de resynchronisation à destination avec prise vespérale de mélatonine et luminothérapie au réveil, n'altérait ni le sommeil, ni les performances physiques et cognitives. Cette stratégie ne permettait pas, pour autant, de savoir si une resynchronisation active, mise en place seulement à destination, était suffisamment efficace pour ajuster aussi rapidement l'horloge biologique sur le nouveau fuseau horaire. De ce fait, nous avons, avec l'équipe encadrante et la cellule Recherche & Performance de la FFC, proposé à ces routiers, à l'occasion aussi du « Test event », une stratégie différente, avec une simple resynchronisation active, dès l'arrivée, consistant, durant 5 jours, en une prise de mélatonine de 2 mg et de la luminothérapie pendant 20 min. Ce protocole, réalisée en 2019, avait pour objectif de placer les athlètes dans la même configuration que celle qu'ils retrouveraient au moment des JO, avec un vol tardif au départ de Paris-Charles de Gaulle, l'arrivée du tour de France se faisant au Champs-Élysées le jour même, en fin de journée.

D'un point de vue scientifique, l'objectif de cette étude était de comparer cette intervention à celle mis en place dans l'étude 2 sur le rythme veille-sommeil et sur le rythme de la température interne.

2. Matériels et méthodes

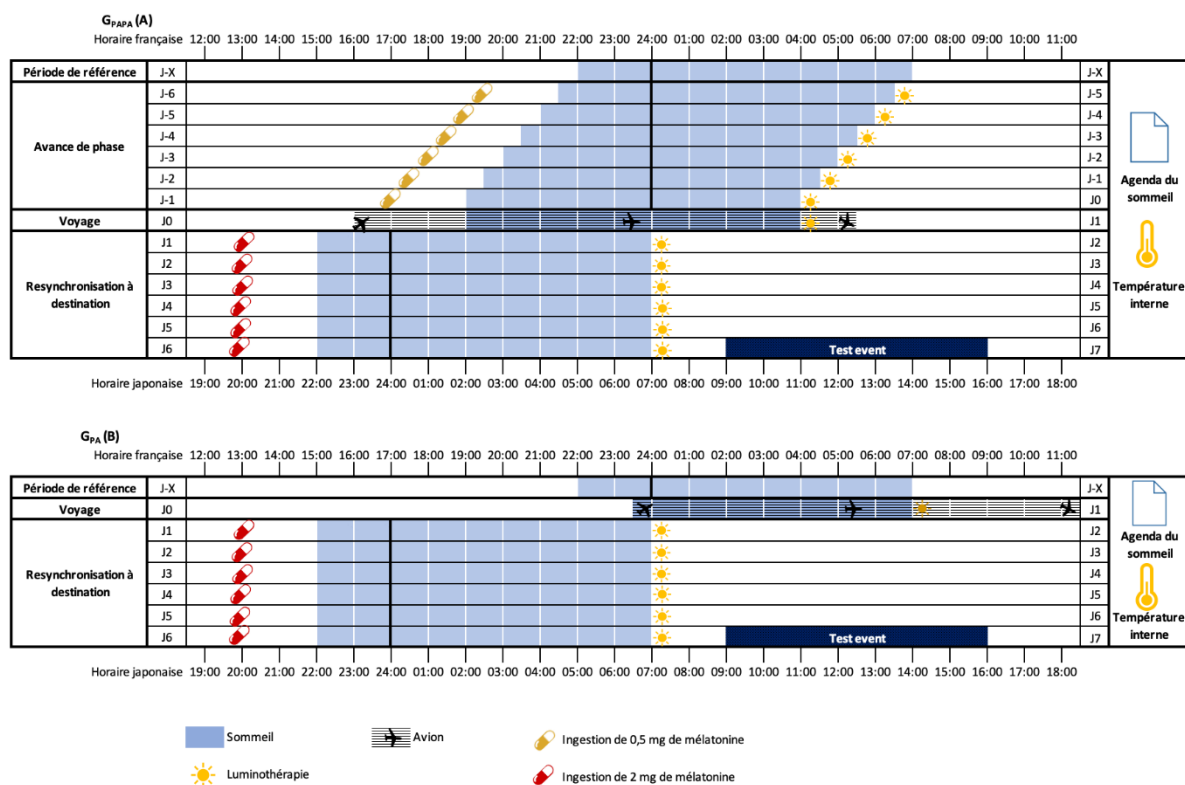
2.1 Design de l'étude

Dans cette étude, 2 groupes de cyclistes ont été constitués : le groupe de cyclistes VTT XCO de l'étude 2 et un groupe de cyclistes spécialistes de la route. Pour les 2 groupes, un mois avant la compétition, le rythme veille-sommeil et celui de la température interne étaient évalués durant 7 jours.

Pour chaque groupe, la stratégie, décrite sur les Figures 28 A et B, était donc différente. La première stratégie, réalisée par les cyclistes spécialistes du VTT XCO (nommée G_{PAPA} , pour « phase advance and phase adjustment ») est celle décrite dans le design de l'étude 2. Brièvement, 5 jours avant le vol (J-6 à J-1) l'horaire de coucher était progressivement avancé de 30 min chaque jour selon le rythme veille-sommeil individuel de chaque athlète. Les horaires des repas et des entraînements étaient aussi avancés de la même façon. Durant l'avance de phase, 0,5 mg de mélatonine à libération rapide était administré 2 h avant l'heure du coucher et 20 min une luminothérapie à 1500 lux était réalisée le matin au réveil. Le voyage en avion était réalisé en classe économique sur un vol sans escale de l'aéroport de Paris Charles De Gaulle (France, J0, départ 15h40) à l'Aéroport de Tokyo-Haneda (Japon, J1, arrivée à 12h45). À noter que les jours indiqués sur la figure 28 A, sont ceux correspondant à la figure de la publication 3, qui diffèrent légèrement de ceux mentionnés dans la publication 2. Durant le vol, les athlètes avaient pour consigne de respecter les horaires de sommeil de leur dernière nuit d'avance de phase. À destination, les athlètes devaient se resynchroniser le plus rapidement possible, en respectant les horaires du nouveau fuseau horaire (J1 à J7). La posologie de la mélatonine était augmentée à 2 mg et la luminothérapie était conservée selon les mêmes modalités que durant l'avance de phase.

La deuxième stratégie, réalisée par les cyclistes spécialistes de la route (nommée, G_{AS} , pour « adjustment strategy ») consistait à maintenir le rythme veille-sommeil habituel avant le vol sans modifier les horaires d'entraînement et de repas. Le voyage en avion était réalisé en classe économique sur un vol sans escale de l'aéroport de Paris Charles De Gaulle (France, J0, départ 23h25) à l'aéroport de Tokyo-Haneda (Japon, J1, arrivée à 20h30). Pendant le vol les athlètes devaient respecter le plus possible leur rythme veille-sommeil

habituel (en restant sur le fuseau horaire français). À destination, la même stratégie de resynchronisation que celle du G_{PAPA} , était proposée durant 5 jours (J1 à J7).



Figures 28 A et B : Protocole expérimental pour un athlète se couchant à 22 h et se levant à 7 h.

G_{PAPA} (A) : La période de référence (J-X) a été réalisée le mois précédant le voyage pour Tokyo selon le rythme veille-sommeil habituel des athlètes. L'heure du coucher était ensuite progressivement avancée de 30 min par jour durant 6 jours, entraînant une avance du rythme veille-sommeil de 3h (J-6 à J-1). À destination, les horaires de coucher ont été resynchronisés à l'heure japonaise (J1 à J6). La mélatonine était administrée à la dose de 0,5 mg, 2h avant le coucher de J-6 à J-1, puis la dose était augmentée à 2 mg de J1 à J6. Immédiatement après le réveil, de J-5 à J7, les athlètes étaient exposés à 20 min de luminothérapie à 1500 Lux.

G_{PA} (B) : La période de référence (J-X) a été réalisée le mois précédant le voyage pour Tokyo selon le rythme veille-sommeil habituel des athlètes. Avant le vol, les athlètes maintenaient leur rythme veille-sommeil habituel. A destination, la stratégie était identique à celle du G_{PAPA} .

2.2 Paramètres recueillis

Le sommeil et la température interne ont été suivis :

- Durant la période de référence (pour les G_{PAPA} et G_{PA}), noté ici J-X
- Dès l'avance de phase jusqu'à la fin de la période de resynchronisation, à destination pour le G_{PAPA} (J-6 à J7)

- Dès le départ pour le Japon jusqu'à la fin de la période de resynchronisation à destination pour le G_{PA} (J0 à J7).

Le sommeil était évalué par l'agenda du sommeil (décrit de façon détaillée dans la partie « revue de la littérature », page 52). Cet agenda permet de recueillir les informations sur le rythme veille-sommeil, le sommeil et les évènements associés. Les athlètes indiquaient chaque jour sur un agenda format papier : l'heure exacte du coucher, l'heure exacte du lever, les périodes de sommeil, les périodes sans sommeil, les périodes de somnolence et les horaires de siestes. Les variables suivantes étaient recueillies : l'heure du coucher (hh:mm), l'heure du lever (hh:mm), la latence d'endormissement (LE, min), le temps passé au lit (TPL, h), le temps total de sommeil (TTS, h), le temps d'éveil après endormissement (TEE, min) et l'efficacité du sommeil ($ES = TTS/TPL * 100$; %).

La température interne a été suivie, comme pour la publication 2, au moyen de capsules ingérables e-Celsius (BodyCap, France). Ces capsules enregistrent une donnée de température toutes les 30 secondes et sont ensuite envoyées au moniteur (e-Viewer®). Les données étaient téléchargées sur l'interface e-Performance Manager puis exportées dans un fichier CSV. Les données étaient analysées sous un tableur Excel, moyennées par période de 5 minutes. La valeur la plus faible correspondait au nadir (°C) et l'heure du nadir correspondait à la batyphase (h:min). Des représentations graphiques sur des périodes de 24 h ont permis de s'assurer que des artéfacts n'étaient pas pris en considération.

3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel Microsoft Excel 2019 (Microsoft Corporation, Redmond, États-Unis). Sur la période de référence, la moyenne et l'écart-type ont été calculés pour l'ensemble des athlètes. Les différences par rapport à la période de référence pour chaque groupe, ont été établies en utilisant la méthode des inférences bayésiennes « Magnitude Based Inference » (Hopkins *et al.* 2009). Les modifications pour chaque sujet étaient exprimées en différences par rapport à la période de référence. Les différences (exprimées en moyenne \pm écart-type), par rapport aux données observées lors de la période de référence ont été calculées à J-5, J-3, J-1, J0, J1, J3 et J5 pour le G_{PAPA} et à J0, J1, J3 et J5 pour le G_{PA}. Les limites de probabilité ont été calculées pour établir si chaque différence était inférieure, similaire ou supérieure au changement minimum détectable (« *the smallest worthwhile changes* », $0,2 \times$ écart-type) de la période de

référence. Ces changements ont été appréciés selon l'échelle suivante : 0 - 0,2 (insignifiant), 0,2 - 0,6 (petit), 0,6 - 1,2 (modéré) et 1,2 - 2,0 (important). Les rapports de chance (*odds ratio*) ont été calculés, pour évaluer les probabilités qualitatives, sur la batyphase de température interne et le TTS selon l'échelle suivante (Hopkins 2007) : < 0,5 %, certainement pas ; 0,5 - 5 %, très improbable ; 5 - 25 %, improbable ; 25 - 75 %, possible ; 75 - 95 % probable ; 95 - 99,5 % très probable ; > 99,5 %, certainement.

4. Résultats

Durant la période de référence, les athlètes se sont couchés à 22 h 46 ± 32 min, se sont levés à 7 h 38 ± 31 min, pour un TTS de 8,4 ± 0,5 h et une efficacité de sommeil de 94 ± 6,5 %. La batyphase de la température interne a eu lieu à 4 h 08 ± 40 min avec un nadir de température à 36,1 ± 0,2 °C (Tableau 10).

Les données des paramètres du sommeil et de la température interne sont présentées dans le Tableau 11.

Pour le G_{PAPA} , pendant l'avance de phase, l'heure du coucher a largement été avancée à J-5, J-3 et J-1 (-55,2 ± 17,5, -134,8 ± 27,1 and -173,2 ± 26,9 min respectivement) ainsi que durant le vol (-235,7 ± 53,5 min à J0). L'heure du lever a été avancée, modérément à J-5 (-27,8 ± 42,2 min), largement à J-3 (-97,0 ± 50,1 min) et J-1 (-161,2 ± 39,1 min). De même, durant le vol, l'heure du lever a été avancée (-290,0 ± 140,5 min à J0). A destination, l'heure du coucher a été systématiquement plus précoce que durant la période de référence, largement à J1 (-39,0 ± 31,0 min), modérément à J3 (-29,8 ± 29,0 min) et légèrement à J5 (-18,6 ± 23,7 min). Pour le G_{PA} , pendant le vol, l'heure du coucher a été largement retardée (147,3 ± 38,4 min à J0) et l'heure du lever modérément avancée (-19,0 ± 98,2 min à J0). A destination, l'heure du coucher a été largement retardée à J1 (39,8 ± 34,8 min), largement avancée à J3 (-65,3 ± 48,8 min) et modérément avancée à J5 (-37,8 ± 50,5 min). Pour l'heure du lever, les mêmes changements ont été observés, à savoir modérément retardée à J1 (19,8 ± 43,5 min) et largement avancée à J3 (-94,0 ± 32,6 min).

Pour le G_{PAPA} , pendant l'avance de phase, le TTS a été modérément augmenté à J-5, J-3 et J-1 (35,5 ± 39,8 ; 35,5 ± 36,4 et 23,0 ± 17,8 min respectivement), largement diminué à J0 (-89,5 ± 139,7 min) et modérément augmenté à J1 (36,3 ± 33,3 min).

Pour le G_{PA} , le TTS a été largement diminué à J0 ($-176,8 \pm 103,9$ min). A destination, le TTS était inchangé à J1, largement réduit à J3 ($-56,8 \pm 66,0$ min) et largement augmenté à J5 ($50,8 \pm 48,8$ min).

Pour le G_{PAPA} , la batyphase de la température interne était largement avancée à J-3 ($-71,9 \pm 7,5$ min), à J-1 ($-153,7 \pm 55,6$ min) et J0 ($-155,5 \pm 36,3$ min). A destination, elle a été largement retardée à J1 ($99,8 \pm 88,9$ min), à J3 ($39,6 \pm 25,8$ min) et modérément avancée à J5 ($-21,5 \pm 15,5$ min). Pour le G_{PA} , la batyphase a été largement retardée à J0 ($79,0 \pm 83,1$ min), à J1 ($170,6 \pm 139,7$ min), à J3 ($104,3 \pm 88,5$ min) et à J5 ($81,2 \pm 24,2$ min).

Tableau 10 : Caractéristiques physiques, paramètres du sommeil et température interne des deux groupes d'athlètes sur la période de référence.

	Tous les athlètes	G _{PAPA}	G _{PA}	
Caractéristiques	Âge (années)	26,4±4,2	26,7±5,5	26,0±1,4
	Taille (cm)	176,2±4,8	176,5±6,3	175,8±1,5
	Poids (kg)	64,2±5,5	64,7±5,3	63,5±6,6
Rythme veille-sommeil	Heure du coucher (h:min)	22h46±00h32	22h45±00h32	22h46±00h36
	Latence d'endormissement (min)	14±12	10±12	21±10
	Heure du lever (h:min)	7h38±00h31	7h30±00h36	7h50±00h18
	TEE (min)	10±28	1±2	24±43
	TPL (h)	9,0±0,5	8,8±0,5	9,2±0,4
	TPL (min)	538±28	529±31	551±21
	TTS (h)	8,4±0,5	8,5±0,5	8,3±0,6
	TTS (min)	507±31	512±28	499±39
Température interne	ES (%)	94,4±6,5	96,9±2,9	90,8±9,1
	Batypase	4h06±00h40	4h28±00h30	3h34±00h30
	Nadir (°C)	36,1±0,2	36,1±0,1	36,1±0,3

G_{PAPA} signifie groupe « Phase Advance and Phase Adjustment »

G_{PA} signifie groupe « Phase Adjustment »

TEE : temps d'éveil après endormissement ; TPL : temps passé au lit ; TTS : temps total de sommeil ; ES : efficacité du sommeil.

Tableau 11 : Données du sommeil et de la température interne dans les deux stratégies, de J-5 à J5 pour G_{PAPA} et de J0 à J5 pour G_{PA} , comparées aux valeurs de la période de référence.

		G_{PAPA}							G_{PA}			
		J-5	J-3	J-1	J0	J1	J3	J5	J0	J1	J3	J5
Paramètres du sommeil	Heure du coucher (min)	-55,7±17,5***	-134,8±27,1***	-173,2±26,9***	-235,7±53,5***	-39,0±31,0***	-29,8±29,0**	-18,5±23,7*	147,3±38,4***	39,8±34,8**	-65,3±48,8***	-37,8±50,5**
	LE (min)	-4,0±13,7*	-5,7±13,3*	-5,7±11,8*	-9,0±12,1**	-7,3±13,0**	-9,0±12,0**	-4,7±7,9*	-11±8,9**	-1,0±10,9	-8,5±11,8**	-4,8±6,2*
	Heure du lever (min)	-27,8±42,2**	-97,0±50,1***	-161,2±39,1***	-290±140,5***	-3,7±48,0	-7,0±47,2	4,7±37,4	-19±98,2**	19,8±43,5**	-94,0±32,6***	-14,0±24,7*
	TEE (min)	0,5±5,5	5,5±17,0	-1,2±2,8	47,2±7,5***	3,8±13,0	1,3±7,1	-1,3±2,8	20,5±24,1***	24,5±21,5***	-13,2±21,5***	-24,5±43,8***
	TPL (min)	27,8±38,6**	37,8±49,6***	12,0±27,6*	-54,7±107,1***	35,3±21,6***	22,8±41,6**	23,2±40,6**	-166,3±68,4***	-20,0±47,1**	-28,8±17,3***	23,9±50,5**
	TTS (min)	35,5±39,8***	35,5±36,4***	23,0±17,8**	-89,5±139,7***	36,3±33,3***	24,7±42,6**	29,0±30,7**	-176,8±103,9***	3,3±28,1	-56,8±66,0***	50,8±48,8***
	ES (%)	1,4±3,6*	0,2±4,2	2,1±2,5**	-16,4±34,8***	0,4±4,4	0,4±5,8	1,2±2,6*	-8,6±16,6**	1,3±6,9	-6,1±11,9**	4,9±7,0*
Température interne	Batyphase (min)	11,8±48,5	-71,9±7,5***	-153,7±55,6***	-155,6±36,3***	99,8±35,4***	39,6±25,8**	-21,5±15,5**	79,0±83,1***	170,6±139,7***	104,3±88,5***	81,2±24,2***
	Nadir (°C)	0,10±0,15**	-0,09±0,12**	-0,06±0,20*	-0,20±0,22**	-0,32±0,22***	-0,03±0,25*	-0,20±0,13***	-0,17±0,33*	-0,00±0,22	-0,12±0,13*	0,28±0,21**

G_{PAPA} signifie groupe « Phase Advance and Phase Adjustment »

G_{PA} signifie groupe « Phase Adjustment »

Données exprimées en moyenne ± ET ; TEE : temps d'éveil après endormissement ; LE : latence d'endormissement ; TPL : temps passé au lit ; TTS : temps total de sommeil ; ES : efficacité du sommeil. * lorsque de petites différences étaient observées ; ** lorsque de moyennes différences étaient observées ; *** lorsque de grandes différences étaient observées.

5. Discussion

Cette étude a montré que la stratégie mise en place pour les athlètes VTT XCO a permis de resynchroniser plus rapidement le rythme veille-sommeil et le rythme de la température interne avec une batyphase qui s'est réajustée rapidement à destination, comparée au temps mis par les athlètes « routiers » lors de la stratégie unique de resynchronisation à destination. En effet, à l'issue de l'avance de phase, la batyphase du G_{PAPA} a été avancée de 2,5 h, parallèlement à l'heure du coucher qui a été décalée de 2,9 h (sur les 3 h prévues).

Pendant le voyage, à J0, le G_{PAPA} a conservé cette avance de phase, la batyphase était avancée ($-155,3 \pm 36,3$ min), contrairement au G_{PA} pour lequel la batyphase était retardée ($79,0 \pm 83,1$ min). De même, l'heure du coucher était avancée pour le G_{PAPA} ($-235,7 \pm 53,5$ min) alors qu'elle était retardée pour G_{PA} ($147,3 \pm 38,4$ min). Par ailleurs, en raison des contraintes du vol, le TTS a été réduit dans les deux groupes, mais avec une diminution plus importante dans le G_{PA} ($-176,8 \pm 103,9$ min) que dans le G_{PAPA} ($-89,5 \pm 139,7$ min). Cette différence est probablement plus liée aux horaires de départ et d'arrivée du vol qu'à la stratégie elle-même. Selon Rensburg et al. (2021), le choix de l'horaire du vol est important à prendre en compte dans la mise en place d'une stratégie de gestion du décalage. Malheureusement, pour des raisons économiques et logistiques, les athlètes olympiques voyagent principalement sur des vols commerciaux ; les choix d'horaires des vols sont donc limités.

À destination, dans le G_{PAPA} , la température interne a retrouvé plus rapidement sa batyphase d'avant vol, que dans le G_{PA} , même si sa resynchronisation n'a pas été immédiate. En effet, à J1 et J3, bien qu'un retard de phase ait été observé dans les deux groupes, il était moins marqué dans le groupe G_{PAPA} ($99,8 \pm 35,4$ min et $39,6 \pm 25,8$ min, respectivement) que dans le G_{PA} ($170,6 \pm 139,7$ min et $104,3 \pm 88,5$ min). Dans les deux groupes, entre J1 et J3, le rythme de la température a subi un rapide décalage de phase, d'une durée similaire à 2×30 minutes pour les 2 groupes. Cette observation permet de penser que l'administration vespérale de mélatonine et la luminothérapie le matin au réveil, ont contribué ensemble à resynchroniser, bien que partiellement, l'horloge biologique interne aux horaires du nouveau fuseau. Cette hypothèse avait déjà été rapportées par Herxheimer and Petrie

(2002) montrant que « prise de mélatonine et luminothérapie » se potentialisent pour accélérer la resynchronisation de l'horloge biologique.

Enfin, à J5, la batyphase du G_{PAPA} semble s'être réajustée (-21.5 ± 15.5 min), alors que celle du G_{PA} est encore en retard (81.2 ± 24.2 min).

À destination, le sommeil était plus perturbé dans le G_{PA} que le G_{PAPA} . L'heure du coucher était largement retardée à J1 ($39,8 \pm 34,8$ min), et avancée à J3 et J5 ($-65,3 \pm 48,8$ min à J3 ; $-37,82 \pm 50,5$ min à J5), tandis que dans le G_{PAPA} , cette heure s'est adaptée plus rapidement au nouvel horaire (J1 : $-39 \pm 31,0$, J3 : $-29,8 \pm 29,0$ min et J5 : $-18,5 \pm 23,7$ min). Quant à l'horaire du lever, il était encore décalé à J5 dans le G_{PA} , tandis qu'il était déjà « recalé » à J1 dans le G_{PAPA} . Ces différences expliquent les difficultés des athlètes du G_{PA} à ajuster leurs rythmes circadiens aux nouveaux synchroniseurs extérieurs. Enfin à J0, les TPL et TTS ont été « largement » réduits dans le G_{PAPA} ($-54,7 \pm 107,1$ et $-89,5 \pm 139,7$ min respectivement) et le G_{PA} ($-166,3 \pm 68,4$ et $-176,8 \pm 103,9$ min, respectivement), probablement en raison des horaires tardifs du vol, de la durée du vol et le trajet en voiture pour rejoindre le lieu d'hébergement. À noter, qu'aussi bien dans le G_{PAPA} que dans le G_{PA} d'importantes variabilités interindividuelles ont été observées, indiquant la grande difficulté pour certains athlètes à dormir en avion alors que d'autres en étaient tout à fait capables. Par contre, à J1, ces durées ont « largement » augmenté et à J3 et J5 « modérément » dans le G_{PAPA} . Il est à noter que le sommeil du G_{PA} était chaotique, avec des variations importantes du TTS en J0, J1, J3 et J5, mettant en exergue leur difficulté à se recaler sur le nouveau fuseau horaire (Youngstedt and O'Connor 1999).

Cette étude est la première qui compare, en condition écologique, deux interventions différentes de gestion d'un décalage horaire vers l'Est chez des athlètes de haut niveau. Elle a montré que celle effectuée par les vététistes permet d'anticiper la resynchronisation des rythmes circadiens à destination, réduisant davantage la symptomatologie du décalage horaire, comparée à la stratégie effectuée par les routiers.



Comparison of two interventions to minimize jet lag after an eastward flight in Olympic cyclists

Journal:	<i>Research Quarterly for Exercise and Sport</i>
Manuscript ID:	22-08-PHY-10
Manuscript Type:	Original Article
Manuscript Category:	Exercise Physiology
Keyword:	Cycling, Sleep, Jet lag

SCHOLARONE™
Manuscripts

Comparison of two interventions to minimize jet lag after an eastward flight in Olympic cyclists

Lucas Garbellotto^{1,2}, Elisabeth Petit¹, Emmanuel Brunet², Valérie Gillet³, Hubert Bourdin^{4,5}, Johan Cassirame^{6,7}, Fabienne Mougín¹

¹ University of Bourgogne Franche-Comte, Research Unit EA 3920 and Exercise Performance, Health, Innovation Platform, 25000 Besançon, France

² French Cycling Federation, 78180 Montigny-le-Bretonneux, France

³ Sleep Medicine Center Ellipse, 25000 Besançon, France

⁴ University of Bourgogne Franche-Comte, Research Unit EA 481, 25000 Besançon, France

⁵ Sleep Disorder Unit Hospital, 25000 Besançon, France.

⁶ University of Bourgogne Franche-Comte, Laboratory Culture Sport Health and Society (C3S-UR 4660), Sport and Performance Department, 25000 Besançon, France

⁷ Mtraining, R&D Division Ecole Valentin, France

Contact information: garbellotto.lucas@gmail.com

URL: <http://mc.manuscriptcentral.com/rqes> Email: URQE-peerreview@journals.tandf.co.uk

1 Comparison of two interventions to minimize jet lag after an eastward flight
2 in Olympic cyclists
3
4
5

6 **Introduction:**

7 Major international sports competitions, such as Olympic Games, require, for most athletes,
8 a transmeridian air travel, which can expose them to several time zones crossing. Such
9 journeys induce accumulation of travel fatigue and jet lag, resulting in negative consequences
10 that occur during and in days following the flight (Waterhouse et al. 2004). Travel fatigue is
11 accompanied by several other symptoms, including fatigue, disorientation and headache,
12 caused by sleep loss, as well as dehydration, hypoxia and discomfort due to the confined space
13 in the aircraft low air pressure (Reilly et al. 2009) and low humidity (Leatherwood and Dragoo
14 2013; Rensburg et al. 2021). As for jet lag, symptoms are triggered by the mismatch between
15 internal body clock, which is entrained to the timing of “zeitgebers” and the desired timing of
16 sleep and wake, typically synchronized to time cues in the destination time zone (Waterhouse
17 et al. 2007; Reilly et al. 2009; Samuels 2012). During this mismatch period, body core
18 temperature (CBT), hormonal circadian rhythms (Lemmer et al. 2002; Waterhouse et al. 2002;
19 Bullock et al. 2007) and sleep-wake cycle (Beaumont et al. 2004) are disrupted. Whilst the
20 symptoms of travel fatigue are reported to be less severe than jet lag, both result in
21 compromised physical and cognitive performance (Reilly et al. 2007).

22 In addition, if sleep-wake rhythm resynchronizes within a few days after transmeridian flight,
23 melatonin or CBT rhythms can take longer (up to 10 days) to resynchronize (Lee and Galvez
24 2012). To challenge jet lag related to flight, promote faster adaptation of circadian rhythms to
25 minimize impairments of athletes' performances, several strategies have been investigated
26 (Leatherwood and Dragoo 2013; Roach and Sargent 2019; Janse van Rensburg et al. 2020;

27 Rensburg et al. 2021). These strategies can imply modifications of behavior before or after
28 flight such as (i) melatonin supplementation, from 2 to 5 mg, before or after sleep (Atkinson
29 et al. 2003; Forbes-Robertson et al. 2012; Arendt 2018), (ii) light exposure using either natural
30 or artificial light or using either glasses producing blue light (Geerdink et al. 2016) or sunglasses
31 reducing light intensity (Roach and Sargent 2019), or avoidance of shift naturally biologic clock
32 (Revell et al. 2006; Sack 2009; Burke et al. 2013), (iii) an advance or delay of sleep schedules,
33 in days preceding the flight (Revell et al. 2006; Eastman and Burgess 2009). Such strategies
34 (Crowley and Eastman 2015) can be combined either with a nap (Petit et al. 2014), or a
35 physical exercise (Montaruli et al. 2009) or a modification of nutrition (Roach and Sargent
36 2019).

37 During regular cycling season, most important international competitions are held in Europe
38 (for example, in 2022, on the 33 competitions world tour in road cycling, only one competition
39 took place outside Europe). Therefore, European athletes may be less experienced to manage
40 transcontinental travel. However, it is well established that the experience of jet lag
41 management reduces magnitude symptoms (Waterhouse et al. 2002). In addition, several
42 studies pointed out that eastward travel impairs more importantly physical performances
43 than westward ones (Lemmer et al. 2002; Chapman et al. 2012; Zacharko et al. 2022). Lemmer
44 et al. (2002) also reported more severe jet lag symptoms for eastward travel, persisting up to
45 7 days, when westward generally takes 3 days. This phenomenon is explained by the fact that
46 the body clock is naturally located on a period of 25-26 h, longer than the 24 h light-dark cycle.
47 Thus, it is easier to lengthen than to shorten the day (Leatherwood and Dragoo 2013).

48 In this context, it was of interest for French Olympic athletes to optimize and tune accurately
49 their travel strategies to minimize undesirable effects of Jet Lag during Olympic Games, that
50 took place in Tokyo. Recent recommendations advice to individualize strategies, by adjusting

51 properly light modulation, melatonin time ingestion or establishing a gradual phase
52 adjustment, based on the individual circadian rhythms (Roach and Sargent 2019; Janse van
53 Rensburg et al. 2020). These interventions, which required to follow chronobiological rhythms
54 before competition, seem to be easier to carry out in laboratory than in real life for athletes
55 because they avoid adding stress or constraints to athletes. However, in last decade, many
56 new noninvasive wearable devices have emerged to assess sleep-wake and CBT rhythms. The
57 latter, based on ingestible telemetric pills, measures the gastrointestinal temperature. This
58 measurement is an easily applicable and valid method, to track non-invasively in field
59 conditions circadian rhythm of CBT. Moreover, advantage of this approach includes, not only
60 the ability of monitoring continuously CBT but also observing reliable markers by an
61 exploration of dynamic changes in CBT with few interferences in athlete routines (Słomko and
62 Zalewski 2016).

63 Despite the number of studies focusing on jet lag and potential solutions to counteract it, field
64 studies investigating strategies, in elite athletes, are very limited (Janse van Rensburg et al.
65 2020). We observed recently, in professional cyclists, that a gradual phase advance of sleep
66 schedules, before an eastward flight, followed by a phase adjustment, with evening
67 melatonin, morning bright light, enabled to pre-shift part of the time zones, without disturbing
68 sleep and physical performances at destination (Garbellotto et al. in press, 2022). This
69 methodology was composed by two separated interventions including a phase advance
70 before flight and a phase adjustment at destination, with melatonin and bright light exposure.
71 Therefore, better understand the part of each of these interventions, in order to propose an
72 optimal strategy, seems important for a final preparation of athletes.

73 Thus, the purpose of this study was to compare, in French Olympic cyclists, two interventions
74 to minimize the deleterious effects of jet lag, that occurs before an international competition

75 in Japan (7 time zones to the east), on sleep parameters and CBT rhythm. We hypothesized
76 that a strategy with a phase advance, at home, followed by a phase adjustment at destination
77 would induce a faster resynchronization of sleep-wake rhythm at destination, by an advance
78 in CBT rhythm, than an intervention with only a phase adjustment at destination.

79

80 **Materials and methods**

81 *Subjects*

82 Two groups of elite professional cyclists of the French national team took part of this study.
83 For practical reason, athletes were grouped according to their specialty. One group included
84 6 cross-country mountain bikers [5 males (age: 28.2 ± 4.5 years; height: 178.6 ± 4.1 cm; body
85 mass: 66.5 ± 3.6 kg) and 1 female (age: 19 years; height: 166 cm; weight: 56.1 kg)] and one
86 group included 4 male road cyclists (age 26.0 ± 1.4 yrs; height 175.8 ± 1.5 cm; body mass 62.8
87 ± 5.7 kg). Subjects were selected by national team managers, to participate in 2019 to an
88 international competition called "Test Event" in Tokyo. Subjects were none-smokers and did
89 not drink coffee in the evening or any other substances that might interfere with sleep
90 characteristics. This study was performed in accordance with international ethical standards
91 (Harriss et al. 2017). Before participation, every athlete received a description of the
92 procedure explaining the general purpose of the experiment and provided written informed
93 consent.

94

95 *Experimental design:*

96 One month before flight to Tokyo, sleep-wake and core body temperature rhythms were
97 evaluated for 7 days, during which all athletes maintained their usual sleep wake schedules at
98 home (baseline period).

99

100 *Optimization strategies*

101 The two strategies are described on figure 1.

102 The first strategy consisted of a phase advance at home, using protocol recommended by

103 Crowley and Eastman (2015), followed by a phase adjustment at destination. Thus, for 6 days

104 before the departure (D-6 to D-1), bedtime was gradually advanced by 30 min each day. The

105 advance of bedtime was individually programmed based on the usual bedtime of each athlete.

106 Meals and training times were also gradually shifted in the same way. During this phase

107 advance, 0.5 mg of melatonin was administered 2 h before bedtime, and a light exposure to

108 1 500 Lux for 20 min with light glasses was applied upon waking (Luminette®, Lucimed,

109 Villers-Le-Bouillet, Belgium). Then, travel (travel period, D0) was in economy class for 12h

110 nonstop flight, from Paris (Charles De Gaulle; France) at 3:40 p.m. local time, (D0) to Tokyo

111 (Haneda; Japan) at 12:45 p.m. local time (D1). During the flight, athletes were instructed to

112 respect their sleep-wake schedules corresponding to those of the last night of phase advance.

113 At destination, to adjust to the new time zone as quickly as possible, an exogenous ingestion

114 of 2.0 mg of melatonin 2 h before bedtime and a light exposure of 1 500 Lux for 20-min, with

115 light glasses (Luminette®, Lucimed, Villers-Le-Bouillet, Belgium) upon waking were used. This

116 strategy was followed by the group named G_{PAPA}, which means "Phase Advance-Phase

117 Adjustment".

118 The second strategy consisted of maintaining the usual sleep-wake schedules at home,

119 without modifying training or mealtimes. Then, travel (travel period, D0) was in economy class

120 for 12 h nonstop flight, from Paris (Charles De Gaulle; France) at 11:25 p.m. local time (D0) to

121 Tokyo (Haneda; Japan) at 8:30 p.m. local time (D1). During the flight, athletes had to respect

122 their sleep-wake schedules, corresponding to those of previous days. At destination, the same

123 strategy than that G_{PAPA} has been implemented. This strategy was followed by the group
124 named G_{PA} , which means "Phase Adjustment".

125

126 *Data collection*

127 *Sleep-wake rhythm*

128 Athletes completed each morning and evening a sleep diary from baseline period to D6. The
129 sleep diary items comprised estimations of bedtime (h:min), wake-up time (h:min), sleep
130 onset latency (SOL, min) and wake after sleep onset (WASO, min). Time in bed (TIB, h) was
131 defined as the time duration between bedtime and wake-up time, WASO as the addition of
132 estimated time awake during the night (min), total sleep time (TST, h) as TIB minus SOL and
133 WASO and sleep efficiency (SE, %) was defined as $TST/TIB \times 100, \%$.

134

135 *Core body temperature (CBT)*

136 CBT was continuously recorded from baseline period to D6 using miniaturized e-Celsius®
137 ingestible capsules and e-Viewer (Bodycap, Caen, France). Temperature from e-Celsius®
138 capsule is sampled every 30-sec while traveling through the gastrointestinal tract and
139 displayed in real time on the dedicated external receiver; e-Viewer®. The capsule equipped by
140 an internal memory enables data storage to avoid loss of information in case of connection
141 interruption. Athletes were equipped by a wristband marked "No MRI" indicating the
142 ingestion of a capsule that prohibits performance of magnetic resonance imaging. Before each
143 defecation, athletes had to synchronize the capsule with the monitor to avoid any loss of data.
144 After each defecation, athletes had to check if the capsule was still synchronized to the
145 monitor. If the capsule was ejected, a new one was activated and ingested to continue
146 recordings.

147 Data were downloaded into a dedicated Bodycap hardware interface and then exported in a
148 spreadsheet CSV file. Data were averaged every 5-min duration in order to identify smallest
149 internal temperature; the nadir ($^{\circ}\text{C}$) and the time of day associated; the batyphase (h:min).

150

151 Statistical analyses

152 Statistical analyses were performed using Microsoft Excel 2019 software (Microsoft
153 Corporation, Redmond, USA). On baseline condition, average and standard deviation (SD)
154 were calculated for overall athletes. Differences from baseline period for both groups were
155 set using magnitude based inference method (Hopkins et al. 2009). Each subject's change was
156 expressed in a difference from baseline condition. Mean difference and SD from baseline were
157 calculated at D-5, D-3, D-1, D0, D1, D3 and D5 for G_{PAPA} and at D0, D1, D3 and D5 G_{pa} . Limit
158 probabilities were also calculated to establish whether the true changes were lower than,
159 identical or higher than the smallest worthwhile changes ($0.2 \times$ between-subjects SD) from
160 baseline position. Changes were categorized using following scale 0–0.2 (Trivial), 0.2–0.6
161 (Small), 0.6–1.2 (Moderate) and 1.2–2.0 (Large). Odds ratio were calculated to evaluate the
162 qualitative probabilistic terms on CBT batyphase and TST using the following scale (Hopkins
163 2007): <0.5%, most unlikely, almost certainly not; 0.5- 5%, very unlikely; 5-25%, unlikely,
164 probably not; 25-75%, possibly; 75-95%, likely, probably; 95-99.5%, very likely; >99.5%, most
165 likely, almost certainly.

166

167 **Results**

168 Physical characteristics, sleep and CBT parameters obtained on baseline period are presented
169 in Table 1. Athletes went to slept at $10:46 \pm 00:32$ p.m. and woke up at $7:38 \pm 00:31$ a.m. for a
170 TST of 8.4 ± 0.5 h with a sleep efficiency of 94.5 ± 6.5 %. CBT Batyphase occurred at $4:06 \pm 00:40$

171 a.m. with a nadir of temperature at 36.1 ± 0.2 °C.

172

173 *Sleep-wake rhythm data*

174 Sleep data in both strategies compared to baseline values are presented in Table 2. For G_{PAPA} ,
175 during phase advance period, bedtime was largely advanced on D-5, D-3 and D-1 (-55.2 ± 17.5 ,
176 -134.8 ± 27.1 and -173.2 ± 26.9 min respectively) as well as during flight (-235.7 ± 53.5 min on
177 D0). Wake-up time was also advanced moderately on D-5 (-27.8 ± 42.2 min), largely on D-3 ($-$
178 97.0 ± 50.1 min) and D-1 (-161.2 ± 39.1 min). Likewise, wake-up time was largely advanced
179 during travel (-290.0 ± 140.5 min on D0). At destination, bedtime was still earlier than baseline,
180 largely on D1 (-39.0 ± 31.0 min), moderately on D3 (-29.8 ± 29.0 min) and slightly on D5 ($-$
181 18.5 ± 23.7 min).

182

183 For G_{PA} , during travel, bedtime was largely delayed (147.3 ± 38.4 min on D0) and wake-up time
184 moderately advanced (-19.0 ± 98.2 min on D0). At destination, bedtime was largely delayed on
185 D1 (39.8 ± 34.8 min), largely advanced on D3 (-65.3 ± 48.8 min) and moderately advanced on D5
186 (-37.8 ± 50.5 min). For the wake-up time, these same changes were observed. It was
187 moderately delayed on D1 (19.8 ± 43.5 min) and largely advanced on D3 (-94.0 ± 32.6 min).

188

189 Scatter plot of TST is presented on figure 2. For G_{PAPA} , TST was moderately increased during
190 phase advance on D-5, D-3 and D-1 (35.5 ± 39.8 , 35.5 ± 36.4 and 23.0 ± 17.8 min respectively),
191 largely decreased on D0 (-89.5 ± 139.7 min) and moderately increased on D1 (36.3 ± 33.3 min).
192 TST was largely decreased on D0 (-176.8 ± 103.9 min). However, at destination, TST was
193 unaffected on D1, largely decrease on D3 (-56.8 ± 66.0 min) and largely increased on D5
194 (50.8 ± 48.8 min).

195

196 Core body temperature data

197 Scatter plot of CBT batyphase is presented on figure 3 and CBT data in both strategies
198 compared to baseline values are presented in Table 2. In G_{PAPA} , batyphase was largely
199 advanced on D-3 (-71.9 ± 7.5 min), D-1 (-153.7 ± 55.6 min) and D0 (-155.5 ± 36.3 min). At
200 destination, it was largely delayed on D1 (99.8 ± 35.4 min), largely on D3 (39.6 ± 25.8 min) and
201 moderately advanced on D5 (-21.5 ± 15.5 min). In G_{PA} , batyphase was largely delayed on D0
202 (79.0 ± 83.1 min), D1 (170.6 ± 139.7 min), D3 (104.3 ± 88.5 min) and D5 (81.2 ± 24.2 min).

203

204 **Discussion**

205 Main finding of this study showed that strategy based on a gradual phase advance before an
206 eastward travel (7 hours), combined with a phase adjustment at destination, using melatonin
207 and bright light therapy, induced faster CBT batyphase synchronization and sleep time
208 recovery at destination than phase adjustment at destination alone. In the present study, both
209 investigated strategies included similar intervention at destination, but G_{PAPA} performed phase
210 advance intervention before flight. It has been previously demonstrated that advance phase
211 is an efficient way to accelerate resynchronization of biological rhythms at destination
212 (Eastman et al. 2005; Crowley and Eastman 2015). For this phase advance intervention, global
213 shift operated by athletes was only 3 hours by shifting only 30 minutes per day (Crowley and
214 Eastman 2015) when other authors suggested 1 to 2 hours per day (Eastman et al. 2005; Revell
215 et al. 2006; Eastman and Burgess 2009). We assumed this smoother gradual shift aiming to
216 reduce athletes' stress and disturbances in their training program. Pre travel measurements
217 confirmed effective intervention performed by the G_{PAPA} : advance of bedtime accompanied
218 by melatonin and light therapy induced consistent results, as confirmed by the bedtime, wake-

219 up time (bedtime: -173.2 ± 88.2 min on D-1; wake-up time: -161.2 ± 39.1 min on D-1) and CBT
220 batyphase (-153.7 ± 55.6 min on D-1). Moreover, during this period, we observed that sleep
221 quantity did not reduce, but surprisingly increased moderately on D-5, D-3 and D-1 (35.5 ± 39.8 ,
222 35.5 ± 36.4 and 23.0 ± 17.8 min respectively). This point is an important fact to prevent jet lag
223 symptoms (Arendt 2018) and could permit athletes to get better recovery status. G_{PAPA}
224 successfully advanced 2.9 h bedtime (3 h expected) inducing early CBT batyphase by 2.5 h.
225 According to the recommendations of Crowley and Eastman (2015), this strategy, combining
226 phase advance, melatonin supplementation and morning bright light exposure, reduced the
227 shift of sleep wake schedule each day? to minimize the misalignment with circadian rhythms.
228 Paul et al. (2011) previously reported that similar association of those three interventions
229 provide better results when morning light therapy is associated with afternoon melatonin
230 supplementation (3.0 mg ; Paul et al. 2011).

231 During travel, G_{PAPA} maintained its phase advance, compared to baseline period, (CBT
232 batyphase being advanced of -155.5 ± 36.3 min on D0), unlike to the G_{PA} who experienced a
233 more likely large phase delay of bedtime and CBT batyphase (bedtime being delayed of
234 147.3 ± 38.4 min and CBT batyphase of 99.8 ± 35.4 min on D0). Due to sleeping constraints in
235 the flight, a large reduction of TST time was observed on D0 for both groups. In the same time,
236 more important reduction was observed for G_{PA} (-89.5 ± 139.7 min in G_{PAPA} and -176.8 ± 103.9
237 min in G_{pa}). Nevertheless, we cannot completely allocate this superior impairment to G_{PA}
238 strategy, these results could be affected to flight time of departure and arrival. Flight selection
239 was designated by Rensburg et al. (2021) as an important point in global optimization strategy
240 to face jet lag. Unfortunately for economical and logistical reasons, Olympic athletes are
241 mainly travelled on commercial flights for which the choice long haul flight schedules is very
242 limited.

243 At destination, the results of CBT batyphase attested faster adjustment of G_{PAPA} than G_{PA} . On
244 D1, a large phase delay of CBT batyphase was observed in G_{PAPA} and G_{PA} . Even if this phase
245 delay magnitude was large for both groups, differences appeared less important in G_{PAPA}
246 (99.8 ± 35.4 min) than G_{PA} (170.6 ± 139.7 min). At D3, G_{PAPA} and observed G_{PA} remained large
247 delay. Both groups readjusted approximately by 60 minutes, which indicate a similar
248 progressive synchronization on local time (39.6 ± 25.8 min for G_{PAPA} and 104.3 ± 88.5 min for
249 G_{PA}). These synchronizations helped by same phase adjustment coupling light therapy and
250 melatonin supplementation seems to generate similar dynamics to facilitate adaptation of
251 circadian system to the new time zone. This kind of post flight intervention is highly
252 recommended in case of eastward flight (Rensburg et al. 2021). Even if the efficacy of light
253 therapy alone was not clearly stated (Lahti et al. 2007), Herxheimer and Petrie (2002)
254 demonstrated, in laboratory conditions, that light and melatonin supplementation provide
255 additive effects on rhythms and permit to shift body clock. Finally, on D5, CBT batyphase of
256 G_{PAPA} seems to be readjusted (-21.5 ± 15.5 min), while the one of G_{PA} is still largely delayed
257 (81.2 ± 24.2 min). Despite of the use of melatonin and light therapy to assist synchronization,
258 after 5 days at destination, CBT batyphase G_{PA} was still not fully synchronized. It appears that
259 pre-flight adjustment seems to be crucial advantage to resynchronize faster avoiding larger
260 shift at arrival.

261 At destination, we noted that sleep was disturbed in both groups, but it was more importantly
262 altered in G_{PA} than G_{PAPA} . Bedtime is largely retarded on D1 (39.8 ± 34.8 min), and advanced on
263 D3 and D5 in G_{PA} (-65.3 ± 48.8 min on D3; -37.82 ± 50.5 min on D5). These large variations in
264 bedtime reveal an important mismatch in circadian rhythms and important difficulties of G_{PA}
265 to adjust them on local lifetime. Contrary to G_{PA} , bedtime of G_{PAPA} was progressively shifted
266 to usual time at destination on D1, D3 and D5 (-39 ± 31.0 , -29.8 ± 29.0 and -18.5 ± 23.7 min

267 respectively). The wake-up time followed the same shift as bedtime at arrival for both groups,
268 but G_{PAPA} resynchronized their wake-up time on D1 when G_{PA} did not recover on D5. Regarding
269 sleep quantity variables, we observed that both TIB and TST have been largely reduced for
270 G_{PAPA} (-54.7 ± 107.1 and -89.5 ± 139.7 min) and G_{PA} (-166.3 ± 68.4 and -176.8 ± 103.9 min) on D0.
271 These observations are probably explained by flight times, flight duration, and transit travel
272 at destination to reach accommodation venue. Moreover, results showed that athletes from
273 G_{PAPA} group increased largely their TIB and TST on D1 and moderately on D3 and D5.
274 Oppositely, G_{PA} athletes sleep parameters followed chaotic evolution with larger reduction on
275 D0, moderate decrease of TIB for D1 and D3 and moderately increase on D5. More
276 surprisingly, TST fluctuated greatly, it largely decreased on D0, was unchanged on D1, before
277 coming back to large decrease on D3 and large increase on D5. These large fluctuations of
278 sleep parameters, observed with G_{PA} strategy, pointed out biggest challenge for biological
279 clock to resynchronize on local time zone (Youngstedt and O'Connor 1999).
280 These difficulties to adjust sleep with G_{PA} strategy are supported by slower adjustment of CBT
281 with large delay for batyphase from D0 to D5 which remained at 81.2 ± 24.2 min delayed,
282 whereas G_{PAPA} strategy reached moderate delay or advance of batyphase on D3 and D5.
283 This study is the first to compare, in field conditions, two different interventions to manage
284 jet lag with high level athletes. Following last recommendations (Crowley and Eastman 2015;
285 Roach and Sargent 2019; Janse van Rensburg et al. 2020), we demonstrated that advance
286 phase of 3 hours (30 min per day), supported by light therapy and 0.5 mg supplementation 2
287 hours before bedtime, associated to a phase adjustment at destination 2.0 mg of melatonin
288 and light therapy, is more efficient than a phase adjustment at destination only after eastward
289 transmeridian travel (-7 hours). We can conclude that bigger shift at destination for G_{PA} is
290 redhibitory and cannot be reduced quickly.

291 Strategies investigated in this study showed a similar biological circadian adjustment for
292 batyphase of CBT. However, our results pointed out that CBT rhythms is not completely
293 resynchronized for both strategies after 5 days at destination. Even if G_{PAPA} provided better
294 results, CBT markers as nadir and batyphase remained altered on D5. Based on it, eastward
295 flight strategy could be optimized to reach more appropriated solutions to counteract jet lag,
296 using additional interventions such as exercising (Stutz et al. 2019) or pharmacological
297 supplementation of caffeine (Cook et al. 2011) in line with anti-doping policy (World Anti-
298 Doping Agency). Given that consensus is stronger for preflight period, a phase adjustment at
299 destination could be the strongest way to improve synchronization tuning melatonin
300 supplementation or investigating different light therapies.

301

302 **Conclusion**

303 Our results are of interest and relevance to athletes who have to travel across time zones to
304 participate to athletic events. A gradual advance of bedtime by 30 min for 6 days with evening
305 melatonin administration and light therapy upon wake up induced a small misalignment of
306 the sleep wake rhythm and maintained sleep patterns. This phase advance, associated to a
307 phase adjustment, with melatonin and light therapy, is more efficient than a phase adjustment
308 at destination only. It induced faster CBT synchronization and contributed to recovery in the
309 first days at destination.

310 Finally, in ecological conditions, a 3 h phase advance of sleep-wake schedules before an
311 international flight, combined with a phase adjustment strategy at destination, allows to
312 resynchronize completely the crossing of 7 time zones after 5 days at destination against
313 certainly more days with a phase adjustment intervention only at arrival.

314

315 **References**

- 316 Arendt J (2018) Approaches to the Pharmacological Management of Jet Lag. *Drugs*
317 78(14):1419–1431
- 318 Atkinson G, Drust B, Reilly T, Waterhouse J (2003) The relevance of melatonin to sports
319 medicine and science. *Sport Med* 33(11):809–831
- 320 Beaumont M, Bate D, Beers P Van, Denis JB (2004) Caffeine or melatonin effects on sleep
321 and sleepiness after rapid eastward transmeridian travel. *J Appl Physiol* 96(1):50–58
- 322 Bullock N, Martin DT, Ross A, Rosemond D, Marino FE (2007) Effect of long haul travel on
323 maximal sprint performance and diurnal variations in elite skeleton athletes. *Br J Sport*
324 *Med* 41(9):569–73
- 325 Burke TM, Markwald RR, Chinoy ED, Snider JA, Bessman SC, Jung CM, Wright Jr. KP (2013)
326 Combination of light and melatonin time cues for phase advancing the human circadian
327 clock. *Sleep* 36(11):1617–1624
- 328 Chapman DW, Bullock N, Ross A, Rosemond D, Martin DT (2012) Detrimental effects of West
329 to East transmeridian flight on jump performance. *Eur J Appl Physiol* 112(5):1663–1669
- 330 Cook CJ, Crewther BT, Kilduff LP, Drawer S, Gaviglio CM (2011) Skill execution and sleep
331 deprivation: effects of acute caffeine or creatine supplementation - a randomized
332 placebo-controlled trial. *J Int Soc Sports Nutr* 8(2):1–8
- 333 Crowley SJ, Eastman CI (2015) Phase advancing human circadian rhythms with morning
334 bright light, afternoon melatonin, and gradually shifted sleep: can we reduce morning
335 bright-light duration? *Sleep Med* 16(2):288–297
- 336 Eastman C, Gazda CJ, Burgess HJ, Crowley SJ, Fogg LF (2005) Advancing Circadian Rhythms
337 Before Eastward Flight: A Strategy to Prevent or Reduce Jet Lag. *Sleep* 28(1):33–44
- 338 Eastman CI, Burgess HJ (2009) How to Travel the World Without Jet Lag. *Sleep Med Clin*

- 339 4(2):241–255
- 340 Forbes-Robertson S, Dudley E, Vadgama P, Cook C, Drawer S, Kilduff L (2012) Circadian
341 disruption and remedial interventions: effects and interventions for jet lag for athletic
342 peak performance. *Sport Med* 42(3):185–208
- 343 Garbellotto L, Petit E, Brunet E, Guironet S, Clolus Y, Gillet V, Bourdin H, Mouglin F (2022)
344 Gradual advance of sleep-wake schedules before an eastward flight and phase
345 adjustment after flight in elite cross-country mountain bikers: effects on sleep and
346 performance. *J Strength Cond Res*, in press
- 347 Geerdink M, Walbeek TJ, Beersma DGM, Hommes V, Gordijn MCM (2016) Short blue light
348 pulses (30 Min) in the morning support a sleep-advancing protocol in a home setting. *J*
349 *Biol Rhythms* 31(5):483–497
- 350 Harriss DJ, MacSween A, Atkinson G (2017) Standards for ethics in sport and exercise science
351 research: 2018 update. *Int J Sports Med* 38(14):1126–1131
- 352 Herxheimer A, Petrie KJ (2002) Melatonin for the prevention and treatment of jet lag.
353 *Cochrane Database Syst Rev* (é):CD001520
- 354 Hopkins WG (2007) A spreadsheet for deriving a confidence interval, mechanistic inference
355 and clinical inference from a P value. *Sportscience* 11:16–21
- 356 Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J (2009) Progressive statistics for studies in
357 sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc* 41(1):3–12
- 358 Janse van Rensburg DCC, Jansen van Rensburg A, Fowler P, Fullagar H, Stevens D, Halson S,
359 Bender A, Vincent G, Claassen-Smithers A, Dunican I, Roach GD, Sargent C, Lastella M,
360 Cronje T (2020) How to manage travel fatigue and jet lag in athletes? A systematic
361 review of interventions. *Br J Sports Med* Aug;54(16):960–968
- 362 Lahti T, Terttunen J, Leppämäki S, Lönnqvist J, Partonen T (2007) Field trial of timed bright

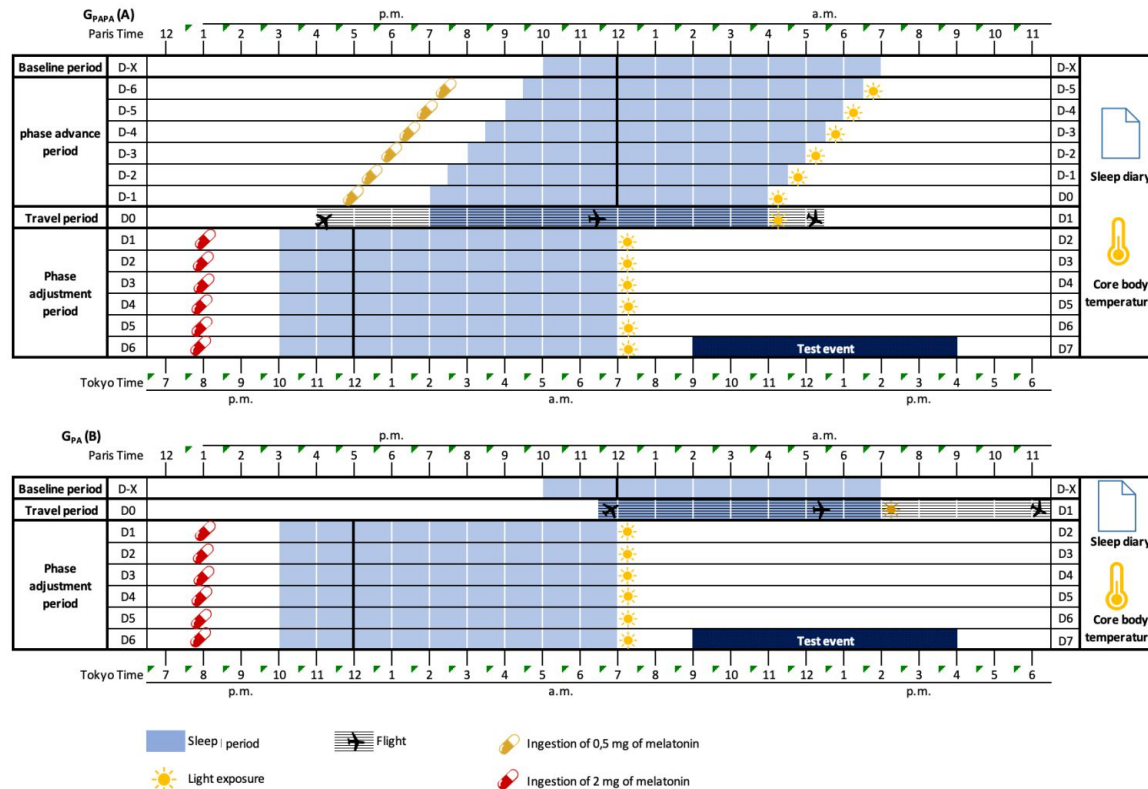
- 363 light exposure for jet lag among airline cabin crew. *Int J Circumpolar Health* 66(4):365–
364 369
- 365 Leatherwood WE, Dragoo JL (2013) Effect of airline travel on performance: A review of the
366 literature. *Br J Sports Med* 47(9):561–567
- 367 Lee A, Galvez JC (2012) Jet Lag in Athletes. *Sports Health* 4(3):211–216
- 368 Lemmer B, Kern R, Nold G, Lohrer H (2002) Jet lag in athletes after eastward and westward
369 time-zone transition. *Chronobiol Int* 19(4):743–764
- 370 Montaruli A, Roveda E, Calogiuri G, Torre ALA, Carandente F (2009) The sportsman
371 readjustment after transcontinental flight: A study on marathon runners. *J Sports Med*
372 *Phys Fitness* 49(4):372–381
- 373 Paul MA, Gray GW, Lieberman HR, Love RJ, Miller JC, Trouborst M, Arendt J (2011) Phase
374 advance with separate and combined melatonin and light treatment.
375 *Psychopharmacology (Berl)* 214(2):515–523
- 376 Petit E, Mougin F, Bourdin H, Tio G, Haffen E (2014) A 20-min nap in athletes changes
377 subsequent sleep architecture but does not alter physical performances after normal
378 sleep or 5-h phase-advance conditions. *Eur J Appl Physiol* 114(2):305–315
- 379 Reilly T, Atkinson G, Edwards B, Waterhouse J, Åkerstedt T, Davenne D, Lemmer B, Wirz-
380 Justice A (2007) Coping with jet-lag: A Position Statement for the European College of
381 Sport Science. *Eur J Sport Sci* 7(1):1–7
- 382 Reilly T, Waterhouse J, Edwards B (2009) Some chronobiological and physiological problems
383 associated with long-distance journeys. *Travel Med Infect Dis* 7(2):88–101
- 384 Rensburg DCJ Van, Jansen A, Peter VR, Amy MF, Stevens D, Sullivan KO, Fullagar HHK,
385 Manuel J, Michelle A (2021) Managing Travel Fatigue and Jet Lag in Athletes : A Review
386 and Consensus Statement. *Sport Med* (0123456789):15–19

- 387 Revell VL, Burgess HJ, Gazda CJ, Smith MR, Fogg LF, Eastman CI (2006) Advancing Human
388 Circadian Rhythms with Afternoon Melatonin and Morning Intermittent Bright Light. *J*
389 *Clin Endocrinol Metab* 91(1):54–59
- 390 Roach GD, Sargent C (2019) Interventions to Minimize Jet Lag After Westward and Eastward
391 Flight. *Front Physiol* 10:1–11
- 392 Sack RL (2009) The pathophysiology of jet lag. *Travel Med Infect Dis* 7(2):102–110
- 393 Samuels CH (2012) Jet Lag and Travel Fatigue: A Comprehensive Management Plan for Sport
394 Medicine Physicians and High-Performance Support Teams. *Clin J Sport Med* 22(3):268–
395 273
- 396 Słomko J, Zalewski P (2016) The circadian rhythm of core body temperature (Part I): The use
397 of modern telemetry systems to monitor core body temperature variability. *Polish*
398 *Hyperb Res* 55(2):79–83
- 399 Stutz J, Eiholzer R, Spengler CM (2019) Effects of Evening Exercise on Sleep in Healthy
400 Participants: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sport Med* 49(2):269–287
- 401 WADA. World Anti-Doping Agency (2020) Prohibited list. In: Available from [https//](https://www.wada-ama.org/en/what-we-do/prohibited-list)
402 www.wada-ama.org/en/what-we-do/prohibited-list.
- 403 Waterhouse J, Edwards B, Nevill A, Carvalho S, Atkinson G, Buckley P, Reilly T, Godfrey R,
404 Ramsay R (2002) Identifying some determinants of “jet lag” and its symptoms: a study
405 of athletes and other travellers. *Br J Sports Med* 36(1):54–60
- 406 Waterhouse J, Reilly T, Atkinson G, Edwards B (2007) Jet lag: trends and coping strategies.
407 *Lancet* 369(9567):1117–1129
- 408 Waterhouse J, Reilly T, Edwards B (2004) The stress of travel. *J Sports Sci* 22(10):946–966
- 409 Youngstedt SD, O’Connor PJ (1999) The influence of air travel on athletic performance. *Sport*
410 *Med* 28(3):197–207

- 411 Zacharko M, Konefał M, Radzimiński Ł, Chmura P, Błazejczyk K, Chmura J, Andrzejewski M
412 (2022) Direction of travel of time zones crossed and results achieved by soccer players.
413 The road from the 2018 FIFA World Cup to UEFA EURO 2020. Res Sport Med 30(2):145–
414 155

For Peer Review

417



418

419 *Figure 1 : Raster plot of the experimental protocol for G_{PAPA} (A) and G_{PA} (B). Example for an athlete going to bed at 10:00 p.m. and getting up at*
 420 *7:00 a.m.*

421 G_{PAPA} means group "Phase Advance and Phase Adjustment"

422 G_{PA} means group "Phase Adjustment"

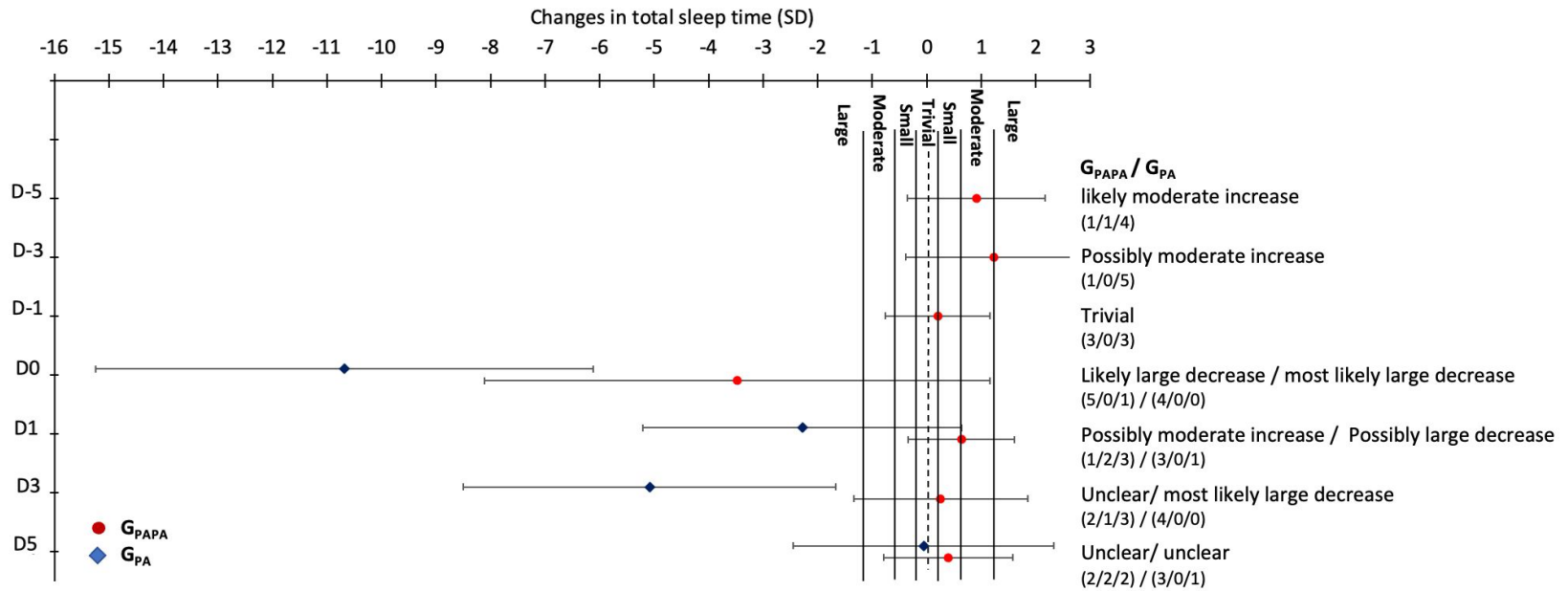
423 Baseline period were evaluated one month before travel to Tokyo for 7 days on usual sleep wake schedules.

423 *Table 1: Physical characteristics, sleep parameters and core body temperature of athletes at baseline period.*

		Overall athletes	G _{PAPA}	G _{PA}	
425	Characteristics	Age (years)	26.4 ± 4.2	26.7 ± 5.5	26.0 ± 1.4
426		Height (cm)	176.2 ± 4.8	176.5 ± 6.3	175.8 ± 1.5
427		Body mass (kg)	64.2 ± 5.5	64.7 ± 5.3	63.5 ± 6.6
428	Sleep-wake rhythm	Bedtime	10:46±00:32 p.m.	10:45±00:32 p.m.	10:46±00:36 p.m.
429		SOL (min)	14±12	10±12	21±10
430		Wake-up time	7:38±00:31 a.m.	7:30±00:36 a.m.	7:50±00:18 a.m.
431		WASO (min)	10±28	1±2	24±43
432		TIB (h)	9.0±0.5	8.8±0.5	9.2±0.4
433		TIB (min)	538±28	529±31	551±21
434		TST (h)	8.4±0.5	8.5±0.5	8.3±0.6
435		TST (min)	507±31	512±28	499±39
436		SE (%)	94.4±6.5	96.9±2.9	90.8±9.1
437		Core body temperature	Batyphase	4:06±00:40 a.m.	4:28±00:30 a.m.
438		Nadir (°C)	36.1±0.2	36.1±0.1	36.1±0.3

439 G_{PAPA} means group "Phase Advance and Phase Adjustment"440 G_{PA} means group "Phase Adjustment"441 WASO: wake after sleep onset; TIB: time in bed; TST: total sleep time; SE: sleep efficiency; SOL: sleep onset latency. Baseline period were
442 evaluated one month before travel to Tokyo for 7 days on usual sleep wake schedules.

444
445

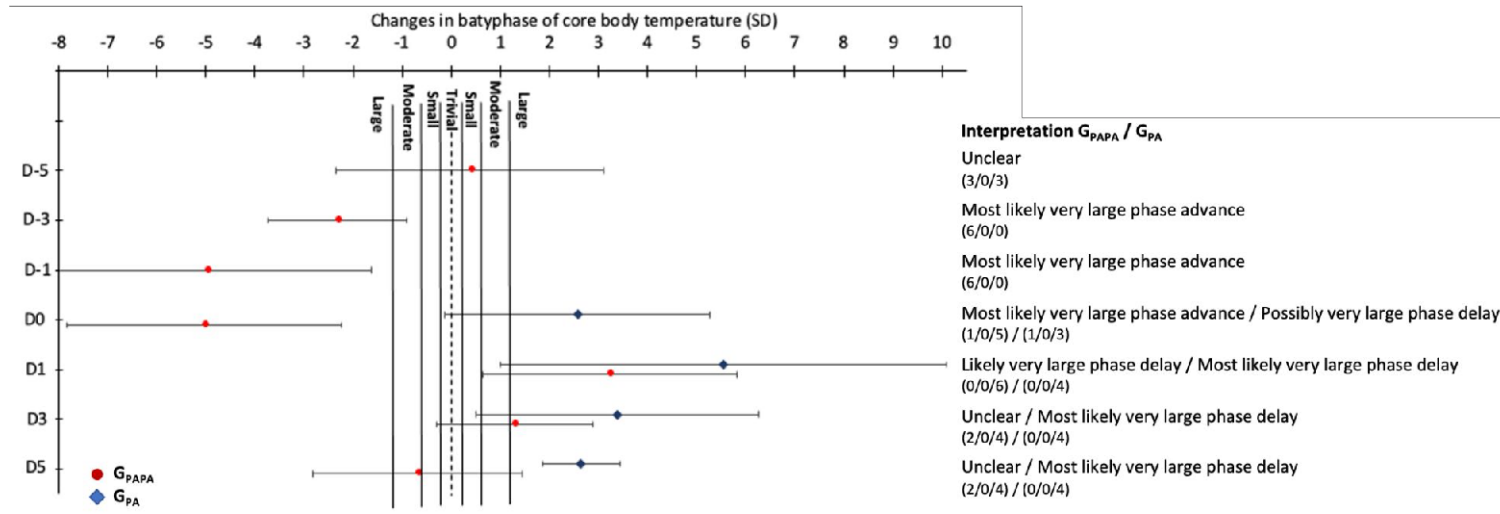


446

447 Figure 2: Scatter plot of total sleep time for G_{PAPA} ● and G_{PA} ◆

448 G_{PAPA} means group "Phase Advance and Phase Adjustment"

449 G_{PA} means group "Phase Adjustment".



449

450 *Figure 3: Scatter plot of core body temperature batyphase in G_{PAPA} and G_{PA}*

451 G_{PAPA} means group "Phase Advance and Phase Adjustment".

452 G_{PA} means group "Phase Adjustment".

453

Review

Table 2: Sleep and CBT data in both strategies from D-5 to D5 for G_{PAPA} and from D0 to D5 for G_{PA} compared to baseline values.

	G_{PAPA}							G_{PA}				
	D-5	D-3	D-1	D0	D1	D3	D5	D0	D1	D3	D5	
Sleep parameters	Bedtime (min)	-55.7±17.5***	-134.8±27.1***	-173.2±26.9***	-235.7±53.5***	-39.0±31.0***	-29.8±29.0**	-18.5±23.7*	147.3±38.4***	39.8±34.8**	-65.3±48.8***	-37.8±50.5**
	SOL (min)	-4.0±13.7*	-5.7±13.3*	-5.7±11.8*	-9.0±12.1**	-7.3±13.0**	-9.0±12.0**	-4.7±7.9*	-11±8.9**	-1.0±10.9	-8.5±11.8**	-4.8±6.2*
	Wake up time (min)	-27.8±42.2**	-97.0±50.1***	-161.2±39.1***	-290±140.5***	-3.7±48.0	-7.0±47.2	4.7±37.4	-19±98.2**	19.8±43.5**	-94.0±32.6***	-14.0±24.7*
	WASO (min)	0.5±5.5	5.5±17.0	-1.2±2.8	47.2±7.5***	3.8±13.0	1.3±7.1	-1.3±2.8	20.5±24.1***	24.5±21.5***	-13.2±21.5***	-24.5±43.8***
	TIB (min)	27.8±38.6**	37.8±49.6***	12.0±27.6*	-54.7±107.1***	35.3±21.6***	22.8±41.6**	23.2±40.6**	-166.3±68.4***	-20.0±47.1**	-28.8±17.3***	23.9±50.5**
	TST (min)	35.5±39.8***	35.5±36.4***	23.0±17.8**	-89.5±139.7***	36.3±33.3***	24.7±42.6**	29.0±30.7**	-176.8±103.9***	3.3±28.1	-56.8±66.0***	50.8±48.8***
	SE (%)	1.4±3.6*	0.2±4.2	2.1±2.5**	-16.4±34.8***	0.4±4.4	0.4±5.8	1.2±2.6*	-8.6±16.6**	1.3±6.9	-6.1±11.9**	4.9±7.0*
CBT	Batyphase (min)	11.8±48.5	-71.9±7.5***	-153.7±55.6***	-155.5±36.3***	99.8±35.4***	39.6±25.8**	-21.5±15.5**	79.0±83.1***	170.6±139.7***	104.3±88.5***	81.2±24.2***
	Nadir (°C)	0.10±0.15**	-0.09±0.12**	-0.06±0.20*	-0.20±0.22**	-0.32±0.22***	-0.03±0.25*	-0.20±0.13***	-0.17±0.33*	-0.00±0.22	-0.12±0.13*	0.28±0.21**

Data are expressed as mean ± SD, WASO: wake after sleep onset; TIB: time in bed; TST: total sleep time; SE: sleep efficiency; SOL: sleep onset latency; CBT: core body temperature; * when small difference was observed; ** when moderate difference was observed; *** when large difference was observed.

Baseline period: sleep-wake and core body temperature rhythms were evaluated for 7 days

G_{PAPA} means group "Phase Advance and Phase Adjustment".

G_{PA} means group "Phase Adjustment".

DISCUSSION GENERALE

L'originalité de ce travail réside dans le fait nous nous soyons intéressés à une catégorie de sportifs très particulière, à savoir des cyclistes, pratiquant un sport individuel, à un très haut niveau, ayant de surcroît le statut d'athlètes professionnels. Le profil physiologique et psychologique de ces athlètes, leur niveau d'expertise, les nombreuses contraintes et pressions qu'ils peuvent subir, sont autant de facteurs à considérer dans des études chronobiologiques, qui expliquent probablement les rares études conduites avec cette population.

Dans le cyclisme de haut niveau, et tout particulièrement dans les disciplines individuelles, comme le VTT XCO ou le cyclisme sur route, des qualités physiques et techniques sont indispensables. Ces qualités, attestées par une puissance maximale aérobie (ou PMA, puissance mécanique développée à une intensité d'effort équivalente à $\dot{V}O_{2max}$) et une capacité aérobie (puissance mécanique développée aux seuils ventilatoires/lactiques) élevées (Bosquet *et al.* 2002), sont corrélées positivement à la performance en compétition (Hawley and Noakes 1992 ; Balmer *et al.* 2000 ; Tan and Aziz 2005 ; Spragg *et al.* 2022). Pour autant, l'optimisation de ces qualités physiques et physiologiques, mais aussi mentales, nécessite une hygiène de vie irréprochable, que ce soit en termes de nutrition ou de sommeil, afin d'exploiter le maximum de son potentiel physique, à chaque entraînement et compétition. Il est donc impératif que ces sportifs respectent leurs rythmes endogènes, leurs heures de coucher et de lever, car ces horaires constants représentent des synchroniseurs majeurs du cycle veille-sommeil.

Une autre particularité de ces athlètes professionnels, c'est que leur sport représente leur unique activité professionnelle. L'entraînement n'est pas collectif et n'est assujéti à aucune structure d'entraînement. En effet, dans cette discipline, contrairement à d'autres sports, les athlètes peuvent parfois s'entraîner de manière collective mais le plus souvent seuls, selon leurs propres rythmes et leur propre chronotype. De plus, le cyclisme se pratique en plein air, il garantit donc aux athlètes une exposition quotidienne à la lumière naturelle, « zeitgeber » majeur pour synchroniser au maximum l'horloge biologique.

Notre première étude a montré que 77 % de ces cyclistes avaient un chronotype « modérément du matin », présentant des dispositions pour des entraînements et des

performances en journée. Comme l'ont suggéré Lastella *et al.* (2016), ces athlètes, de par leurs horaires d'entraînements et de compétitions (plutôt le matin et/ou début d'après-midi) ont pu adapter leur mode de vie à leur typologie circadienne ou inversement.

Ces particularités expliquent probablement que les cyclistes de l'équipe de France Elite de VTT XCO et les routiers dorment en moyenne 8 h par nuit, un temps total de sommeil supérieur à celui retrouvé dans les études antérieures (Sargent *et al.* 2014b ; Lastella *et al.* 2015c ; Caia *et al.* 2017 ; Fuller *et al.* 2017 ; Van Ryswyk *et al.* 2017), qui était compris entre 6,5 h et 7,5 h par nuit chez des athlètes de haut niveau. De plus, dans notre étude, les données recueillies par actimétrie durant un mois ont confirmé la régularité du sommeil. L'architecture du sommeil, évaluée par PSG, avec des pourcentages en stade 3 (21,3%) et en R (20,9%), correspondant à ceux recommandés pour les sportifs, atteste aussi de la bonne qualité de leur sommeil. Ces mêmes observations avaient déjà été rapportées dans les rares études ayant enregistré le sommeil des athlètes de haut niveau par PSG (Gosselin *et al.* 2009 ; Hoshikawa *et al.* 2010 ; Suppiah *et al.* 2015 ; Tuomilehto *et al.* 2017 ; Estivill-Domènech *et al.* 2018 ; Dunican *et al.* 2019a). Toutefois, il semble utile de souligner que, dans notre première étude, les mesures ont été réalisées lors d'une période d'entraînement, donc en dehors de tout stress lié à une compétition. Les données polysomnographiques correspondent bien à celles de leur sommeil habituel, obtenu dans des conditions réelles, donc en dehors de tous facteurs susceptibles de perturber leur sommeil. A ceci s'ajoute une bonne perception subjective du sommeil ; pour 77% d'entre eux, ce pourcentage étant plus élevé que celui rapporté par plusieurs auteurs (Samuels 2008 ; Aguero *et al.* 2015 ; Bleyer *et al.* 2015 ; Swinbourne *et al.* 2016) qui avaient observé que 38 à 79 % des athlètes de haut niveau avaient une mauvaise perception de leur sommeil. Toutefois, soulignons que dans notre étude, ce sont surtout les athlètes féminines qui perçoivent leur sommeil comme étant de mauvaise qualité, sans doute en raison d'un plus haut niveau d'anxiété et/ou de tension nerveuse, connus pour générer des difficultés d'endormissement (Ramsawh *et al.* 2009).

Ces travaux nous permettent de confirmer que ces cyclistes de haut niveau et leur encadrement (entraîneur, médecin, kinésithérapeute, nutritionniste, mécanicien, podologue, etc.) optimisent de nombreux paramètres de la performance et parmi eux, le sommeil qui représente un facteur clé dans le processus de récupération. Le suivi du sommeil des vététistes français, parmi les meilleurs au monde (la France était 2^{ème} nation au

classement de l'Union Cycliste Internationale en 2017 et 2018, 3^{ème} en 2019, 1^{ère} en 2020 et 2^{ème} en 2021), a donc démontré que ces athlètes accordent une place prépondérante au sommeil dans leur récupération, pour atteindre le plus haut niveau de performance.

Dans la seconde partie de ce travail, les deux stratégies de préparation au décalage horaire, expérimentées en vue des JO de Tokyo, chez des cyclistes de disciplines différentes, étaient originales et novatrices puisqu'elles ont été étudiées en situation écologique, tout en prenant en compte les nombreuses contraintes liées à chaque discipline. En effet, la volonté des cyclistes spécialistes du VTT XCO, pressentis pour participer aux JO, était de se rendre au Japon, le plus tard possible, tout en étant le moins désynchronisés possible sur place. Pour répondre à cette problématique, et pour réduire le temps nécessaire à la resynchronisation à destination, une stratégie d'avance de phase du rythme veille-sommeil, à domicile, précédant le vol, suivie d'une période de resynchronisation à destination a été étudiée. Toutefois, cette même stratégie n'a pas été possible pour les cyclistes spécialistes de la route, de par leur participation au Tour de France les jours précédant les JO. C'est pourquoi, pour ces cyclistes, la préparation comportait une resynchronisation active seulement en post-vol, à destination, sans anticipation en amont. Ces études ont été mises en place lors des « Tests event », des compétitions ayant lieu sur les sites mêmes des compétitions des futurs JO. Ces épreuves servent de répétition à la fois sur les aspects techniques et logistiques. Bien que les enjeux sportifs soient moindres, ces compétitions sont primordiales pour la préparation ultime des athlètes aux JO.

Notre première stratégie de préparation au décalage horaire (France-Japon), a consisté, d'abord à domicile, en une avance progressive de l'heure du coucher 30 min/jour durant 6 jours, couplée à une prise vespérale de 0,5 mg de mélatonine, 2 h avant l'heure du coucher, et à 20 minutes de luminothérapie au réveil, suivie d'une resynchronisation sur place en respectant le rythme veille-sommeil au nouveau fuseau horaire, mais avec les mêmes modalités de luminothérapie et une dose de mélatonine augmentée à 2 mg. Cette stratégie a été efficace puisqu'elle n'a pas modifié la composition du sommeil. Parallèlement, elle a permis de décaler le rythme de la température interne avec un nadir avancé de 2 h 30 sur les 3 h au total. Ces résultats corroborent ceux de Revell *et al.* (2006) qui avaient observé, après une avance de phase, comparable à la nôtre mais chez des sujets adultes en bonne santé, une avance de phase de la DLMO de 2 h 30. Bien que les conditions expérimentales et le marqueur chronobiologique étaient différents de ceux étudiés dans nos

études, nous pouvons affirmer que les rythmes de la température et/ou de la mélatonine sont capables de se désynchroniser simultanément à celui du rythme veille-sommeil, favorisant ainsi la stabilité du sommeil. Ces constatations sont représentées schématiquement sur la figure 29.

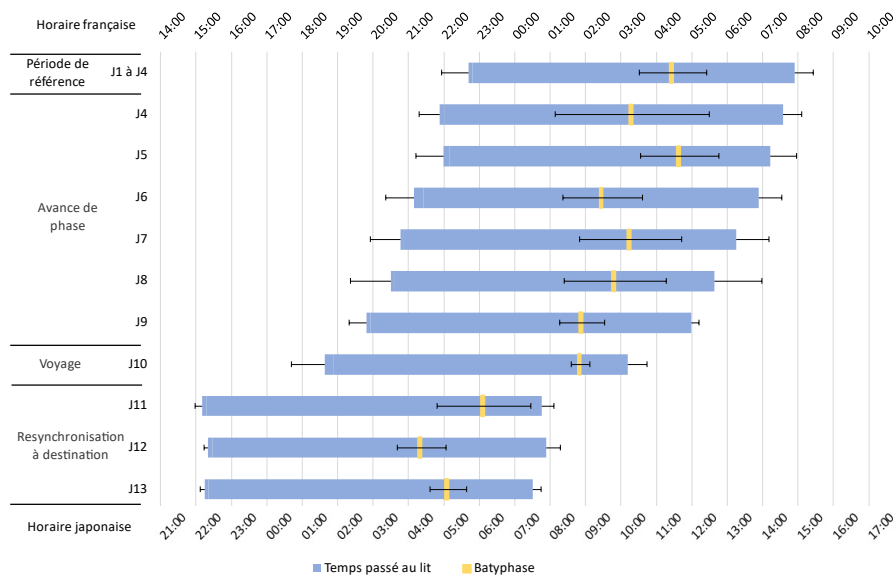


Figure 29 : Rythme veille-sommeil suivi par actimétrie (en bleu, représentant les heures du coucher et de lever et la durée totale de sommeil moyennées) et batyphase de la température interne enregistrée grâce à la capsule e-Celsius (représentée par les traits verticaux en jaune), durant la stratégie 1 effectuée par les cyclistes spécialistes du VTT XCO.

Ainsi, le suivi par télémétrie du rythme de la température interne, au moyen de capsules ingérables e-Celsius, couplé au suivi de la veille et du sommeil par un agenda du sommeil et/ou un actimètre, représente une alternative intéressante pour comprendre comment les rythmes circadiens s’ajustent les uns par rapport aux autres dans des stratégies de préparation au décalage, qu’elles soient simulées en laboratoire ou conduites dans des conditions réelles et écologiques.

Durant le vol direct, sans escale, alors que les athlètes avaient pour consigne de garder les mêmes horaires de coucher qu’avant vol, le TTS a été réduit. Cette baisse, bien que non souhaitée, était expliquée par les contraintes et l'inconfort du voyage en avion. Pour autant, cette moindre quantité de sommeil n’a pas eu d’impact sur les autres rythmes, déjà partiellement calés sur les horaires du Japon. À destination, la resynchronisation rapide du rythme de la température, sur les nouveaux fuseaux horaires, s’est confirmée. Seul le TTS avait augmenté la première nuit post-vol, très certainement en raison de la fatigue du voyage, de la durée de veille prolongée, et de la privation de sommeil (Kölling *et al.* 2017 ; Rossiter *et al.* 2021).

Quant aux performances des athlètes, qu'il s'agisse de la puissance mécanique au Wingate Test ou de celle mesurée lors du CLM5, elles ont été identiques aux données de référence, quelle que soit l'heure à laquelle elles ont été mesurées. De même, les réponses physiologiques à l'exercice étaient similaires dans toutes les conditions (post avance de phase, à destination et à distance). Sans pour autant le confirmer, notamment en raison de l'absence d'une condition contrôle, nous pouvons supposer que cette première stratégie a été bénéfique pour ce groupe d'athlètes, puisque leurs performances n'ont pas été altérées par le décalage horaire.

La seconde stratégie, qui a consisté en une administration de 2 mg de mélatonine et une exposition à la lumière uniquement à destination durant 5 jours, s'est avérée moins efficace que la première stratégie. En effet, bien que le rythme de la température interne se soit resynchronisé de 30 minutes chaque jour dans les 2 stratégies, nous avons montré que le retard de phase était bien plus important à l'arrivée du vol dans la seconde stratégie, ce qui a nécessité un nombre de jours plus important pour se resynchroniser totalement au nouvel horaire. De même, les horaires du coucher et du lever étaient très variables d'une nuit à l'autre et le sommeil post-vol était très fragmenté. Ce sommeil « chaotique » explique probablement la difficulté de l'horloge biologique interne, à s'adapter à l'horaire japonaise.

Il est à souligner que dans nos études principales, pour des raisons évidentes, une condition contrôle, ne comportant aucune préparation avant ou après le vol, n'a pas été possible. Pour pallier ce biais méthodologique, la performance de référence évaluée uniquement lors de la première étude, a été mesurée à l'heure habituelle d'une compétition en France (à 15 h) et à l'horaire habituel de compétition au Japon (à 8 h soit avec une avance de l'horaire de 7 heures). Enfin, bien que nos résultats soient prometteurs, ils doivent être confirmés, avec une cohorte de sujets plus importants et/ou chez des sportifs professionnels, issus d'autres disciplines sportives.

En conclusion, ces études ont mis en évidence l'importance d'anticiper une partie du décalage horaire, à domicile, avant un vol long-courrier vers l'Est, afin de réduire le temps nécessaire pour resynchroniser à destination les rythmes biologiques, notamment celui de la température interne. L'avance de phase, réalisée à domicile, a surtout permis aux sportifs de prévenir certains effets délétères du « Jet Lag », notamment la dette de sommeil, la fatigue et a contribué à retrouver rapidement un sommeil de quantité et de qualité.

Etude 1


Sommeil  **VTT** 



Athlètes professionnels
Pratique individuelle
Compétitions en journées
Peu de déplacements transméridiens


Sommeil :
- Quantité suffisante (8h00)
- Bonne qualité (42 % N3 + R)
- Aucune pathologie



Chronotype du matin ou intermédiaire


Etude 2



VTT 



Avance de phase  **Maintien de l'avance de phase** 



-2h30 Conservation  -2h30


Avance de l'heure de coucher de 30min/jour durant 6 jours  

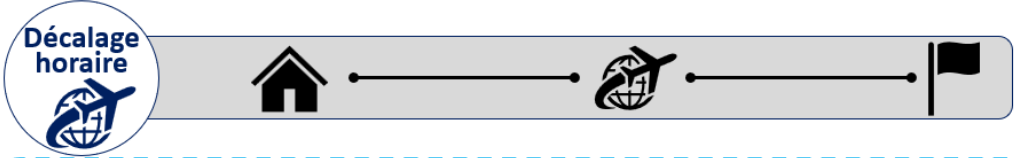
Vol direct Paris - Tokyo 

3^{ème} nuit  -6h20 


1^{ère} nuit  -5h20 

Resynchronisation à destination  


Conservation 







Etude 3



Route 


Maintien du rythme veille sommeil

Vol direct Paris - Tokyo 

Resynchronisation à destination  

1^{ère} nuit  Conservation  -4h10

3^{ème} nuit  Réduction  -5h06

+1h30 réduction 









- En comparaison à la période de référence :
-  Performances physiques
 -  Ingestion de 0,5 mg de mélatonine
 -  Athlètes professionnels en VTT cross-country
 -  Ingestion de 2 mg de mélatonine
 -  Luminothérapie
 -  Athlètes professionnels en cyclisme sur route
 -  Sommeil
 -  Batyphase de température interne

Figure 30 : résumé des 3 études réalisées au cours de ce travail de thèse

CONCLUSION

Les cyclistes professionnels ont désormais admis que le sommeil fait partie du « triptyque gagnant » avec l'alimentation et l'entraînement. En effet, un sommeil perturbé et/ou des troubles du rythme circadien dérèglent rapidement l'horloge biologique interne, à l'origine de contre-performances chez les athlètes. À l'heure actuelle, dans le haut niveau, l'encadrement tente de repérer rapidement tous les éléments qui pourraient troubler le sommeil de leurs coureurs et les sensibilisent tout au long de la saison à l'importance d'un sommeil récupérateur. Ainsi, leur apprendre à repérer les premiers signes de fatigue, à ne pas retarder l'heure du coucher, et à éviter les écrans en soirée est crucial pour récupérer et assimiler les charges d'entraînements répétées. Une régularité du rythme veille-sommeil et un temps de sommeil adapté à leurs besoins sont primordiaux, car l'accumulation de la fatigue s'accompagne d'une plus grande vulnérabilité tant sur le plan psychique que physiologique, d'autant plus lors de périodes de « surcharge ». Il serait intéressant dès lors de s'interroger sur la manière d'utiliser les données de la chronobiologie pour optimiser la performance de l'athlète. À quel moment placer les entraînements selon qu'ils sollicitent principalement le métabolisme aérobie ou anaérobie, afin d'optimiser le sommeil subséquent ?

Ce travail a donc permis de confirmer qu'en cas de compétitions sportives nécessitant la traversée de plusieurs fuseaux horaires, de surcroît vers l'Est, une stratégie de préparation est primordiale pour minimiser les effets néfastes du Jet Lag, qui pourraient se surajouter à une fatigue aiguë liée aux voyages, aux charges d'entraînements et à l'enchaînement de compétitions sportives. En effet, en cas de déplacement transméri dien, l'horloge biologique se désynchronise en raison de l'inadéquation des relations entre l'horloge interne et les synchroniseurs, ou à un défaut, d'entraînement de l'horloge ou un dysfonctionnement propre de l'horloge. Ces causes sont variées mais se retrouvent dans des situations telles que les vols long-courriers avec au moins 3 fuseaux horaires franchis. La mélatonine et l'exposition à la lumière, deux agents fondamentaux du contrôle de l'horloge, permettent de « remettre l'horloge » à l'heure. Utilisées seules ou en association, elles sont capables d'ajuster le fonctionnement de notre horloge interne. Ainsi, l'entraînement de cette horloge, grâce à des protocoles de décalage de phase du rythme veille-sommeil, couplés à l'utilisation d'agents d'entraînement comme la mélatonine et la lumière s'est

avéré efficace chez le sportif de haut niveau. Lors de l'élaboration de ces stratégies, indépendamment de la prise en compte du nombre de fuseaux horaires, il est aussi important de se préoccuper de « l'horaire solaire », donc des horaires du coucher et lever du soleil, que ce soit à domicile ou à destination, car ils contribuent à accélérer la resynchronisation des rythmes biologiques. Enfin, la mise en place de ces stratégies est certainement d'autant plus efficace chez des sportifs ne présentant aucune dette de sommeil préalable. Les résultats de ces travaux doivent toutefois être confirmés par des études complémentaires, qui pourraient être conduites sur une population de sportifs qui pratique d'autres sports et idéalement dans de réelles conditions de compétitions.

PERSPECTIVES

Ces travaux ont mis en exergue, en particulier pour les cyclistes de haut niveau, l'importance du sommeil, non seulement dans la récupération mais aussi dans la préparation à des échéances compétitives. Ils ont permis de mettre en place des stratégies de suivi de la quantité et qualité du sommeil de ces athlètes. A ce titre, nous avons proposé, dans le cadre de notre travail de CIFRE, une méthode simple de dépistage des troubles du sommeil de ces athlètes, allant de la simple perception d'un mauvais sommeil, à des dettes de sommeil ou une fatigue excessive. Ainsi, « l'Athlète Sleep Screening Questionnaire » (traduit par nos soins en langue française ; Annexe 2), permettra de suivre les habitudes du sommeil, la perception subjective du sommeil de tous les athlètes de l'équipe de France de la FFC, pour dépister très rapidement le moindre trouble. En cas de doute, une consultation auprès d'un médecin du sommeil sera proposée. Le déroulement de ce suivi est résumé dans l'Annexe 5. De plus, pour sensibiliser les plus jeunes athlètes [catégories jeunes (cadets, 15-16 ans et juniors 17-18 ans)] à avoir une bonne hygiène du sommeil et à mieux appréhender le rôle du sommeil dans la récupération physique et psychique, une éducation au sommeil par plusieurs interventions orales ont été et seront effectuées et des plaquettes d'informations leur ont été et seront diffusées. En effet, informer de manière pédagogique tous ces jeunes athlètes entrant dans le circuit du haut niveau, sur leur rythme veille-sommeil, leur chronotype, leurs besoins en matière de sommeil, leurs stratégies personnelles de récupération ou de gestion des contraintes du haut niveau (déplacements fréquents, transport en commun, avec ou sans décalage horaire) est important, tant pour eux-mêmes que pour les entraîneurs, afin de mieux individualiser et planifier leurs entraînements.

En perspective des Jeux de Paris 2024, ou de Los Angeles 2028, il serait intéressant de poursuivre ce travail auprès de ces jeunes (qui seront potentiellement les athlètes qui participeront aux prochains JO) et d'optimiser les stratégies de préparation au décalage horaire, en proposant ce qu'on pourrait nommer un « jet lag plan », tout en prenant en compte, non seulement les contraintes des athlètes (heures, volume, type d'entraînement, etc.), les horaires des vols, mais aussi le nombre de fuseaux traversés et dans la mesure du possible, « l'horaire solaire ». Enfin, au cours de ces dernières décennies, de nombreuses

études ont investigué les effets d'une extension de sommeil sur les performances sportives et les résultats, bien que divergents, se sont avérés positifs. Il serait donc intéressant à terme de vérifier si une extension de sommeil, en anticipation d'un décalage horaire, pourrait ou non agir efficacement sur les rythmes biologiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aguero SD, Jofre PA, Standen CV, Herrera-Valenzuela T, Cantillana CM, Robledo RP, Valdes-Badilla P (2015) Calidad del sueño, somnolencia e insomnio en deportistas paralímpicos de elite chilenos. *Nutr Hosp* 32:2832–2837
- Åkerstedt T (2007) Altered sleep/wake patterns and mental performance. *Physiol Behav* 90:209–218
- American Academy of Sleep Medicine (2014) International classification of sleep disorders, 3rd ed
- Antic NA, Weeks R, McEvoy D, Sargent C, Jarema L, Okeefe M, Catcheside P (2013) Prevalence of sleep disorders and excessive daytime sleepiness in an elite Australian rules football team. *Am J Respir Crit Care Med* A3455
- Arendt J (2009) Managing jet lag: Some of the problems and possible new solutions. *Sleep Med Rev* 13:249–256
- Arendt J (2018) Approaches to the Pharmacological Management of Jet Lag. *Drugs* 78:1419–1431
- Arnal PJ, Thorey V, Debellemanni E, Ballard ME, Hernandez AB, Guillot A, Jourde H, Harris M, Guillard M, van Beers P, Chennaoui M, Sauvet F (2020) The dreem headband compared to polysomnography for electroencephalographic signal acquisition and sleep staging. *Sleep* 43:1–13
- Atkinson G, Davenne D (2007) Relationships between sleep, physical activity and human health. *Physiol Behav* 90:229–235
- Atkinson G, Edwards B, Reilly T, Waterhouse J (2007) Exercise as a synchroniser of human circadian rhythms: an update and discussion of the methodological problems. *Eur J Appl Physiol* 99:331–341
- 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. *Chronobiol Int* 25:297–308
- Ayalon A, Inbar O, Bar-Or O (1974) Relationships among measurements of explosive strength and anaerobic power. In: Nelson RC, Morehouse CA (eds) *Biomechanics IV*. University Park Press, Baltimore, pp 572–577

- Baehr EK, Revelle W, Eastman CI (2000) Individual differences in the phase and amplitude of the human circadian temperature rhythm: with an emphasis on morningness-eveningness. *J Sleep Res* 9:117–127
- Balmer J, Davison RC, Bird SR (2000) Peak power predicts performance power during an outdoor 16.1-km cycling time trial. *Med Sci Sports Exerc* 32:1485–1490
- Bar-Or O (1987) The Wingate anaerobic test. An update on methodology, reliability and validity. *Sport Med* 4:381–394
- Bastuji H, Jouvet M (1985) Value of the sleep diary in the study of vigilance dis. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 60:299–305
- Beaumont M, Bate D, Beers P Van, Denis JB (2004) Caffeine or melatonin effects on sleep and sleepiness after rapid eastward transmeridian travel. *J Appl Physiol* 96:50–58
- Belenky G, Wesensten NJ, Thorne DR, Thomas M, Sing HC, Redmond DP, Russo MB, Balkin TJ (2003) Patterns of performance degradation and restoration during sleep restriction and subsequent recovery: a sleep dose-response study. *J Sleep Res* 12:1–12
- Bender AM, Lawson D, Werthner P, Samuels CH (2018) The Clinical Validation of the Athlete Sleep Screening Questionnaire: an Instrument to Identify Athletes that Need Further Sleep Assessment. *Sport Med.e - open* 4
- Benington JH, Heller HC (1995) Restoration of brain energy metabolism as the function of sleep. *Prog Neurobiol* 45:347–360
- Benloucif S, Burgess HJ, Klerman EB, Lewy AJ, Middleton B, Murphy PJ, Parry BL, Revell VL (2008) Measuring Melatonin in Humans. *J Clin Sleep Med* 4:66–69
- Berry RB, Quan SF, Abreu AR, Bibbs ML, DelRosso L, Harding SM, Mao M-M, Plante DT, Pressman MR, Troester MM (2020) The AASM manual for the scoring of sleep and associated events: rules, terminology and technical specifications, 3rd ed. *Am Acad Sleep Med*
- Besedovsky L, Lange T, Born J (2012) Sleep and immune function. *Pflugers Arch Eur J Physiol* 463:121–137
- Biggins M, Purtill H, Fowler P, Bender A, Sullivan KO, Samuels C, Cahalan R (2019) Sleep in elite multi-sport athletes: Implications for athlete health and wellbeing. *Phys Ther Sport* 39:136–142
- Bin YS, Postnova S, Cistulli PA (2019) What works for jetlag? A systematic review of non-pharmacological interventions. *Sleep Med Rev* 43:47–59

- Bishop D (2004) The effects of travel on team performance in the Australian national netball competition. *J Sci Med Sport* 7:118–122
- Bleyer FT de S, Barbosa DG, Andrade RD, Teixeira CS, Felden ÉPG (2015) Sleep and musculoskeletal complaints among elite athletes of Santa Catarina. *Rev Dor* 16:102–108
- Bogerd C, Velt K, Annaheim S, Bongers C, Eijsvogels T, Daanen H (2018) Comparison of two telemetric intestinal temperature devices with rectal temperature during exercise. *Physiol Meas* 39:1–10
- Boivin DB, Czeisler CA (1998) Resetting of circadian melatonin and cortisol rhythms in humans by ordinary room light. *Neuroreport* 9:779–782
- Bongers CCWG, Daanen HAM, Bogerd CP, Hopman MTE, Eijsvogels TMH (2018) Validity, Reliability, and Inertia of Four Different Temperature Capsule Systems. *Med Sci Sports Exerc* 50:169–175
- Borbély AA (1982) A two process model of sleep regulation. *Hum Neurobiol* 1:195–204
- Borbély AA (2001) From slow waves to sleep homeostasis: new perspectives. *Arch Ital Biol* 139:53–61
- Borbély AA, Daan S, Wirz-Justice A, Deboer T (2016) The two-process model of sleep regulation: A reappraisal. *J Sleep Res* 25:131–143
- Born J, Rasch B, Gais S (2006) Sleep to remember. *Neurosci* 12:410–424
- Born J, Wilhelm I (2012) System consolidation of memory during sleep. *Psychol Res* 76:192–203
- Bosquet L, Léger L, Legros P (2002) Methods to determine aerobic endurance. *Sports Med* 32:675–700
- Bouillod A, Pinot J, Soenen F, Ouvrard T, Grappe F (2017) Dependence of the nature of the pedaling activity on maximal aerobic power in cycling. *Int J Sports Physiol Perform* 12:44–49
- Boulos Z, Macchi MM, Stürchler MP, Stewart KT, Brainard GC, Suhner A, Wallace G, Steffen R (2002) Light visor treatment for jet lag after westward travel across six time zones. *Aviat Space Environ Med* 73:953–963
- Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD (2001) Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *J Neurosci* 21:6405–6412
- Brandt R, Bevilacqua GG, Andrade A (2017) Perceived sleep quality, mood states, and their

- relationship with performance among Brazilian elite athletes during a competitive period. *J Strength Cond Res* 31:1033–1039
- Bray MS, Ratcliffe WF, Grenett MH, Brewer RA, Gamble KL, Young ME (2013) Quantitative analysis of light-phase restricted feeding reveals metabolic dyssynchrony in mice. *Int J Obes* 37:843–852
- Building S (1991) a Human Phase Response Curve To Light. *Neurosci Lett* 133:36–40
- Bullock N, Martin DT, Ross A, Rosemond D, Marino FE (2007) Effect of long haul travel on maximal sprint performance and diurnal variations in elite skeleton athletes. *Br J Sport Med* 41:569–73
- Burgess HJ, Crowley SJ, Gazda CJ, Fogg LF, Eastman CI (2003) Preflight adjustment to eastward travel: 3 days of advancing sleep with and without morning bright light. *J Biol Rhythm* 18:318–328
- Burgess HJ, Revell VL, Eastman CI (2008) A three pulse phase response curve to three milligrams of melatonin in humans. *J Physiol* 586:639–647
- Burgess HJ, Revell VL, Molina TA, Eastman CI (2010) Human phase response curves to three days of daily melatonin: 0.5 mg Versus 3.0 mg. *J Clin Endocrinol Metab* 95:3325–3331
- Burke TM, Markwald RR, Chinoy ED, Snider JA, Bessman SC, Jung CM, Wright Jr. KP (2013) Combination of light and melatonin time cues for phase advancing the human circadian clock. *Sleep* 36:1617–1624
- Buysse DJ, Reynolds CF, Monk TH, Berman SR, Kupfer DJ (1989) The Pittsburgh sleep quality index: A new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Res* 28:193–213
- Caia J, Scott TJ, Halson SL, Kelly VG (2017) Do players and staff sleep more during the pre- or competitive season of elite rugby league? *Eur J Sport Sci* 17:964–972
- Campbell SS, Broughton RJ (1994) Rapid decline in body temperature before sleep: fluffing the physiological pillow? *Chronobiol Int* 11:126–131
- Cardinali DP, Brusco LI, Pérez SL, Furio AM (2002) Melatonin in sleep disorders and jet-lag. *Neuro Endocrinol Lett* 23:9–13
- Carrard J, Rigort A-C, Appenzeller-Herzog C, Colledge F, Königstein K, Hinrichs T, Schmidt-Trucksäss A (2021) Diagnosing Overtraining Syndrome: A Scoping Review. *Sports Health* 14:665–673
- 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. *Sci Med Footb* 2:9–15
- Cesarone MR, Belcaro G, Errichi BM, Nicolaidis AN, Geroulakos G, Ippolito E, Winford M, Lennox A, Pellegrini L, Myers KA, Ricci A, Hans C, Simeone E, Bavera P, Dugall M, Moia M, Stuard S (2003) The LONFLIT4--Concorde Deep Venous Thrombosis and Edema Study: prevention with travel stockings. *Angiology* 54:143–154
- Cha HK, Chung S, Lim HY, Jung J-W, Son GH (2018) Small Molecule Modulators of the Circadian Molecular Clock With Implications for Neuropsychiatric Diseases. *Front Mol Neurosci* 11:496
- Chapman DW, Bullock N, Ross A, Rosemond D, Martin DT (2012) Detrimental effects of West to East transmeridian flight on jump performance. *Eur J Appl Physiol* 112:1663–1669
- Chriskos P, Frantzidis CA, Nday CM, Gkivogkli PT, Bamidis PD, Kourtidou-Papadeli C (2021) A Review on Current Trends in Automatic Sleep Staging through Bio-Signal Recordings and Future Challenges. *Sleep Med Rev* 55:101377
- Christopher, Winter W, Hammond WR, Green NH, Zhang Z, Bliwise DL (2009) Measuring circadian advantage in Major League Baseball: a 10-year retrospective study. *Int J Sports Physiol Perform* 4:394–401
- Cingi C, Emre IE, Muluk NB (2018) Jetlag related sleep problems and their management: A review. *Travel Med Infect Dis* 24:59–64
- Cohen J (1988) *Statistical power analysis for the behavioural sciences*, 2nd edn. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 577p
- Cohen S, Doyle WJ, Alper CM, Janicki-Deverts D, Turner RB (2009) Sleep habits and susceptibility to the common cold. *Arch Intern Med* 169:62–67
- Cole RJ, Kripke DF, Mullaney DJ, Gillin JC (1992) Technical Note Automatic Sleep / Wake Identification From Wrist Activity. *Am Sleep Disord* 15:461–469
- Cornelissen G (2014) Cosinor-based rhythmometry. *Theor Biol Med Model* 11:1–24
- Coste O, Van Beers P, Touitou Y (2009) Hypoxia-induced changes in recovery sleep, core body temperature, urinary 6-sulphatoxymelatonin and free cortisol after a simulated long-duration flight. *J Sleep Res* 18:454–465
- Crosby P, Hamnett R, Putker M, Hoyle NP, Reed M, Karam CJ, Maywood ES, Stangherlin A, Chesham JE, Hayter EA (2019) Insulin/IGF-1 drives PERIOD synthesis to entrain circadian rhythms with feeding time. *Cell* 177:896–909

- Crowley SJ, Eastman CI (2012) Melatonin in the afternoons of a gradually advancing sleep schedule enhances the circadian rhythm phase advance. *Psychopharmacology (Berl)* 225:825–837
- Crowley SJ, Eastman CI (2015) Phase advancing human circadian rhythms with morning bright light, afternoon melatonin, and gradually shifted sleep: can we reduce morning bright-light duration? *Sleep Med* 16:288–297
- Czeisler CA, Allan JS, Strogatz SH, Ronda JM, Sánchez R, David Ríos C, Freitag WO, Richardson GS, Kronauer RE (1986) Bright light resets the human circadian pacemaker independent of the timing of the sleep-wake cycle. *Science* 233:667–671
- Czeisler CA, Duffy JF, Shanahan TL, Brown EN, Mitchell JF, Rimmer DW, Ronda JM, Silva EJ, Allan JS, Emens JS, Dijk DJ, Kronauer RE (1999) Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker. *Science* 284:2177–2181
- Daan S, Beersma DG, Borbély AA (1984) Timing of human sleep: recovery process gated by a circadian pacemaker. *Am J Physiol* 246:R161-83
- Dacey DM, Liao H-W, Peterson BB, Robinson FR, Smith VC, Pokorny J, Yau K-W, Gamlin PD (2005) Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. *Nature* 433:749–754
- Damiola F, Le Minh N, Preitner N, Kornmann B, Fleury-Olela F, Schibler U (2000) Restricted feeding uncouples circadian oscillators in peripheral tissues from the central pacemaker in the suprachiasmatic nucleus. *Genes Dev* 14:2950–2961
- Darwent D, Ferguson SA, Sargent C, Paech GM, Williams L, Zhou X, Matthews RW, Dawson D, Kennaway DJ, Roach GD (2010) Contribution of core body temperature, prior wake time, and sleep stages to cognitive throughput performance during forced desynchrony. *Chronobiol Int* 27:898–910
- Daurat A, Benoit O, Buguet A (2000) Effects of zopiclone on the rest/activity rhythm after a westward flight across five time zones. *Psychopharmacology (Berl)* 149:241–245
- De La Iglesia HO, Fernández-Duque E, Golombek DA, Lanza N, Duffy JF, Czeisler CA, Valeggia CR (2015) Access to Electric Light Is Associated with Shorter Sleep Duration in a Traditionally Hunter-Gatherer Community. *J Biol Rhythms* 30:342–350
- De Souza L, Benedito-Silva A, Nogueira Pires LM, Poyares D, Tufik S, Calil HM (2003) Further Validation of Actigraphy for Sleep Studies. *Sleep* 26:81–85
- De Zambotti M, Baker FC, Colrain IM (2015) Validation of Sleep-Tracking Technology

- Compared with Polysomnography in Adolescents. *Sleep* 38:1461–1468
- De Zambotti M, Cellini N, Goldstone A, Colrain IM, Baker FC (2019) Wearable Sleep Technology in Clinical and Research Settings. *Med Sci Sports Exerc* 51:1538–1557
- Dement W, Kleitman N (1957) Cyclic variations in EEG during sleep and their relation to eye movements, body motility, and dreaming. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 9:673–690
- Dijk DJ, Duffy JF (2020) Novel Approaches for Assessing Circadian Rhythmicity in Humans: A Review. *J Biol Rhythms* 35:421–438
- Dijk DJ, Duffy JF, Czeisler CA (1992) Circadian and sleep/wake dependent aspects of subjective alertness and cognitive performance. *J Sleep Res* 1:112–117
- Dijk DJ, Duffy JF, Silva EJ, Shanahan TL, Boivin DB, Czeisler CA (2012) Amplitude reduction and phase shifts of Melatonin, cortisol and other circadian rhythms after a gradual advance of sleep and light exposure in humans. *PLoS One* 7:e30037
- Doran SM, Van Dongen HPA, Dinges DF (2001) Sustained attention performance during sleep deprivation: evidence of state instability. *Arch Ital Biol* 139:253–267
- Dorrian J, Rogers NL, Dinges DF (2005) Psychomotor vigilance performance: Neurocognitive assay sensitive to sleep loss. In: Clete A. Kushida (ed) *Sleep Deprivation*, 1st editio. Marcel Dekker New York, NY, pp 39–70
- Duffield R, Fowler PM (2018) Domestic and International Travel. *Sport Recover Perform* 183–197
- Duffy JF, Czeisler CA (2009) Effect of light on human circadian physiology. *Sleep Med Clin* 4:165–177
- Duguay D, Cermakian N (2009) The crosstalk between physiology and circadian clock proteins. *Chronobiol Int* 26:1479–1513
- Dunican IC, Caldwell J, Caldwell JL (2015) *Managing sleep & jet lag for optimal performance, a guide for business and athletic performance*, 1st editio. Amazon
- Dunican IC, Eastwood PR, Murray K, Caldwell JA, Reale RJ (2019a) The Effect of Water Loading for Acute Weight Loss Following Fluid Restriction on Sleep Quality and Quantity in Combat Sports Athletes. *J Exerc Nutr* 2:1–9
- Dunican IC, Walsh J, Higgins CC, Jones MJ, Maddison K, Caldwell JA, David H, Eastwood PR (2019b) Prevalence of sleep disorders and sleep problems in an elite super rugby union team. *J Sports Sci* 37:950–957

- Durán Agüero S, Arroyo Jofre P, Varas Standen C, Herrera-Valenzuela T, Moya Cantillana C, Pereira Robledo R, Valdés-Badilla P (2015) Calidad del sueño, somnolencia e insomnio en deportistas paralímpicos de elite chilenos. *Nutr Hosp* 32:2832–2837
- Durmer JS, Dinges DF (2005) Neurocognitive consequences of sleep deprivation. *Semin Neurol* 25:117–129
- Dworak M, McCarley RW, Kim T, Kalinchuk A V., Basheer R (2010) Sleep and brain energy levels: ATP changes during sleep. *J Neurosci* 30:9007–9016
- Eastman CI, Boulos Z, Terman M, Campbell SS, Dijk D-J, Lewy AJ (1995) Light treatment for sleep disorders: consensus report: VI. Shift work. *J Biol Rhythms* 10:157–164
- Eastman CI, Burgess HJ (2009) How to Travel the World Without Jet Lag. *Sleep Med Clin* 4:241–255
- Eastman C, Gazda CJ, Burgess HJ, Crowley SJ, Fogg LF (2005) Advancing Circadian Rhythms Before Eastward Flight: A Strategy to Prevent or Reduce Jet Lag. *Sleep* 28:33–44
- Eastman CI, Martin SK (1999) How to use light and dark to produce circadian adaptation to night shift work. *Ann Med* 31:87–98
- Ebbinghaus H (1885) *Über das gedächtnis: untersuchungen zur experimentellen psychologie.* Duncker & Humblot
- Edwards BJ, Atkinson G, Waterhouse J, Reilly T, Godfrey R, Budgett R (2000) Use of melatonin in recovery from jet-lag following an eastward flight across 10 time-zones. *Ergonomics* 43:1501–1513
- Emsellem HA, Murtagh KE (2005) Sleep apnea and sports performance. *Clin Sports Med* 24:329–341
- Estivill-Domènech C, Galilea B, Rodríguez-Morilla B, de Yzaguirre I, Estivill E, López E, Zamora MA, Madrid JA, Segarra F (2018) Do elite athletes sleep well? *Apunt Med l'Esport* 53:47–54
- Flower DJC, Irvine D, Folkard S (2003) Perception and predictability of travel fatigue after long-haul flights: A retrospective study. *Aviat Space Environ Med* 74:173–179
- Forbes-Robertson S, Dudley E, Vadgama P, Cook C, Drawer S, Kilduff L (2012) Circadian disruption and remedial interventions: effects and interventions for jet lag for athletic peak performance. *Sport Med* 42:185–208
- Fowler PM, Duffield R, Lu D, Hickmans JA, Scott TJ (2016) Effects of long-haul transmeridian travel on subjective jet-lag and self-reported sleep and upper respiratory symptoms in

- professional rugby league players. *Int J Sports Physiol Perform* 11:876–884
- Fowler PM, Duffield R, Morrow I, Roach G, Vaile J (2015) Effects of sleep hygiene and artificial bright light interventions on recovery from simulated international air travel. *Eur J Appl Physiol* 115:541–553
- Fowler P, Duffield R, Vaile J (2014) Effects of simulated domestic and international air travel on sleep, performance, and recovery for team sports. *Scand J Med Sci Sport* 25:441–451
- Fowler PM, Knez W, Crowcroft S, Mendham AE, Miller J, Sargent C, Halson S, Duffield R (2017a) Greater Effect of East versus West Travel on Jet Lag, Sleep, and Team Sport Performance. *Med Sci Sports Exerc* 49:2548–2561
- Fowler PM, McCall A, Jones M, Duffield R (2017b) Effects of long-haul transmeridian travel on player preparedness: case study of a national team at the 2014 FIFA World Cup. *J Sci Med Sport* 20:322–327
- Fry RW, Morton AR, Garcia-Webb P, Crawford GPM, Keast D (1992) Biological responses to overload training in endurance sports. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 64:335–344
- Fullagar HH, Bartlett JD (2016) Time to wake up: individualising the approach to sleep promotion interventions. *Br J Sport Med* 50:143–144
- Fullagar HHK, Skorski S, Duffield R, Hammes D, Coutts AJ, Meyer T (2015) Sleep and Athletic Performance: The Effects of Sleep Loss on Exercise Performance, and Physiological and Cognitive Responses to Exercise. *Sport Med* 45:161–186
- Fullagar HHK, Skorski S, Duffield R, Julian R, Bartlett J, Meyer T (2016) Impaired sleep and recovery after night matches in elite football players. *J Sports Sci* 34:1333–1339
- Fuller KL, Juliff L, Gore CJ, Peiffer JJ, Halson SL (2017) Software thresholds alter the bias of actigraphy for monitoring sleep in team-sport athletes. *J Sci Med Sport* 20:756–760
- Gander PH, Connell LJ, Graeber RC (1986) Masking of the circadian rhythms of heart rate and core temperature by the rest-activity cycle in man. *J Biol Rhythms* 1:119–135
- George CFP, Kab V, Kab P, Villa JJ, Levy AM (2003) Sleep and breathing in professional football players. *Sleep Med* 4:317–325
- Giannoccaro MP, Moghadam KK, Pizza F, Boriani S, Maraldi NM, Avoni P, Morreale A, Liguori R, Plazzi G (2013) Sleep disorders in patients with spinal cord injury. *Sleep Med Rev* 17:399–409
- Gillette MU, Abbott SM (2009) Biological Timekeeping. *Sleep Med Clin* 4:99–110

- Giuditta A, Ambrosini MV, Montagnese P, Mandile P, Cotugno M, Zucconi GG, Vescia S (1995) The sequential hypothesis of the function of sleep. *Behav Brain Res* 69:157–166
- Goldspink DF, Goldberg AL (1975) Influence of pituitary growth hormone on DNA synthesis in rat tissues. *Am J Physiol Content* 228:302–309
- Gosselin N, Lassonde M, Petit D, Leclerc S, Mongrain V, Collie A, Montplaisir J (2009) Sleep following sport-related concussions. *Sleep Med* 10:35–46
- Goumas C (2014) Home advantage in Australian soccer. *J Sci Med Sport* 17:119–123
- Gruwez A, Bruyneel AV, Bruyneel M (2019) The validity of two commercially-available sleep trackers and actigraphy for assessment of sleep parameters in obstructive sleep apnea patients. *PLoS One* 14:e0210569
- Gulliver A, Griffiths KM, Mackinnon A, Batterham PJ, Stanimirovic R (2015) The mental health of Australian elite athletes. *J Sci Med Sport* 18:255–261
- Gupta L, Morgan K, Gilchrist S (2017) Does Elite Sport Degrade Sleep Quality? A Systematic Review. *Sport Med* 47:1317–1333
- Haack M, Sanchez E, Mullington JM (2007) Elevated inflammatory markers in response to prolonged sleep restriction are associated with increased pain experience in healthy volunteers. *Sleep* 30:1145–1152
- Hamada K, Doi T, Sakurai M, Matsumoto K, Yanagisawa K, Suzuki T, Kikuchi N, Okuda J, Miyazaki H, Okoshi H, Zeniya M, Asukata I (2002) Effects of hydration on fluid balance and lower-extremity blood viscosity during long airplane flights. *JAMA* 287:844–845
- Hardie DG (2007) AMP-activated/SNF1 protein kinases: conserved guardians of cellular energy. *Nat Rev Mol Cell Biol* 8:774–785
- Harris JJ, Jolivet R, Attwell D (2012) Synaptic energy use and supply. *Neuron* 75:762–777
- Hastings MH, Reddy AB, Maywood ES (2003) A clockwork web: circadian timing in brain and periphery, in health and disease. *Nat Rev Neurosci* 4:649–661
- Hattar S, Lucas RJ, Mrosovsky N, Thompson S, Douglas RH, Hankins MW, Lem J, Biel M, Hofmann F, Foster RG (2003) Melanopsin and rod–cone photoreceptive systems account for all major accessory visual functions in mice. *Nature* 424:75–81
- 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. *Med Sci Sports Exerc* 46:1036–1045
- Hawley JA, Noakes TD (1992) Peak power output predicts maximal oxygen uptake and

- performance time in trained cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 65:79–83
- Herxheimer A, Petrie KJ (2002) Melatonin for the prevention and treatment of jet lag. *Cochrane Database Syst Rev* CD001520
- Hill DW, Hill CM, Fields KL, Smith JC (1993) Effects of Jet Lag on Factors Related to Sport Performance. *Can J Appl Physiol* 18:91–103
- Hirshkowitz M, Whiton K, Albert SM, Alessi C, Bruni O, DonCarlos L, Hazen N, Herman J, Katz ES, Kheirandish-Gozal L, Neubauer DN, O'Donnell AE, Ohayon M, Peever J, Rawding R, Sachdeva RC, Setters B, Vitiello M V, Ware JC, Adams Hillard PJ (2015) National Sleep Foundation's sleep time duration recommendations: methodology and results summary. *Sleep* 38:4–18
- Hofstra WA, de Weerd AW (2008) How to assess circadian rhythm in humans: A review of literature. *Epilepsy Behav* 13:438–444
- Hopkins WG (2000) Measures of reliability in sports medicine and science. *Sport Med* 30:1–15
- Hopkins WG (2007) A spreadsheet for deriving a confidence interval, mechanistic inference and clinical inference from a P value. *Sportsmedicine* 11:16–21
- Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J (2009) Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc* 41:3–12
- Horne JA, Östberg O (1976) Individual differences in human circadian rhythms. *Biol Psychol* 5:179–190
- Hoshikawa M, Uchida S, Sugo T, Kumai Y, Hanai Y, Kawahara T (2010) Sleep quality in athletes under normobaric hypoxia equivalent to 1500 m altitude: A polysomnographic study. *Eur J Sport Sci* 10:191–198
- Inbar O, Bar-Or O, Skinner JS (1996) The Wingate Anaerobic Test, Champaign
- Jamieson AO, Zammit GK, Rosenberg RS, Davis JR, Walsh JK (2001) Zolpidem reduces the sleep disturbance of jet lag. *Sleep Med* 2:423–430
- Janse van Rensburg DCC, Jansen van Rensburg A, Fowler P, Fullagar H, Stevens D, Halson S, Bender A, Vincent G, Claassen-Smithers A, Dunican I, Roach GD, Sargent C, Lastella M, Cronje T (2020) How to manage travel fatigue and jet lag in athletes? A systematic review of interventions. *Br J Sports Med* 54:960–968
- Jennische E, Andersson GL (1991) Expression of GH receptor mRNA in regenerating skeletal muscle of normal and hypophysectomized rats. An in situ hybridization study. *Eur J*

Endocrinol 125:595–602

- Johns MW (1991) A New Method for Measuring Daytime Sleepiness: The Epworth Sleepiness Scale. *Sleep* 14:540–545
- Johns MW (2009) What is excessive daytime sleepiness ? In: Pedr Fulke and Sior Vaughan (ed) *Sleep deprivation: causes, effects and treatment*, Ed: First. Publisher: chapter two ; Nova Science Melbourne, Australia, pp 59–94
- Jones MJ, Peeling P, Dawson B, Halson S, Miller J, Dunican I, Clarke M, Goodman C, Eastwood P (2018) Evening electronic device use: The effects on alertness, sleep and next-day physical performance in athletes. *J Sports Sci* 36:162–170
- Juliff LE, Peiffer JJ, Halson SL (2018) Night games and sleep: Physiological, neuroendocrine, and psychometric mechanisms. *Int J Sports Physiol Perform* 13:867–873
- Junge A, Feddermann-Demont N (2016) Prevalence of depression and anxiety in top-level male and female football players. *BMJ Open Sport Exerc Med* 2:e000087
- Jungquist CR, Pender JJ, Klingman KJ, Mund J (2015) Validation of capturing sleep diary data via a wrist-worn device. *Hindawi Publ Corp Sleep Disord* 2015:1–6
- Jürimäe J, Mäestu J, Purge P, Jürimäe T (2004) Changes in stress and recovery after heavy training in rowers. *J Sci Med Sport* 7:335–339
- Jürimäe J, Mäestu J, Purge P, Jürimäe T, Sööt T (2002) Relations among heavy training stress, mood state, and performance for male junior rowers. *Percept Mot Skills* 95:520–526
- Kalmbach DA, Anderson JR, Drake CL (2018) The impact of stress on sleep: pathogenic sleep reactivity as a vulnerability to insomnia and circadian disorders. *J Sleep Res* 27:e12710
- Kellmann M (2010) Preventing overtraining in athletes in high-intensity sports and stress/recovery monitoring. *Scand J Med Sci Sports* 20:95–102
- Kerkhof GA, Van Dongen HPA (1996) Morning-type and evening-type individuals differ in the phase position of their endogenous circadian oscillator. *Neurosci Lett* 218:153–156
- Khalsa SBS, Jewett ME, Cajochen C, Czeisler CA (2003) A phase response curve to single bright light pulses in human subjects. *J Physiol* 549:945–952
- Killer SC, Svendsen IS, Jenkendorf AE, Gleeson M (2015) 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* 25:1–9
- Killer SC, Svendsen IS, Jeukendorf AE, 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 Sport Sci* 35:1402–1410
- Knufinke M, Nieuwenhuys A, Geurts SAE, Møst EIS, Maase K, Moen MH, Coenen AML, Kompier MAJ (2018) Train hard, sleep well? Perceived training load, sleep quantity and sleep stage distribution in elite level athletes. *J Sci Med Sport* 21:410–415
- Kolla BP, Mansukhani S, Mansukhani MP (2016) Consumer sleep tracking devices: a review of mechanisms, validity and utility. *Expert Rev Med Devices* 13:497–506
- Kölling S, Duffield R, Erlacher D, Venter R, Halson SL (2019) Sleep-related Issues for Recovery and Performance in Athletes. *Int J Sport Physiol Perform* 14:144–148
- Kölling S, Treff G, Winkert K, Ferrauti A, Meyer T, Pfeiffer M, Kellmann M (2017) The effect of westward travel across five time zones on sleep and subjective jet-lag ratings in athletes before and during the 2015's World Rowing Junior Championships. *J Sports Sci* 35:2240–2248
- Kong J, Shepel PN, Holden CP, Mackiewicz M, Pack AI, Geiger JD (2002) Brain glycogen decreases with increased periods of wakefulness: implications for homeostatic drive to sleep. *J Neurosci* 22:5581–5587
- Kostyo JL (1968) Rapid effects of growth hormone on amino acid transport and protein synthesis. *Ann N Y Acad Sci* 148:389–407
- Kraemer WJ, Hooper DR, Kupchak BR, Saenz C, Brown LE, Vingren JL, Luk HY, DuPont WH, Szivak TK, Flanagan SD, Caldwell LK, Eklund D, Lee EC, Hakkinen K, Volek JS, Fleck SJ, Maresh CM (2016) The effects of a roundtrip trans-American jet travel on physiological stress, neuromuscular performance, and recovery. *J Appl Physiol* 121:438–448
- Kräuchi K, Cajochen C, Wirz-Justice A (1997) A relationship between heat loss and sleepiness: effects of postural change and melatonin administration. *J Appl Physiol* 83:134–139
- Krueger JM, Obál F, Fang J, Kubota T, Taishi P (2001) The role of cytokines in physiological sleep regulation. *Ann N Y Acad Sci* 933:211–221
- Kushida CA, Chang A, Gadkary C, Guilleminault C, Carrillo O, Dement WC (2001) Comparison of actigraphic, polysomnographic, and subjective assessment of sleep parameters in sleep-disordered patients. *Sleep Med* 2:389–396
- Lagarde D, Chappuis B, Billaud PF, Ramont L, Chauffard F, French J (2001) Evaluation of pharmacological aids on physical performance after a transmeridian flight. *Med Sci Sports Exerc* 33:628–634
- Lalor BJ, Halson SL, Tran J, Kemp JG, Cormack SJ (2018) No compromise of competition sleep

- compared with habitual sleep in elite Australian footballers. *Int J Sports Physiol Perform* 13:29–36
- Lane JM, Qian J, Mignot E, Redline S, Scheer FAJL, Saxena R (2022) Genetics of circadian rhythms and sleep in human health and disease. *Nat Rev Genet* Aug 26
- Lastella M, Roach GD, Halson SL, Martin DT, West NP, Sargent C (2015a) Sleep/wake behaviour of endurance cyclists before and during competition. *J Sports Sci* 33:293–299
- Lastella M, Roach GD, Halson SL, Martin DT, West NP, Sargent C (2015b) The impact of a simulated grand tour on sleep, mood, and well-being of competitive cyclists. *J Sports Med Phys Fitness* 55:1555–1564
- Lastella M, Roach GD, Halson S, Sargent C (2015c) Sleep/wake behaviours of elite athletes from individual and team sports. *Eur J Sport Sci* 15:94–100
- Lastella M, Roach GD, Halson SL, Sargent C (2016) The Chronotype of Elite Athletes. *J Hum Kinet* 54:219–225
- Leatherwood WE, Drago JL (2013) Effect of airline travel on performance: A review of the literature. *Br J Sports Med* 47:561–567
- Lee JM, Byun W, Keill A, Dinkel D, Seo Y (2018) Comparison of Wearable Trackers' Ability to Estimate Sleep. *Int J Env Res Public Heal* 15:1265
- Lee XK, Chee NIYN, Ong JL, Teo TB, Van Rijn E, Lo JC, Chee MWL (2019) Validation of a consumer sleep wearable device with actigraphy and polysomnography in adolescents across sleep opportunity manipulations. *J Clin Sleep Med* 15:1337–1346
- Lee A, Galvez JC (2012) Jet Lag in Athletes. *Sports Health* 4:211–216
- Lemmer B, Kern R, Nold G, Lohrer H (2002) Jet lag in athletes after eastward and westward time-zone transition. *Chronobiol Int* 19:743–764
- Lewis P, Oster H, Korf HW, Foster RG, Erren TC (2020) Food as a circadian time cue — evidence from human studies. *Nat Rev Endocrinol* 16:213–223
- Lillo-Bevia J, Pallarés JG (2018) Validity and reliability of the cycleops hammer cycle ergometer. *Int J Physiol Perform* 13:853–859
- Luboshitzky R, Herer P, Levi M, Shen-Orr Z, Lavie P (1999) Relationship between rapid eye movement sleep and testosterone secretion in normal men. *J Androl* 20:731–737
- Lucidi F, Lombardo C, Russo PM, Devoto A, Violani C (2007) Sleep complaints in Italian Olympic and recreational athletes. *J Clin Sport Psychol* 1:121–129
- Luke A, Lazaro RM, Bergeron MF, Keyser L, Benjamin H, Brenner J, d'Hemecourt P, Grady M,

- Philpott J, Smith A (2011) Sports-related injuries in youth athletes: is overscheduling a risk factor? *Clin J Sport Med* 21:307–314
- Lund HG, Reider BD, Whiting AB, Prichard JR (2010) Sleep patterns and predictors of disturbed sleep in a large population of college students. *J Adolesc Heal* 46:124–132
- Macfarlane DJ, Wong P (2012) Validity, reliability and stability of the portable Cortex Metamax 3B gas analysis system. *Eur J Appl Physiol* 112:2539–2547
- Mahoney MJ, Gabriel TJ, Perkins TS (1987) Psychological skills and exceptional athletic performance. *Sport Psychol* 1:181–199
- Manfredini R, Manfredini F, Conconi F (2000) Standard melatonin intake and circadian rhythms of elite athletes after a transmeridian flight. *J Int Med Res* 28:182–186
- Maquet P (2001) The role of sleep in learning and memory. *Science* 294:1048–1052
- Marino M, Li Y, Rueschman MN, Winkelman JW, Ellenbogen JM, Solet JM, Dulin H, Berkman LF, Buxton OM (2013) Measuring sleep: Accuracy, sensitivity, and specificity of wrist actigraphy compared to polysomnography. *Sleep* 36:1747–1755
- Matthews R, Ferguson S, Zhou X, Darwent D, Sargent C, Kennaway D, Roach G (2010) The interactive influence of the internal body clock and prior wake on task vigilance. *Ergonomia* 32:37–48
- Meeusen R, Duclos M, Foster C, Fry A, Gleeson M, Nieman D, Raglin J, Rietjens G, Steinacker J, Urhausen A (2013) Prevention, diagnosis and treatment of the overtraining syndrome: Joint consensus statement of the European College of Sport Science (ECSS) and the American College of Sports Medicine (ACSM). *Eur J Sport Sci* 13:1–24
- Meier-Ewert HK, Ridker PM, Rifai N, Regan MM, Price NJ, Dinges DF, Mullington JM (2004) Effect of sleep loss on C-reactive protein, an inflammatory marker of cardiovascular risk. *J Am Coll Cardiol* 43:678–683
- Milewski MD, Skaggs DL, Bishop GA, Pace JL, Ibrahim DA, Wren TA, Barzdukas A (2014) Chronic lack of sleep is associated with increased sports injuries in adolescent athletes. *J Pediatr Orthop* 34:129–133
- Mitchell PJ, Hoese EK, Liu L, Fogg LF, Eastman CI (1997) Conflicting bright light exposure during night shifts impedes circadian adaptation. *J Biol Rhythms* 12:5–15
- Mohawk JA, Green CB, Takahashi JS (2012) Central and Peripheral clocks. *Annu Rev Neurosci* 35:445–462
- Moline ML, Pollak CP, Monk TH, Lester LS, Wagner DR, Zendell SM, Graeber RC, Salter CA,

- Hirsch E (1992) Age-related differences in recovery from simulated jet lag. *Sleep* 15:28–40
- Montaruli A, Roveda E, Calogiuri G, Torre ALA, Carandente F (2009) The sportsman readjustment after transcontinental flight: A study on marathon runners. *J Sports Med Phys Fitness* 49:372–381
- Mougin F, Simon-Rigaud ML, Davenne D, Renaud A, Garnier A, Kantelip JP, Magnin P (1991) Effects of sleep disturbances on subsequent physical performance. *Eur J Appl Physiol* 63:77–82
- Mullaney DJ, Kripke DF, Messin S (1980) Wrist-actigraphic estimation of sleep time. *Sleep* 3:83–92
- Muzet A, Werner S, Fuchs G, Roth T, Saoud JB, Viola AU, Schaffhauser JY, Luthringer R (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 Med* 21:47–56
- Nedelec M, Aloulou A, Duforez F, Meyer T, Dupont G (2018) The Variability of Sleep Among Elite Athletes. *Sport Med.e - open* 4:1–13
- Nedelec M, Halson S, Abaidia AE, Ahmaidi S, Dupont G (2015) Stress, Sleep and Recovery in Elite Soccer: A Critical Review of the Literature. *Sport Med* 45:1387–1400
- Nimmerichter A, Williams C, Bachi N, Eston R (2010) Evaluation of a Field Test to Assess Performance in Elite Cyclists. *Int J Sport Med* 31:160–166
- O'Connor PJ, Morgan WP, Koltyn KF, Raglin JS, Turner JG, Kalin NH (1991) Air travel across four time zones in college swimmers. *J Appl Physiol* 70:756–763
- Ohayon MM, Sagales T (2010) Prevalence of insomnia and sleep characteristics in the general population of Spain. *Sleep Med* 11:1010–1018
- Paquet J, Kawinska A, Carrier J (2007) Wake Detection Capacity of Actigraphy During Sleep. *Sleep* 30:1362–1369
- Paul MA, Gray GW, Lieberman HR, Love RJ, Miller JC, Trouborst M, Arendt J (2011) Phase advance with separate and combined melatonin and light treatment. *Psychopharmacology (Berl)* 214:515–523
- Pesonen AK, Kuula L (2018) The Validity of a New Consumer-Targeted Wrist Device in Sleep Measurement: An Overnight Comparison Against Polysomnography in Children and Adolescents. *J Clin Sleep Med* 14:585–591

- Petit E, Mougin F, Bourdin H, Tio G, Haffen E (2014) Impact of 5-h phase advance on sleep architecture and physical performance in athletes. *Appl Physiol Nutr Metab* 39:1230–1236
- Plihal W, Born J (1997) Effects of early and late nocturnal sleep on declarative and procedural memory. *J Cogn Neurosci* 9:534–547
- Prather AA, Janicki-Deverts D, Hall MH, Cohen S (2015) Behaviorally Assessed Sleep and Susceptibility to the Common Cold. *Sleep* 38:1353–1359
- Pullman RE, Roepke SE, Duffy JF (2012) Laboratory validation of an in-home method for assessing circadian phase using dim light melatonin onset (DLMO). *Sleep Med* 13:703–706
- Quante M, Kaplan ER, Cailler M, Rueschman M, Wang R, Weng J, Taveras EM, Redline S (2018) Actigraphy-based sleep estimation in adolescents and adults: a comparison with polysomnography using two scoring algorithms. *Nat Sci Sleep* 18:13–20
- Ramsawh HJ, Stein MB, Belik SL, Jacobi F, Sareen J (2009) Relationship of anxiety disorders, sleep quality, and functional impairment in a community sample. *J Psychiatr Res* 43:926–933
- Rauchs G, Bertran F, Guillery-Girard B, Desgranges B, Kerrouche N, Denise P, Foret J, Eustache F (2004) Consolidation of strictly episodic memories mainly requires rapid eye movement sleep. *Sleep* 27:395–401
- Reid KJ (2019) Assessment of Circadian Rhythms. *Neurol Clin* 37:505–526
- Reid KJ, McGee-Koch LL, Zee PC (2011) Cognition in circadian rhythm sleep disorders. *Prog Brain Res* 190:3–20
- Reilly T, Atkinson G, Budgett R (2001) Effect of low-dose temazepam on physiological variables and performance tests following a westerly flight across five time zones. *Int J Sports Med* 22:166–174
- Reilly T, Atkinson G, Edwards B, Waterhouse J, Åkerstedt T, Davenne D, Lemmer B, Wirz-Justice A (2007) Coping with jet-lag: A Position Statement for the European College of Sport Science. *Eur J Sport Sci* 7:1–7
- Reilly T, Down A (1992) Investigation of circadian rhythms in anaerobic power and capacity of the legs. *J Sports Med Phys Fitness* 32:343–347
- Rensburg DCJ Van, Jansen A, Peter VR, Amy MF, Stevens D, Sullivan KO, Fullagar HHK, Manuel J, Michelle A (2021) Managing Travel Fatigue and Jet Lag in Athletes : A Review

- and Consensus Statement. *Sport Med* 51:15–19
- Reppert SM, Weaver DR (2002) Coordination of circadian timing in mammals. *Nature* 418:935–941
- Revell VL, Arendt J, Terman M, Skene DJ (2005) Short-wavelength sensitivity of the human circadian system to phase-advancing light. *J Biol Rhythms* 20:270–272
- Revell VL, Burgess HJ, Gazda CJ, Smith MR, Fogg LF, Eastman CI (2006) Advancing Human Circadian Rhythms with Afternoon Melatonin and Morning Intermittent Bright Light. *J Clin Endocrinol Metab* 91:54–59
- Richmond LK, Dawson B, Stewart G, Cormack S, Hillman DR, Eastwood PR (2004) The effect of interstate travel on sleep patterns of elite Australian Rules footballers. *J Sci Med Sport* 7:186–196
- Richmond LK, Dawson B, Stewart G, Cormack S, Hillman DR, Eastwood PR (2007) The effect of interstate travel on the sleep patterns and performance of elite Australian Rules footballers. *J Sci Med Sport* 10:252–258
- Riemann D, Baglioni C, Bassetti C, Bjorvatn B, Dolenc Groselj L, Ellis JG, Espie CA, Garcia-Borreguero D, Gjerstad M, Gonçalves M (2017) European guideline for the diagnosis and treatment of insomnia. *J Sleep Res* 26:675–700
- Riemann D, Spiegelhalder K, Feige B, Voderholzer U, Berger M, Perlis M, Nissen C (2010) The hyperarousal model of insomnia: A review of the concept and its evidence. *Sleep Med Rev* 14:19–31
- Roach GD, Dawson D, Lamond N (2006) Can a Shorter Psychomotor Vigilance Task Be Used as a Reasonable Substitute for the Ten-Minute Psychomotor Vigilance Task? *Chronobiol Int* 23:1379–1387
- Roach GD, Sargent C (2019) Interventions to Minimize Jet Lag After Westward and Eastward Flight. *Front Physiol* 10:1–11
- Roberts SSH, Teo WP, Warmington SA (2019) Effects of training and competition on the sleep of elite athletes: A systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 53:513–522
- Rodrigues DF, Silva A, Rosa JPP, Ruiz FS, Veríssimo AW, Winckler C, Da Rocha EA, Parsons A, Tufik S, De Mello MT (2015) Sleep quality and psychobiological aspects of Brazilian Paralympic athletes in the London 2012 pre-Paralympics period. *Motriz Rev Educ Fis* 21:168–176

- Romyn G, Lastella M, Miller DJ, Versey NG, Roach GD, Sargent C (2018) Daytime naps can be used to supplement night-time sleep in athletes. *Chronobiol Int* 35:865–868
- Romyn G, Robey E, Dimmock JA, Halson SL, Peeling P (2016) Sleep, anxiety and electronic device use by athletes in the training and competition environments. *Eur J Sport Sci* 16:301–308
- Rosenthal L, Day R, Gerhardstein R, Meixner R, Roth T, Guido P, Fortier J (2001) Sleepiness/alertness among healthy evening and morning type individuals. *Sleep Med* 2:243–248
- Rossiter A, Comyns TM, Powell C, Nevill AM, Warrington GD (2021) Effect of long-haul transmeridian travel on recovery and performance in international level swimmers. *Int J Sports Sci Coach* Nov 22
- Rubio-Sastre P, Gómez-Abellán P, Martínez-Nicolas A, Ordoñas JM, Madrid JA, Garaulet M (2014) Evening physical activity alters wrist temperature circadian rhythmicity. *Chronobiol Int* 31:276–282
- Sadeh A, Sharkey KM, Carskadon MA (1994) Activity-based sleep-wake identification: An empirical test of methodological issues. *Sleep* 17:201–207
- Saidi O, Doré E, Maso F, Mack-Inocentio D, Walrand S, Pereira B, Duché P (2019) Acute effect of an intensified exercise program on subsequent sleep, dietary intake, and performance in junior rugby players. *Eur J Appl Physiol* 119:2075–2082
- Saidi O, Pereira B, Peyrel P, Maso F, Doré E, Rochette E, Ratel S, Walrand S, Duché P (2022) Sleep pattern and staging in elite adolescent rugby players during the in-season competitive phase compared to an age matched non-athlete population. *Eur J Sport Sci* 22:499–510
- Samuels C (2008) Sleep, recovery, and performance: the new frontier in high-performance athletics. *Neurol Clin* 26:169–80
- Samuels C, James L, Lawson D, Meeuwisse W (2016) The Athlete Sleep Screening Questionnaire: a new tool for assessing and managing sleep in elite athletes. *Int J Sport Med* 50:418–422
- Sanford SD, Lichstein KL, Durrence HH, Riedel BW, Taylor DJ, Bush AJ (2006) The influence of age, gender, ethnicity, and insomnia on Epworth sleepiness scores: A normative US population. *Sleep Med* 7:319–326
- Sargent C, Halson S, Roach GD (2014a) Sleep or swim? Early-morning training severely

restricts the amount of sleep obtained by elite swimmers. *Eur J Sport Sci* 14:310–315

Sargent C, Lastella M, Halson S, Roach GD (2014b) The impact of training schedules on the sleep and fatigue of elite athletes. *Chronobiol Int* 31:1160–1168

Sargent C, Lastella M, Halson SL, Roach GD (2016) The validity of activity monitors for measuring sleep in elite athletes. *J Sci Med Sport* 19:848–853

Sargent C, Roach GD (2016) Sleep duration is reduced in elite athletes following night-time competition. *Chronobiol Int* 33:667–670

Sargent C, Schmidt WF, Aughey RJ, Bourdon PC, Soria R, Jimenez Claros JC, Garvican-Lewis LA, Buchheit M, Simpson BM, Hammond K, Kley M, Wachsmuth N, Gore CJ, Roach GD (2013) The sleep of elite athletes at sea level and high altitude: A comparison of sea-level natives and high-altitude natives (ISA3600). *Br J Sports Med* 47:1–9

Schaal K, Tafflet M, Nassif H, Thibault V, Pichard C, Alcotte M, Guillet T, El Helou N, Berthelot G, Simon S, Toussaint JF (2011) Psychological balance in high level athletes: Gender-Based differences and sport-specific patterns. *PLoS One* 4:e19007

Schaal K, Y LEM, Louis J, Filliard JR, Hellard P, Casazza G, Hausswirth C (2015) Whole-Body Cryostimulation Limits Overreaching in Elite Synchronized Swimmers. *Med Sci Sport Exerc* 47:1416–1425

Schmidt MH (2014) The energy allocation function of sleep: A unifying theory of sleep, torpor, and continuous wakefulness. *Neurosci Biobehav Rev* 47:122–153

Schmidt C, Xhrouet M, Hamacher M, Delloye E, LeGoff C, Cavalier E, Collette F, Vandewalle G (2018) Light exposure via a head-mounted device suppresses melatonin and improves vigilant attention without affecting cortisol and comfort. *Psych J* 7:163–175

Schoeller DA, Cella LK, Sinha MK, Caro JF (1997) Entrainment of the diurnal rhythm of plasma leptin to meal timing. *J Clin Invest* 100:1882–1887

Scott A, Caia J, Forbes R, Kelly V (2017) Sleep disordered breathing and cephalometric predictors in an Australian rugby league team. *Eur Respir J* 50:PA2345

Shanahan TL, Kronauer RE, Duffy JF, Williams GH, Czeisler CA (1999) Melatonin rhythm observed throughout a three-cycle bright-light stimulus designed to reset the human circadian pacemaker. *J Biol Rhythms* 14:237–253

Shearer WT, Reuben JM, Mullington JM, Price NJ, Lee B-N, Smith E, Szuba MP, Van Dongen HPA, Dinges DF (2001) Soluble TNF- α receptor 1 and IL-6 plasma levels in humans subjected to the sleep deprivation model of spaceflight. *J Allergy Clin Immunol*

107:165–170

- Shiota M, Sudou M, Ohshima M (1996) Using outdoor exercise to decrease jet lag in airline crewmembers. *Aviat Space Environ Med* 67:1155–1160
- Silva MG, Paiva T, Silva HH (2019) The elite athlete as a special risk traveller and the jet lag's effect: lessons learned from the past and how to be prepared for the next Olympic Games 2020 Tokyo? *J Sports Med Phys Fitness* 59:1420–1429
- Slama H, Deliens G, Schmitz R, Peigneux P, Leproult R (2015) Afternoon nap and bright light exposure improve cognitive flexibility post lunch. *PLoS One* 10:e0125359
- Smith DR, Ciacciarelli A, Seran J, Lambert Rutgers D (2000) Travel and the Home Advantage in Professional Sports. *Sociol Sport J* 17:364–385
- Souissi N, Chtourou H, Aloui A, Hammouda O, Dogui M, Chaouachi A, Chamari K (2013) Effects of time-of-day and partial sleep deprivation on short-term maximal performances of judo competitors. *J Strength Cond Res* 27:2473–2480
- Spiegel K, Luthringer R, Follenius M, Schaltenbrand N, Macher JP, Muzet A, Brandenberger G (1995) Temporal relationship between prolactin secretion and slow-wave electroencephalic activity during sleep. *Sleep* 18:543–548
- Spragg J, Leo P, Swart J (2022) The Relationship between Physiological Characteristics and Durability in Male Professional Cyclists. *Med Sci Sports Exerc.* <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003024>
- Stender J, Mortensen KN, Thibaut A, Darkner S, Laureys S, Gjedde A, Kupers R (2016) The minimal energetic requirement of sustained awareness after brain injury. *Curr Biol* 26:1494–1499
- Suppiah HT, Low CY, Chia M (2015) Effects of sports training on sleep characteristics of Asian adolescent athletes. *Biol Rhythm Res* 46:523–536
- Suppiah HT, Low CY, Chia M (2016) Effects of sport-specific training intensity on sleep patterns and psychomotor performance in adolescent athletes. *Pediatr Exerc Sci* 28:588–595
- 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* 16:850–858
- Tan FHY, Aziz AR (2005) Reproducibility of outdoor flat and uphill cycling time trials and their performance correlates with peak power output in moderately trained cyclists. *J Sports Sci Med* 4:278–284

- Taylor S, Rogers G, Driver H (1997) Effects of training volume on sleep psychological, and selected physiological profiles of elite female swimmers. *Med Sci Sport Exerc* 29:688–693
- Temesi J, Arnal PJ, Davranche K, Bonnefoy R, Levy P, Verges S, Millet GY (2013) Does central fatigue explain reduced cycling after complete sleep deprivation? *Med Sci Sports Exerc* 45:2243–2253
- Thomas JM, Kern PA, Bush HM, McQuerry KJ, Black WS, Clasey JL, Pendergast JS (2020) Circadian rhythm phase shifts caused by timed exercise vary with chronotype. *JCI insight* 5:e134270
- Thompson A, Batterham AM, Jones H, Gregson W, Scott D, Atkinson G (2013) The practicality and effectiveness of supplementary bright light for reducing jet-lag in elite female athletes. *Int J Sports Med* 34:582–589
- Thornton HR, Delaney JA, Duthie GM, Dascombe BJ (2018) Effects of preseason training on the sleep characteristics of professional rugby league players. *Int J Sports Physiol Perform* 13:176–182
- Tonetti L, Mingozzi R, Natale V (2016) Comparison between paper and electronic sleep diary. *Biol Rhythm Res* 47:743–753
- Travers GJS, Nichols DS, Farooq A, Racinais S, Périard JD (2016) Validation of an ingestible temperature data logging and telemetry system during exercise in the heat. *Temperature* 3:208–219
- Tsunoda K, Hotta K, Mutsuzaki H, Tachibana K, Shimizu Y (2015) Sleep status in male wheelchair basketball players on a Japanese national team. *J Sleep Disord Ther* 4:1–4
- Tuomilehto H, Vuorinen VP, Penttila E, Kivimaki M, Vuorenmaa M, Venojarvi M, Airaksinen O, Pihlajamaki J (2017) Sleep of professional athletes: Underexploited potential to improve health and performance. *J Sport Sci* 35:704–710
- Valdez P (2019) Homeostatic and circadian regulation of cognitive performance. *Biol Rhythm Res* 50:85–93
- Van Cauter E, Blackman JD, Roland D, Spire JP, Refetoff S, Polonsky KS (1991) Modulation of glucose regulation and insulin secretion by circadian rhythmicity and sleep. *J Clin Invest* 88:934–942
- Van Cauter E, Plat L (1996) Physiology of growth hormone secretion during sleep. *J Pediatr* 128:S32–S37

- Van Dongen HPA, Dinges DF (2000) Circadian rhythms in fatigue, alertness, and performance. *Princ Pract Sleep Med* 20:391–399
- Van Dongen HPA, Maislin G, Mullington JM, Dinges DF (2003) The Cumulative Cost of Additional Wakefulness: Dose-Response Effects on Neurobehavioral Functions and Sleep Physiology From Chronic Sleep Restriction and Total Sleep Deprivation. *Sleep* 26:117–126
- Van Ryswyk E, Weeks R, Bandick L, O’Keefe M, Vakulin A, Catcheside P, Barger L, Potter A, Poulos N, Wallace J, Antic NA (2017) A novel sleep optimisation programme to improve athletes’ well-being and performance. *Eur J Sport Sci* 17:144–151
- Varga AW, Kang M, Ramesh P V, Klann E (2014) Effects of acute sleep deprivation on motor and reversal learning in mice. *Neurobiol Learn Mem* 114:217–222
- Vgontzas AN, Zoumakis E, Bixler EO, Lin H-M, Follett H, Kales A, Chrousos GP (2004) Adverse effects of modest sleep restriction on sleepiness, performance, and inflammatory cytokines. *J Clin Endocrinol Metab* 89:2119–2126
- Vlahoyiannis A, Sakkas GK, Manconi M, Aphasimis G, Giannaki CD (2020) A critical review on sleep assessment methodologies in athletic populations: factors to be considered. *Sleep Med* 74:211–223
- Vogler AJ, Rice AJ, Gore CJ (2010) Validity and reliability of the Cortex MetaMax3B portable metabolic system. *J Sports Sci* 28:733–742
- Wagner U, Gais S, Born J (2001) Emotional memory formation is enhanced across sleep intervals with high amounts of rapid eye movement sleep. *Learn Mem* 8:112–119
- Wagner U, Hallschmid M, Rasch B, Born J (2006) Brief sleep after learning keeps emotional memories alive for years. *Biol Psychiatry* 60:788–790
- Walsh NP, Halson SL, Sargent C, Roach GD, Nédélec M, Gupta L, Leeder J, Fullagar HH, Coutts AJ, Edwards BJ, Pullinger SA, Robertson CM, Burniston JG, Lastella M, Le Meur Y, Hauswirth C, Bender AM, Grandner MA, Samuels CH (2020) Sleep and the athlete: Narrative review and 2021 expert consensus recommendations. *Br J Sports Med* 3:1–13
- Wasserman K (1999) Principles of exercise testing & interpretation: including pathophysiology and clinical applications. In: *Principles of exercise testing & interpretation*, 3rd ed. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, pp 531–540
- Waterhouse J, Edwards B, Nevill A, Atkinson G, Reilly T, Davies P, Godfrey R (2000a) Do subjective symptoms predict our perception of jet-lag? *Ergonomics* 43:1514–1527

- Waterhouse J, Edwards B, Nevill A, Carvalho S, Atkinson G, Buckley P, Reilly T, Godfrey R, Ramsay R (2002) Identifying some determinants of “jet lag” and its symptoms: a study of athletes and other travellers. *Br J Sports Med* 36:54–60
- Waterhouse J, Reilly T, Atkinson G, Edwards B (2007) Jet lag: trends and coping strategies. *Lancet* 369:1117–1129
- Waterhouse J, Reilly T, Edwards B (2004) The stress of travel. *J Sports Sci* 22:946–966
- Waterhouse J, Weinert D, Minors D, Folkard S, Owens D, Atkinson G, Macdonald I, Sytnik N, Tucker P, Reilly T (2000b) A comparison of some different methods for purifying core temperature data from humans. *Chronobiol Int* 17:539–566
- Wehr TA (1992) A brain-warming function for REM sleep. *Neurosci Biobehav Rev* 16:379–397
- Wehrens SMT, Christou S, Isherwood C, Middleton B, Gibbs MA, Archer SN, Skene DJ, Johnston JD (2017) Meal Timing Regulates the Human Circadian System. *Curr Biol* 27:1768-1775.e3
- Wever RA, Polásek J, Wildgruber CM (1983) Bright light affects human circadian rhythms. *Pflugers Arch* 396:85–87
- Whitworth-Turner C, Di Michele R, Muir I, Gregson W, Drust B (2017) A shower before bedtime may improve the sleep onset latency of youth soccer players. *Eur J Sport Sci* 17:1119–1128
- Wong WS, Fielding R (2011) Prevalence of insomnia among Chinese adults in Hong Kong: a population-based study. *J Sleep Res* 20:117–126
- Wright KP, Lowry CA, LeBourgeois MK (2012) Circadian and wakefulness-sleep modulation of cognition in humans. *Front Mol Neurosci* 5:50
- Youngstedt SD, Elliott JA, Kripke DF (2019) Human circadian phase-response curves for exercise. *J Physiol* 597:2253–2268
- Youngstedt SD, Kline CE, Elliott JA, Zielinski MR, Devlin TM, Moore TA (2016) Circadian phase-shifting effects of bright light, exercise, and bright light + exercise. *J Circadian Rhythms* 14:1–8
- Youngstedt SD, Kripke DF, Elliott JA (2002) Circadian phase-delaying effects of bright light alone and combined with exercise in humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 282:R259-66
- Youngstedt SD, O’Connor PJ (1999) The influence of air travel on athletic performance. *Sport Med* 28:197–207

Zeitzer JM, Dijk DJ, Kronauer RE, Brown EN, Czeisler CA (2000) Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *J Physiol* 526:695–702

Zhou X, Ferguson SA, Matthews RW, Sargent C, Darwent D, Kennaway DJ, Roach GD (2011) Sleep, wake and phase dependent changes in neurobehavioral function under forced desynchrony. *Sleep* 34:931–941

PUBLICATION ANNEXE

Measures to counteract the effects of jet lag on athletic performance

Petit E., Nakamura Y., Garbellotto L., Maeda S., Mougin F.

Publiée dans J. Health Phys. Educ

*Publication originale en langue japonaise,
mais jointe en langue française pour une meilleure compréhension*

特集 パワースリープ: 健康と体力を高める睡眠

Elisabeth Petit¹⁾・中村 優希²⁾・Lucas Garbellotto³⁾
前田 清司⁴⁾・Fabienne Mougin⁵⁾

アスリートにおいて、パフォーマンスの維持、向上のために、休養は最も重要である。しかしながら試合前の緊張や時差など、睡眠に悪影響を与える状況は多く、その結果パフォーマンスの低下につながる。適切なコンディショニングのために睡眠は重要であるが、これまで、断眠や睡眠時間の短縮によるパフォーマンスへの影響は数多く報告されているものの、時間生物学的観点からのアプローチはおぼろげにしがちである。

本稿では、時間生物学とパフォーマンスの関係、時差によるパフォーマンスへの影響、ならびに時差によるパフォーマンスの低下を予防する方策について述べる。

1. 時間生物学とパフォーマンス

さまざまな身体機能には概日変動があり、競技パフォーマンスも同様に概日変動を有している。これらの概日変動は、体温のサーカディアンリズムに依存していると報告されており¹⁾、先行研究では、柔軟性、骨格筋トルク、筋力、短時間高強度パワー出力などの体力的要素において、午前よりも午後においてパフォーマンスが高く^{1,2)}、またパフォーマンスのピークは体温が最も高値を示す

夕方付近であると報告されている³⁾。さらに、体力的要素だけでなく、サッカーなどの競技特有の技術においても概日変動があることが示されている⁴⁾。アスリートにとって体力的要素や競技の専門的スキルはもちろん、注意や集中力、瞬時の判断といった認知機能も必要不可欠である。自転車競技選手を対象とし、Go/No-go課題やFlexibility課題といった複雑な認知機能においても同様に概日変動がみられることが報告されている⁵⁾。

さらに近年、アスリートにおいて朝型、中間型、夜型といった概日リズムの表現型の違いによって、パフォーマンスの概日変動が異なることが報告された⁶⁾。この研究では1日のうちでパフォーマンスが26%変動することが示されており、どの時間帯に試合があるかということは、競技成績にも大きく影響する可能性がある。

これらのことから、アスリート自身の個別の概日リズムの表現型や概日変動、さらに試合時間等を考慮し、トレーニングプログラムを組み合わせることが望ましいと考えられる。

2. 時差によるパフォーマンスへの影響

アスリートやアスリートを指導するコーチにお

筆者：1) Elisabeth Petit (University of Bourgogne Franche-Comté)
2) なかむら ゆうき (筑波大学人間総合科学研究科スポーツ医学専攻)
3) Lucas Garbellotto (University of Bourgogne Franche-Comté)
4) まえだ せいじ (筑波大学体育系教授)
5) Fabienne Mougin (University of Bourgogne Franche-Comté)

Title: Strategies to counteract the effects of jet lag on athletic performance

Elisabeth Petit^{1,2}, Yuki Nakamura³, Lucas Garbellotto^{1,2}, Seiji Maeda³, Fabienne Mougín^{1,2}.

¹: Research unit EA3920 “Prognostic Markers and Regulatory Factors of Cardiovascular Diseases”, and “Exercise Performance, Health, Innovation platform”, University of Bourgogne Franche-Comté, F-25030 Besançon, France.

²: Sports Science Faculty, 31, chemin de l’Épitaphe, University of Bourgogne Franche-Comté. F-25000 Besançon, France.

³: Division of Sports Medicine, Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1, Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574, Japan

Conflict of interest: All authors have read and approved the manuscript. No author has any conflict of interest to declare.

Abstract

Athletic performance involves a variety of physical components as well as psychomotor and cognitive skills. Nevertheless, athletes often neglect/ignore two important factors: internal chronobiological factors, *ie* management of their sleep/wake cycle, and external chronobiological factors, *ie* their ability to manage external constraints of desynchronization (for example: jet lag). In this short review, we will explain the effect of jet lag on performance, and how to prevent the decrease in performance induced by jet lag.

Introduction

Time of day and sleep deprivation are known to influence athletic performance. A growing body of research has focused on how circadian rhythms and sleep affects performance. Indeed, in high-level athletes, many factors are involved in the optimization of athletic performance among which sleep plays a major role. Sleep deprivation, caused by a pre-competitive stress or misalignment induced by jet lag leads to a decrement in mental and psychomotor performance, depending on multiple factors such as complexity, duration of the exercise and motivation of the subjects. Furthermore, in previous studies, Mougin *et al* (1989, 1991, 1996, 2001) have demonstrated that a partial sleep deprivation does not contribute to a deterioration in the performance indices during a brief exercise, such as Wingate test. It does not contribute either to respiratory and metabolic responses to that exercise but alters some physiological responses to an aerobic exercise, shown by impairment in cardiovascular, respiratory and metabolic responses. However, sleep is not enough taken into account by coaches in the preparation of athletes, who are often subjects to jet lag.

This review provides a systematic overview of this research. We searched 276 different databases for articles on these issues and inspected relevant reference lists. In all, 65 articles met our inclusion criteria. The most robust result is that athletic performance seems to be best in the evening around the time when the core body temperature typically is at its peak. The effects of desynchronization of circadian rhythms depend on the local time at which performance occurs. Sleep deprivation is negatively associated with performance whereas sleep extension seems to improve performance. This review provides an overview of consequences of a disturbed sleep on physical and cognitive performance. It presents the different strategies to prevent the deleterious effects of jet lag and includes a discussion of differences regarding types of skills involved as well as methodological issues.

[1. Chronobiology and performance]

Like several physiological parameters that are influenced by circadian rhythmic changes in human behavior and the environment (Minors and Waterhouse 1981), some components of performances, especially in cycling, also are affected by the time of day. Indeed, performance involving a variety of fitness components as well as psychomotor

and cognitive skills vary over a period of 24 hours due to the changes of body temperature (Chtourou et al. 2012). Several studies have reported that physical performances improve throughout the day, with a peak at 18:30 (Souissi et al. 2004, 2010; Atkinson et al. 2005). Carrier and Monk (2000) but also Reilly *et al*(2007) already demonstrated that flexibility, skeletal muscle torque, muscle strength, short-term high-power output, etc., vary according to the time of day and are higher in the late afternoon compared with the values measured in the morning. Thereby, most studies showed higher muscle power in the afternoon than the morning (Chtourou et al. 2012; Hammouda et al. 2012). However, this 24-hour rhythm is attenuated when sprints or cycling bouts are repeated (Racinais et al. 2005; Blonc et al. 2010) suggesting greater muscle fatigue at the time of the performance peak. However, Blonc *et al*(2010) have failed to show any time-of-day effect during vertical jump test (*i.e.*, squat jump and counter-movement jump), because of a passive warm-up effect which could blunt the diurnal rhythm of short-term maximal performance. Moreover, athletes' simple or complex reaction times which depend on the type of stimulus, arousal or state of attention, including fatigue, effect of distraction, personality type, and exercise play a major role in many sports and are determinant in a competition (Ciucurel 2012). According to Van der Heijden, diurnal fluctuations were also observed in these psychomotor performances (Van der Heijden et al. 2010). The biological clock modulates hour-to-hour waking behavior, and hence fatigue, alertness, and performance, which present a circadian rhythmicity in most neurobehavioral variables (Van Dongen and Dinges 2005). Therefore, Van der Heijden *et al*(2010) showed, in pre-adolescents, time-of day effects in neurocognitive functions such as visuo-spatial processing and working memory and found faster reaction times in sustained attention in the early afternoon compared to that measured in the early morning. Waterhouse (2010) reported that performance on "simple tasks" tends to parallel the rhythm of core body temperature and reaches its peak in the late afternoon, whereas performance on more "complex" tasks (such as flexibility or Go/No-go) peaks earlier in the day, with a more marked decrease afterwards.

However, the time-of-day effect for attention and skill measures in cycling is less documented. An awareness of the existence of circadian variation in cycling skills would have practical relevance for coaches, both in preparing athletes for races at different times of day and in optimizing training programs. In our knowledge, Reilly and Edwards (2007) have shown that the 24-hour rhythms in mental performance in football-specific skills and in soccer players also fluctuate with the time of day. That is why we verified ourselves in well-trained young cyclists whether psychomotor performances measured, for the first time, by attentional performance tests (or TAP-M) and we showed that

performance were dependent on time of day and progressed in parallel with physical performance measured by a maximal-intensity exercise (Petit et al. 2013). An improvement in reaction times in simple skills such as phasic alertness and in complex skills such as visual scanning, flexibility, and Go/No-go during the day were reported (Petit et al. 2013). These findings confirmed that cyclists' training sessions cannot be programmed throughout the day without taking into consideration the time of day effect and that coaches should take into consideration the personal circadian typology of their athletes. As demonstrated in this study, training and competitions should be placed in the late afternoon. It may be relevant for training to be programmed close to the time of day of a scheduled competition. These suggestions may differ for long duration exercises or for performances in extreme conditions (altitude, climate, jet lag).

[2. The effect of jet-lag on sleep and performance]

Although athletes and coaches believe that adequate sleep is essential for peak performance, there are many situations in which sleep is disturbed prior to an athletic event (Reilly and Edwards 2007; Reilly and Waterhouse 2009). A flight across different time zones produces disorientation, light-headedness, lack of energy, and general discomfort (Smith and Reilly 2005; Reilly and Waterhouse 2009). The feelings associated with jet lag can be accompanied by fatigue, loss of appetite, and mood disorders (Williams 2010; Leatherwood and Dragoo 2012). Other symptoms can occur, such as difficulty in sleeping and disturbances of circadian rhythm during the new time, because of changes in light exposure (Waterhouse et al. 2002; Forbes-Robertson et al. 2012). These deleterious effects are attributed to a temporary misalignment between the new local time and the "body clock". Indeed, in the syndrome of jet lag, it is difficult for the circadian system to adjust to new external synchronizers, thus causing sleep deprivation, the extent of which depends on the direction of flight (Forbes-Robertson et al. 2012). Until the whole range of biological rhythms adjusts to the new local time, thereby becoming resynchronized, athletic performance may be below par. Reilly and Edwards (2007) showed that the sleep-wake cycle might be normalized prior to adjustment of body temperature where resynchronization seems to coincide with disappearance of jet-lag symptoms. Only then, the performance curve returns to its normal circadian rhythm. Therefore, light stimuli can be used to shift the circadian pacemaker to be aligned with a new sleep-wake schedule. Deal *et al* (2009) reported beneficial effects of light exposure on subjective alertness and objective performance at required times. Indeed, ocular light

maintain circadian entrainment or accelerate the re-entrainment of this circadian system with the new sleep-wake schedule (Dean et al. 2009).

The impairments of athletic performance following transmeridian flight have been documented in field studies (Wright et al. 1983; Edwards et al. 2000; Lagarde et al. 2001; Lemmer et al. 2002; Bishop 2004; Winter et al. 2009), but studies investigating the effects of a phase shift, especially in simulated laboratory conditions, are sparse and are mainly on healthy participants (Monk et al. 1993; Boivin and James 2002; Beaumont et al. 2004; Waterhouse et al. 2005a, b; Monk et al. 2006). Consequently, no compelling evidence exists demonstrating that a rapid phase advance influences athletic performances in athletes. Only, our research team has assessed polysomnography sleep structure after a simulated phase advance in athletes. Therefore, we evaluated, in highly trained young participants, the impact of a 5-h phase advance, simulating eastward air travel across 5 time zones, on sleep architecture, and examine its effects on specific indices of very short-term physical exercise. Thereby, we found that a 5-h phase advance modified sleep architecture during the first and the second night in phase advance, but did not markedly alter physiological responses to short exercise in athletes, probably because the exercise was performed in the rising phase of core temperature (Petit et al. 2014a). Thus, a 5-h advance phase advance of the sleep/wake cycle may have contributed to the changes in sleep architecture, but did not significantly impair the physiological responses to exercise during the following day. Regarding a sport performance perspective, even if a simulated 5-h phase advance, without constraining conditions of flight, impairs quality of sleep, without inducing a real sleep deprivation, it is insufficient to produce counter performance. Given these observations, circadian processes must be considered by coaches to prepare athletes' performances.

[3. Nap as a potential countermeasure for Eastern jet lag?]

As mentioned above, the transcontinental travel results from physiologic and sleep disturbances, sleepiness and intermittent fatigue. Athletes and their coaches have identified jet lag and travel fatigue as important but challenging problems that could benefit from practical solutions (Samuels 2012). The management of this fatigue is considered a key factor in sustaining alertness and performance (Belenky et al. 2003). Therefore, to compensate sleep debt and subsequent fatigue during and after travel crossing multiple time zones, or to help athletes to manage better stressful training, napping is a behavioral measure that may be recommended to alleviate a number of

sleep-related problems, promote waking function, reduce problems with arousal and counteract the deleterious effects of jet lag. Dinges and Broughton (1989) had already described different types of diurnal siestas: appetitive napping for pleasure of sleeping, prophylactic napping when a future debt is expected and replacement napping in response to subjective fatigue. However, in this review of the timing of self-selected nap, these authors had reported that a nap taken closer to the afternoon circadian dip in alertness evidenced in extensive investigation of young students. Sleep efficiency is higher, sleep latency shorter, and the amount of slow wave sleep greater than in a nap taken during the morning or evening forbidden zone for sleep (Lavie and Zvuluni 1992). (Naitoh (1981) cautioned that naps taken at the wrong time could lead to prolonged sleep inertia. As naps are influenced by circadian rhythms, one strategy involves varying the time of day a nap takes place during sustained wakefulness. Indeed, nap taken after 6 or 18 h of wakefulness showed more beneficial effects than that taken after 30, 43 or 54 h of wakefulness. Furthermore, naps taken after fewer hours of wakefulness prevented a mean drop in body temperature (Dinges et al. 1987). According to several studies, healthy young adults should preferably nap for approximately 10–20 min to decrease fatigue, increase vigor, and improve subjective alertness, objective alertness and cognitive performance (Hayashi et al. 1999; Tietzel and Lack 2002; Brooks and Lack 2006). This short nap would be beneficial for athletes whose performance is normally required immediately upon awakening. As described by Borbely (1982), the two-process model of sleep–wake regulation predicts that longer sleep is required to restore and improve waking performance, cognition and nap time duration is linked with the sleep-dependent process *S*. Thus, homeostatic and circadian processes interact to determine the extent of restoration, *e.g.*, the quality of the prior sleep period, the duration and the timing of the nap, the presence of sleep inertia. (Milner and Cote 2009). Nevertheless, most of the studies on daytime nap effects have been conducted in shift workers, medical staff, drivers, and pilots on alertness, but very few in athletes (Waterhouse et al. 2007). Furthermore, while advice may seem reasonable, there appears to be little hard empirical evidence as to whether a nap is indeed helpful in shifted athletes. That is why, we checked if a post-prandial 20 min nap was beneficial on a short-term physical exercise parameters and subsequent sleep in athletes keeping their usual sleep schedules or after a simulated jet lag. We showed that the short post-lunch nap induced more difficulties in falling asleep in subsequent nights either at home or after crossing time zones (Petit et al. 2014b). Conversely, napping had no beneficial effect on short-term physical performance and did not facilitate readjustment of core body temperature in phase-advance condition. Furthermore, we showed improvements in speed of stimulus

evaluation time (P300 components). Napping positively impacted on cognitive processing, especially when athletes are on normal sleep schedules (Petit et al. 2018). A nap should be planned for athletes whose performance requires speedy and accurate decisions. Several types of naps could be experimented, depending on specific skills required in each sport, on training and competitions schedules, to see which one is the best to perform in each athletic specialty. Yet, one can wonder about the interest of a longer nap, *i.e.* 40 and 60 min (as sleep extension strategies) on physical performance. Indeed, this duration has been recommended to improve cognitive performances (Mulrine et al. 2012). Taking a nap at different times of the day would be also more effective (especially for athletes who have to perform twice a day, in training or competitions).

【4. Sleep extension as a strategy to enhance athletic performance? 】

While there are many studies on the effects of partial or total sleep loss on subsequent sleep architecture or athletic performance, those on sleep extension has not been as carefully examined (Mah et al. 2011). Partial sleep deprivation impairs neuropsychological functioning and sub-maximal exercise performance (Mougin et al. 1992b, a) but the effects of a sleep extension following a sleep deprivation require further investigation.

The phenomenon of « binge sleeping », or catching up on lost sleep has been observed in shift workers, students and employees. Research investigating extended nightly sleep time in adults are relatively scarce and inconsistent (Kamdar et al. 2004). In addition, sleep extension has not been found to improve self-reported mood or sleepiness, auditory vigilance or Multiple Sleep Latency Test (MSLT) scores (Harrison and Horne 1996) . Compared to baseline, performance measures were not improved following sleep extension (Belenky et al. 2003), nor was sleep extension more effective in reducing sleepiness compared to a short mid-afternoon nap or caffeine (Horne et al. 2008). Conversely, sleep extension has been observed to have a beneficial effect on energy and mood, decrease sleepiness and improve reaction time in healthy subjects (Roehrs et al. 1989; Kamdar et al. 2004; Mah et al. 2011). Short increases in sleep time through the use of naps have also shown improvements in mood, sleepiness, vigilance and sprint performance (Dinges et al. 1987; Hayashi et al. 1999; Waterhouse et al. 2007; Horne et al. 2008).

The concept of banking sleep may also be applicable to athletes before periods where poor quality or restricted sleep is anticipated. Rupp et al (2009) tried to determine whether sleep extension improves alertness and performance during subsequent sleep

restriction; and impacts the rate at which alertness and performance are restored by post-restriction recovery sleep. They showed that the extent to which sleep restriction impairs objectively measured alertness and performance, and the rate at which these impairments are subsequently reversed by recovery sleep, varies as a function of the amount of nightly sleep obtained prior to the sleep restriction period. This suggests that the physiological mechanism(s) underlying *chronic sleep debt* undergo long-term (days/weeks) accommodative/adaptive changes (Rupp et al. 2009). For athletes, accumulating sleep prior to competition may help maintain performance while under competitive duress, and enhance recovery from competition or travel.

Furthermore, fatigue countermeasures such as napping and sleep extension may improve the systemic recovery process regarding immune and inflammatory parameters (Faraut et al. 2016). While adequate sleep quality and quantity may reduce inflammatory processes and immune dysfunction from aging and inflammatory diseases, there is plausible, scientific rationale that sleep mediated countermeasures may also reduce inflammation and mitigate immune dysfunction in athletes from not only sleep debt but also the stress and trauma of training and competition.

To examine the specific relationship between sleep extension and athletic performance, a small body of research has emerged from the Sleep Disorders Clinic and Research Laboratory at Stanford University. They showed in eleven basketballers that extended sleep (110.9 minutes per night) reported improved sport specific skill performance, increased energy, improved mood and vigour, decreased fatigue and decreased and decreased daytime sleepiness at the completion of the extended sleep period (Mah et al. 2011).

A wide variety of learning processes in humans require post-training sleep (Mednick et al. 2002). It is believed that after initial training, the human brain continues to learn, and that this delayed improvement develops during both overnight sleep and short daytime naps of 60-90 minutes (Walker and Stickgold 2005). Whilst it is evident that a wide range of environmental factors are important to sport skill development, including coaching, practice quality and social influences, further research is required (Baker et al. 2003). Furthermore, athletic sleep extension research should involve comprehensive indices of sleep quality, physical health, recovery and performance with more traditional research methodology to further investigate the effect improving sleep quality on the elite athlete. In this sense, we measured the effects of a 12-hour sleep extension for six consecutive nights and on the physical performance of mountain bike elite athletes, compared to six control nights. Sleep was recorded by actimetry and dry-electrodes hear band. We found that time in bed and total sleep time were higher after sleep extension

condition, with a sleep efficiency higher compared to habitual sleep condition, but physical performances were not improved by sleep extension, probably because professional athletic population already lives in a proper sleep/wake cycle (data non published). A sleep extension strategy may be more effective for non-professional and athletic population in sleep restriction, as mentioned above.

However, a sleep extension strategy in prevention of sleep restriction, induced by an eastern jetlag in elite population, remained to be explored. It would be a simple and non-expensive method to prepare elite athletes at home, to transmeridian flight to the East, and to perform once arrived at destination, without undergoing neither a long stay in foreign country, and nor resynchronization to the new local zone.

【Conclusion】

Quality and quantity of sleep are crucial for optimal recovery and subsequent performance in athletes. However, a number of circumstances in the lives of athletes causing them either to rise very early or to delay bedtime, midnight insomnia, or time zone changes after transmeridian flight, may result in disrupted sleep schedules, increase fatigue and produce anxiety before a major competition. These changes of sleep-wake rhythm or the dephasing of circadian rhythms of various physiological variables is responsible for athletic substandard physical and cognitive performance.

It seems that athletes benefit from sleep hygiene strategies like nap and sleep extension. We showed that nap does not present any benefice to counteract the effects of an eastern jet lag, and improve anaerobic performances. However, some studies remain to be conducted to assess the effects on other athletic skills and aerobic performances. In daily athletic life, brief naps stay efficient and easy method to maintain a high level of vigilance and performance in training, especially for bi-quotidian training conditions. We also showed that sleep intervention studies in the general population might be limited in their applicability to elite athletes, assessing that sleep extension was not appropriate for elite athletes in normal sleep conditions for a gain of performance. Nevertheless, when athletes face sleep disturbances due to their lifestyle and transmeridian travels for competitions, such a strategy remains to be investigated. Thus, future sleep intervention programs in athletes should provide an eclectic approach to intervention

planning and delivery to address athletes' often unique sleep-wake behaviors and disruptions.

References

- Atkinson G, Todd C, Reilly T, Waterhouse J: Diurnal variation in cycling performance: influence of warm-up. *J Sports Sci Journal of sports sciences* 23:321–9, 2005.
- Baker J, Horton S, Robertson-Wilson J, Wall M: Nurturing sport expertise: factors influencing the development of elite athlete. *J Sports Sci Med* 2:1–9, 2003.
- Beaumont M, Batejat D, Pierard C, et al: Caffeine or melatonin effects on sleep and sleepiness after rapid eastward transmeridian travel. *J Appl Physiol* 96:50–8, 2004.
- Belenky G, Wesensten NJ, Thorne DR, et al: Patterns of performance degradation and restoration during sleep restriction and subsequent recovery: a sleep dose-response study. *J Sleep Res* 12:1–12, 2003.
- Bishop D: The effects of travel on team performance in the Australian national netball competition. *J Sci Med Sport* 7:118–22, 2004.
- Blonc S, Perrot S, Racinais S, et al: Effects of 5 weeks of training at the same time of day on the diurnal variations of maximal muscle power performance. *J Strength Cond Res* 24:23–9, 2010.
- Boivin DB, James FO: Phase-dependent effect of room light exposure in a 5-h advance of the sleep-wake cycle: implications for jet lag. *J Biol Rhythms* 17:266–76, 2002.
- Borbely AA: A two-process model of sleep regulation. *Hum Neurobiol* 1:195–204, 1982
- Brooks A, Lack L: A brief afternoon nap following nocturnal sleep restriction: which nap duration is more recuperative? *Sleep* 29:831–40, 2006
- Carrier J, Monk TH: Circadian rhythms of performance: new trends. *Chronobiol Int* 17:719–32, 2000.
- Chtourou H, Hammouda O, Souissi H, et al: Diurnal variations in physical performances related to football in young soccer players. *Asian J Sports Med* 3:139–44, 2012.
- Ciucurel MM: The relation between anxiety, reaction time and performance before and after sport competitions. *Procedia - Soc and Behav Sc* 33:885–889, 2012.
- Czeisler CA, Duffy JF, Shanahan TL, et al: Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker. *Science* 284:2177–81, 1999.
- Dean DA 2nd, Forger DB, Klerman EB: Taking the lag out of jet lag through model-based schedule design. *PLoS Comput Biol* 5:e1000418, 2009.
- Dinges DF, Broughton RJ: Sleep and alertness: chronobiological, behavioral, and medical aspects of napping. Raven Press, New York, 1989.

Dinges DF, Orne MT, Whitehouse WG, Orne EC: Temporal placement of a nap for alertness: contributions of circadian phase and prior wakefulness. *Sleep* 10:313–29, 1987.

Edwards BJ, Atkinson G, Waterhouse J, et al: Use of melatonin in recovery from jetlag following an eastward flight across 10 time zones. *Ergonomics* 43:1501–13, 2000.

Faraut B, Andrillon T, Vecchierini MF, Leger D: Napping: A public health issue. From epidemiological to laboratory studies. *Sleep Medicine Reviews* 1–16, 2016.

Forbes-Robertson S, Dudley E, Vadgama P, et al: Circadian disruption and remedial interventions: effects and interventions for jet lag for athletic peak performance. *Sports Med* 42:185–208, 2012.

Hammouda O, Chtourou H, Chahed H, et al: High intensity exercise affects diurnal variation of some biological markers in trained subjects. *Int J Sports Med* 33:886–891, 2012.

Harrison Y, Horne JA: Long-term extension to sleep—are we really chronically sleep deprived? *Psychophysiology* 33:22–30, 1996.

Hayashi M, Watanabe M, Hori T: The effects of a 20 min nap in the mid-afternoon on mood, performance and EEG activity. *Clin Neurophysiol* 110:272–9, 1999.

Horne J, Anderson C, Platten C: Sleep extension versus nap or coffee, within the context of “sleep debt.” *Journal of sleep research* 17:432–6, 2008.

Jackson G: Come fly with me: jet lag and melatonin. *Int J Clin Pract* 64:135, 2010.

Kamdar BB, Kaplan KA, Kezirian EJ, Dement WC: The impact of extended sleep on daytime alertness, vigilance, and mood. *Sleep medicine* 5:441–8, 2004.

Lagarde D, Chappuis B, Billaud PF, et al: Evaluation of pharmacological aids on physical performance after a transmeridian flight. *Med Sci Sports Exerc* 33:628–34, 2001.

Lavie P, Zvuluni A: The 24-hour sleep propensity function: experimental bases for somnology. *Psychophysiology* 29:566–75, 1992.

Leatherwood WE, Drago: Effect of airline travel on performance: a review of the literature. *Br J Sports Med*, 2012.

Lemmer B, Kern RI, Nold G, Lohrer H: Jet lag in athletes after eastward and westward time-zone transition. *Chronobiol Int* 19:743–64, 2002.

Mah CD, Mah KE, Kezirian EJ, Dement WC: The effects of sleep extension on the athletic performance of collegiate basketball players. *Sleep* 34:943–50, 2011.

Mednick SC, Nakayama K, Cantero JL, et al: The restorative effect of naps on perceptual deterioration. *Nature neuroscience* 5:677–81, 2002.

Milner CE, Cote KA: Benefits of napping in healthy adults: impact of nap length, time of day, age, and experience with napping. *J Sleep Res* 18:272–81, 2009.

Minors DS, Waterhouse JM: Anchor sleep as a synchronizer of rhythms on abnormal routines. *Int J Chronobiol* 7:165–88, 1981.

Monk TH, Buysse DJ, Billy BD: Using daily 30-min phase advances to achieve a 6-hour advance: circadian rhythm, sleep, and alertness. *Aviat Space Environ Med* 77:677–86, 2006.

Monk TH, Buysse DJ, Reynolds CF 3rd, Kupfer DJ: Inducing jet lag in older people: adjusting to a 6-hour phase advance in routine. *Exp Gerontol* 28:119–33, 1993.

Mougin F, Bourdin H, Simon-Rigaud ML, et al: Effects of a selective sleep deprivation on subsequent anaerobic performance. *Int J Sports Med* 17:115–9, 1996.

Mougin F, Bourdin H, Simon-Rigaud ML, et al: Hormonal responses to exercise after partial sleep deprivation and after a hypnotic drug-induced sleep. *J Sports Sci* 19:89–97, 2001.

Mougin F, Davenne D, Simon-Rigaud ML, et al: [Disturbance of sports performance after partial sleep deprivation]. *C R Seances Soc Biol Fil* 183:461–6, 1989.

Mougin F, Simon-Rigaud ML, Davenne D, et al: Effects of sleep disturbances on subsequent physical performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 63:77–82, 1991.

Mougin F, Simon-Rigaud ML, Davenne D, et al: [Tolerance to exertion after sleep reduction and after taking a hypnotic: zolpidem]. *Arch Int Physiol Biochim Biophys* 100:255–62, 1992a.

Mougin F, Simon-Rigaud ML, Mougin C, et al: Met-enkephalin, beta-endorphin and cortisol responses to sub-maximal exercise after sleep disturbances. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 64:371–6, 1992b.

Mulrine HM, Signal TL, Berg MJ, Gander PH: Post-sleep inertia performance benefits of longer naps in simulated night work and extended operations. *Chronobiol Int* 29:1249–57, 2012.

Naitoh P: Circadian cycles and restorative power of naps. In: Books SM and S (ed) *Biological Rhythms, Sleep and Shift Work*. New York, pp 553–580, 1981.

Petit E, Bourdin H, Mougin M, et al: Time-of-day effects on psychomotor and physical performances in highly trained cyclists. *Percept Mot Skills* 117:376–388, 2013.

Petit E, Mougin F, Bourdin H, et al: Impact of 5-h phase advance on sleep architecture and physical performance in athletes. *Appl Physiol Nutr Metab* 39:1230–6, 2014a.

Petit E, Mougin F, Bourdin H, et al: A 20-min nap in athletes changes subsequent sleep architecture but does not alter physical performances after normal sleep or 5-h phase-advance conditions. *European journal of applied physiology* 114:305–15, 2014b

Petit E, Bourdin H, Tio G, et al: Effects of a 20-Min Nap Post Normal and Jet Lag Conditions on P300 Components in Athletes. *Int J Sports Med* 39:508–516, 2018.

Racinais S, Connes P, Bishop D, et al: Morning versus evening power output and repeated-sprint ability. *Chronobiol Int* 22:1029–39, 2005.

Reilly T, Atkinson G, Edwards B, et al: Diurnal variation in temperature, mental and physical performance, and tasks specifically related to football (soccer). *Chronobiol Int* 24:507–19, 2007

Reilly T, Edwards B: Altered sleep-wake cycles and physical performance in athletes. *Physiol & Behav* 90:274–84, 2007.

Reilly T, Waterhouse J: Sports performance: is there evidence that the body clock plays a role? *Eur J Appl Physiol* 106:321–32, 2009.

Roehrs T, Timms V, Zwyghuizen-Doorenbos A, Roth T: Sleep extension in sleepy and alert normals. *Sleep* 12:449–57, 1989.

Rupp TL, Wesensten NJ, Bliese PD, Balkin TJ: Banking sleep: realization of benefits during subsequent sleep restriction and recovery. *Sleep* 32:311–21, 2009.

Samuels CH: Jet Lag and Travel Fatigue: A Comprehensive Management Plan for Sport Medicine Physicians and High-Performance Support Teams. *Clin J Sport Med* 22:268–273, 2012.

Smith RS, Reilly T: Athletic performance. In: Kushida C (ed) *Sleep deprivation: clinical issues. Pharmacology and sleep loss effects*. Marcel Dekker, New York, pp 313–334, 2005.

Souissi N, Driss T, Chamari K, et al: Diurnal variation in Wingate test performances: influence of active warm-up. *Chronobiol Int* 27:640–52, 2010.

Souissi N, Gauthier A, Sesboue B, et al: Circadian rhythms in two types of anaerobic cycle leg exercise: force-velocity and 30-s Wingate tests. *Int J Sports Med* 25:14–9, 2004.

Tietzel AJ, Lack LC: The recuperative value of brief and ultra-brief naps on alertness and cognitive performance. *J Sleep Res* 11:213–8, 2002.

Van der Heijden KB, de Sonnevile LM, Althaus M: Time-of-day effects on cognition in preadolescents: a trails study. *Chronobiol Int* 27:1870–94, 2010.

Van Dongen HP, Dinges DF: Sleep, circadian rhythms, and psychomotor vigilance. *Clin Sports Med Clinics in sports medicine* 24:237–49, 2005.

Walker MP, Stickgold R: It's practice, with sleep, that makes perfect: implications of sleep-dependent learning and plasticity for skill performance. *Clin Sports Med* 24:301–317, ix, 2005.

Waterhouse J: Circadian rhythms and cognition. *Prog Brain Res* 185:131–53, 2010.

Waterhouse J, Atkinson G, Edwards B, Reilly T: The role of a short post-lunch nap in improving cognitive, motor, and sprint performance in participants with partial sleep deprivation. *J Sports Sci* 25:1557–66, 2007.

- Racinais S, Connes P, Bishop D, et al: Morning versus evening power output and repeated-sprint ability. *Chronobiol Int* 22:1029–39, 2005.
- Reilly T, Atkinson G, Edwards B, et al: Diurnal variation in temperature, mental and physical performance, and tasks specifically related to football (soccer). *Chronobiol Int* 24:507–19, 2007
- Reilly T, Edwards B: Altered sleep-wake cycles and physical performance in athletes. *Physiol & Behav* 90:274–84, 2007.
- Reilly T, Waterhouse J: Sports performance: is there evidence that the body clock plays a role? *Eur J Appl Physiol* 106:321–32, 2009.
- Roehrs T, Timms V, Zwyghuizen-Doorenbos A, Roth T: Sleep extension in sleepy and alert normals. *Sleep* 12:449–57, 1989.
- Rupp TL, Wesensten NJ, Bliese PD, Balkin TJ: Banking sleep: realization of benefits during subsequent sleep restriction and recovery. *Sleep* 32:311–21, 2009.
- Samuels CH: Jet Lag and Travel Fatigue: A Comprehensive Management Plan for Sport Medicine Physicians and High-Performance Support Teams. *Clin J Sport Med* 22:268–273, 2012.
- Smith RS, Reilly T: Athletic performance. In: Kushida C (ed) *Sleep deprivation: clinical issues. Pharmacology and sleep loss effects*. Marcel Dekker, New York, pp 313–334, 2005.
- Souissi N, Driss T, Chamari K, et al: Diurnal variation in Wingate test performances: influence of active warm-up. *Chronobiol Int* 27:640–52, 2010.
- Souissi N, Gauthier A, Sesboue B, et al: Circadian rhythms in two types of anaerobic cycle leg exercise: force-velocity and 30-s Wingate tests. *Int J Sports Med* 25:14–9, 2004.
- Tietzel AJ, Lack LC: The recuperative value of brief and ultra-brief naps on alertness and cognitive performance. *J Sleep Res* 11:213–8, 2002.
- Van der Heijden KB, de Sonnevile LM, Althaus M: Time-of-day effects on cognition in preadolescents: a trails study. *Chronobiol Int* 27:1870–94, 2010.
- Van Dongen HP, Dinges DF: Sleep, circadian rhythms, and psychomotor vigilance. *Clin Sports Med Clinics in sports medicine* 24:237–49, 2005.
- Walker MP, Stickgold R: It's practice, with sleep, that makes perfect: implications of sleep-dependent learning and plasticity for skill performance. *Clin Sports Med* 24:301–317, ix, 2005.
- Waterhouse J: Circadian rhythms and cognition. *Prog Brain Res* 185:131–53, 2010.
- Waterhouse J, Atkinson G, Edwards B, Reilly T: The role of a short post-lunch nap in improving cognitive, motor, and sprint performance in participants with partial sleep deprivation. *J Sports Sci* 25:1557–66, 2007.

ANNEXES

Annexe 1 : Traduction française de « l'Athlète Sleep Screening Questionnaire »

Questionnaire de qualité du sommeil pour les athlètes

Traduction française de l'*Athlete Sleep Screening Questionnaire* (ASSQ)

Les questions suivantes concernent vos habitudes de sommeil. Veuillez encercler la réponse qui, selon vous, représente le mieux vos récentes habitudes de sommeil. Pour toutes les questions, encercliez une lettre de « a » à « e », sauf indication contraire.

Nom :

Prénom :

Discipline sportive :

1. Ces derniers temps, combien d'heures de sommeil avez-vous chaque nuit ? (Ceci peut être différent du nombre d'heures passées au lit).
 - a. 5 à 6 heures
 - b. 6 à 7 heures
 - c. 7 à 8 heures
 - d. 8 à 9 heures
 - e. Plus de 9 heures

 2. Combien de fois par semaine faites-vous la sieste ?
 - a. Aucune
 - b. Une ou deux fois
 - c. Trois ou quatre fois
 - d. Cinq à sept fois

 3. Dans quelle mesure êtes-vous satisfait/insatisfait de votre qualité de sommeil ?
 - a. Très satisfait
 - b. Quelque peu satisfait
 - c. Ni satisfait, ni insatisfait
 - d. Quelque peu insatisfait
 - e. Très insatisfait

 4. Ces derniers temps, généralement, combien de temps vous a-t-il fallu pour vous endormir ?
 - a. 15 minutes ou moins
 - b. 16 à 30 minutes
 - c. 31 à 60 minutes
 - d. Plus de 60 minutes

 5. A quelle fréquence avez-vous des difficultés à rester endormi ?
 - a. Jamais
 - b. Une ou deux fois par semaine
 - c. Trois ou quatre fois par semaine
 - d. Cinq à sept fois par semaine

 6. Ces derniers temps, combien de fois par semaine avez-vous pris des médicaments pour vous aider à dormir (prescrit ou sans ordonnance) ?
-

- a. Jamais
 - b. Une ou deux fois par semaine
 - c. Trois ou quatre fois par semaine
7. Selon votre préférence, en étant entièrement libre d'organiser vos journées, à quelle heure vous lèveriez-vous ?
- a. Entre 05h00 et 06h30
 - b. Entre 06h30 et 07h45
 - c. Entre 07h45 et 09h45
 - d. Entre 09h45 et 11h00
 - e. Entre 11h00 et 12h00
8. Comment vous sentez-vous pendant la première demie heure suivant votre réveil ?
- a. Pas du tout éveillé
 - b. Légèrement éveillé
 - c. Suffisamment éveillé
 - d. Très éveillé
9. Vous considérez-vous comme étant une personne du matin ou du soir ?
- a. Tout à fait du matin
 - b. Plutôt du matin
 - c. Plutôt du soir
 - d. Tout à fait du soir
10. Selon votre préférence, en étant entièrement libre d'organiser vos journées, à quelle heure vous coucheriez-vous ?
- a. Entre 20h00 et 21h00
 - b. Entre 21h00 et 22h15
 - c. Entre 22h15 et 00h30
 - d. Entre 00h30 et 01h45
 - e. Entre 01h45 et 03h00
11. Lorsque vous voyagez pour votre sport, ressentez-vous des troubles du sommeil ?
- a. Oui
 - b. Non
12. Lorsque vous voyagez pour votre sport, ressentez-vous des dysfonctionnements en journée (sensation de malaise général ou baisse de performance)
- a. Oui
 - b. Non
13. Êtes-vous généralement un ronfleur «bruyant » ?
- a. Oui
 - b. Non

14. Vous a-t-on déjà dit que vous aviez des pauses respiratoires, des étouffements ou un souffle court pendant votre sommeil ?
- Oui
 - Non
15. En moyenne, combien de produits contenant de la caféine (comprimés de caféine, café, thé, sodas, boissons énergisantes) prenez-vous par jour ?
Pour le café ou thé, une dose = 177 – 237ml ; pour les sodas caféinés, une dose = une canette (355ml).
- Moins de 1 par jour
 - 1-2 par jour
 - 3 par jour
 - 4 par jour
 - 5 ou plus par jour
16. Ces derniers temps, à quelle fréquence utilisez-vous un appareil électronique (exemple : téléphone portable, ordinateur, tablette, TV...) dans l'heure précédant le coucher ?
- Jamais
 - 1-3 fois par semaine
 - 4-6 fois par semaine
 - Tous les jours

Analyse du questionnaire de qualité du sommeil pour les athlètes

Scoring de l'Athlete Sleep Screening Questionnaire

Additionner le score des items 1, 3, 4, 5 et 6 du questionnaire de qualité du sommeil pour les athlètes pour obtenir le score de difficulté de sommeil. Le score correspond à un niveau de perturbation du sommeil :

Aucune : 0 – 4 ; **léger** : 5 – 7 ; **Modéré** : 8 – 10 ; **Sévère** : 11 – 17

17. Ces derniers temps, combien d'heures de sommeil avez-vous chaque nuit ? (Ceci peut être différent du nombre d'heures passées au lit).
 - f. 5 à 6 heures (4)
 - g. 6 à 7 heures (3)
 - h. 7 à 8 heures (2)
 - i. 8 à 9 heures (1)
 - j. Plus de 9 heures (0)

3. Dans quelle mesure êtes-vous satisfait/insatisfait de votre qualité de sommeil ?
 - f. Très satisfait (0)
 - g. Quelque peu satisfait (1)
 - h. Ni satisfait, ni insatisfait (2)
 - i. Quelque peu insatisfait (3)
 - j. Très insatisfait (4)

4. Ces derniers temps, généralement, combien de temps vous a-t-il fallu pour vous endormir ?
 - e. 15 minutes ou moins (0)
 - f. 16 à 30 minutes (1)
 - g. 31 à 60 minutes (2)
 - h. Plus de 60 minutes (3)

5. A quelle fréquence avez-vous des difficultés à rester endormi ?
 - e. Jamais (0)
 - f. Une ou deux fois par semaine (1)
 - g. Trois ou quatre fois par semaine (2)
 - h. Cinq à sept fois par semaine (3)

6. Ces derniers temps, combien de fois avez-vous pris des médicaments pour vous aider à dormir (prescrits ou sans ordonnance) ?
 - d. Jamais (0)
 - e. Une ou deux fois par semaine (1)
 - f. Trois ou quatre fois par semaine (2)

7. Selon votre préférence, en étant entièrement libre d'organiser vos journées, à quelle heure vous lèveriez-vous ?
- f. Entre 05h00 et 06h30 (4)
 - g. Entre 06h30 et 07h45 (3)
 - h. Entre 07h45 et 09h45 (2)
 - i. Entre 09h45 et 11h00 (1)
 - j. Entre 11h00 et 12h00 (0)
8. Comment vous sentez-vous pendant la première demie heure suivant votre réveil ?
- e. Pas du tout éveillé (0)
 - f. Légèrement éveillé (1)
 - g. Suffisamment éveillé (2)
 - h. Très éveillé (3)
9. Vous considérez-vous comme étant une personne du matin ou du soir ?
- e. Tout à fait du matin (3)
 - f. Plutôt du matin (2)
 - g. Plutôt du soir (1)
 - h. Tout à fait du soir (0)
10. Selon votre préférence, en étant entièrement libre d'organiser vos journées, à quelle heure vous coucheriez-vous ?
- f. Entre 20h00 et 21h00 (4)
 - g. Entre 21h00 et 22h15 (3)
 - h. Entre 22h15 et 00h30 (2)
 - i. Entre 00h30 et 01h45 (1)
 - j. Entre 01h45 et 03h00 (0)

Autres éléments (items 2, 15 et 16)

Ces éléments ne sont pas inclus dans le score ni dans les modificateurs, mais ils sont importants pour éclairer les stratégies d'optimisation du sommeil, telles que les stratégies pour augmenter la fréquence des siestes, réduire la consommation de caféine et réduire l'utilisation des appareils électroniques avant le coucher.

Recommandations :

Voici ce qui peut être utilisé comme guide en recommandations d'intervention :

A = Fiche d'information générale sur le sommeil spécifique aux athlètes et des recommandations personnalisées en fonction du manque de sommeil ou d'autres problèmes spécifiques.

B = Surveillance et suivi par l'encadrement de sportif.

C = Suivi et évaluation d'un médecin du sport.

D = Évaluation et recommandations d'un médecin spécialiste du sommeil ou d'un professionnel du sommeil qualifié.

E = Diagnostic d'évaluation du trouble du sommeil et traitement associé.

Catégories :

Aucune : 0 – 4 – Recommandation : A

Léger : 5 – 7 – Recommandations : A + B

Modéré : 8 – 10 – Recommandations : A + B + C + D + E (si indiqué)

Sévère : 11 – 17 – Recommandations : A + B + C + D + E

Les modificateurs (problèmes de respiration, voyage, chronotype...)

Les caractéristiques modifiant le sommeil ne sont pas inclus dans le scoring car ils sont moins fréquents et ne sont pas toujours applicables à certains groupes d'athlètes (par exemple, les voyages). Cependant ils sont importants pour fournir des recommandations spécifiques en matière d'éducation et d'intervention.

Troubles respiratoires du sommeil :

Si l'athlète répond par l'affirmation à l'item 13 (ronflement bruyant) ou à l'item 14 (apnées), il convient de les évaluer ensuite. Recommandations : D + E (si indiqué)

Problèmes de sommeil et de performances pendant en voyages :

Si l'athlète répond par l'affirmation à l'item 11 (troubles du sommeil), une formation à la gestion des voyages et du décalage horaire peut être nécessaire.

Recommandations : A

Si l'athlète répond par l'affirmation à l'item 12 (problèmes de performance), le problème est plus grave et peut nécessiter des interventions supplémentaires allant au-delà de l'éducation.

Recommandations : A + B + C (si indiqué) + D (si indiqué)

Chronotype (de soir)

Les chronotypes du soir sont plus sujet à des problèmes de sommeil. Ajoutez les scores des éléments 7 à 10 pour obtenir le score de chronotype de soir. Un total ≤ 4 indique que l'athlète est de chronotype du soir.

Recommandations : D + E (si indiqué).

> **ENTRAÎNEMENT** Sommeil et performance

« Le Tour se gagne au lit! »

« LE TOUR SE GAGNE AU LIT. EN DORMANT » DISAIT ANTONIN MAGNE. LES ÉTUDES SCIENTIFIQUES BASÉES SUR DES RELEVÉS PHYSIOLOGIQUES, NOTAMMENT ENCÉPHALOGRAPHIQUES, ONT CONFIRMÉ L'INTUITION DES ANCIENS. LE SOMMEIL EST À LA BASE DE TOUTE RÉUSSITE SPORTIVE. VOYONS POURQUOI, ET COMMENT L'OPTIMISER.

TEXTE : EMMANUEL BRUNET, RESPONSABLE RECHERCHE & PERFORMANCE, ET LUCAS GARBELLOTO, DOCTORANT, CHARGÉ DE MISSION RECHERCHE & PERFORMANCE À LA FFC



LE SOMMEIL, FACTEUR CLÉ DE LA RÉCUPÉRATION

Depuis l'apparition des premières longues compétitions de cyclisme, la récupération a toujours pris une place majeure, presque sacrée. Depuis peu, des études scientifiques autour du sommeil des sportifs ont vu le jour et confirmé l'intuition des anciens : le sommeil est certainement le facteur premier de la récupération du sportif, bien avant certaines techniques « high-tech » très à la mode actuellement. Que dit la science actuellement pour que nos cyclistes améliorent leur sommeil, augmentant ainsi leurs capacités de récupération et donc de performance ?

LA COMPOSITION DU SOMMEIL

L'étude du sommeil a réellement débuté en 1929 avec la découverte de l'électroencéphalographie, mesurant l'activité électrique cérébrale. Depuis, de nombreuses études ont été publiées. Au cours d'une nuit de sommeil, se succèdent quatre à six cycles d'environ 1h30, composés eux-mêmes de différentes périodes de sommeil, appelés des stades. Chaque cycle commence par du sommeil léger, se poursuit par du sommeil lent profond et se termine par du sommeil paradoxal. Les premiers cycles présentent une quantité de sommeil lent profond plus importante avant de laisser place à une majorité de sommeil paradoxal en fin de nuit. Le sommeil lent profond tire son nom des signaux physiologiques qui l'accompagnent : ondes cérébrales plus lentes, rythme cardiaque et respiration ralentis. Au cours de ce stade, contrairement au sommeil léger, il est très difficile de se réveiller. Cette phase permet la sécrétion de l'hormone de croissance, nécessaire à la réparation du tissu musculaire. Elle est donc primordiale à la récupération physique. Le sommeil paradoxal, pendant lequel se produit la majeure partie des rêves, se caractérise à la fois par une activité musculaire nulle, par une activité cérébrale proche de l'état d'éveil : d'où le nom de sommeil « paradoxal ». Ce stade de sommeil est indispensable pour la mémoire, le classement des idées et des expériences, ainsi que pour l'intégration des apprentissages. Ces deux stades sont des marqueurs importants : une bonne nuit de sommeil va se composer de 18 à 25% de sommeil lent profond, et de 20 à 25% de sommeil paradoxal. La durée totale de sommeil nécessaire pour être en bonne forme varie en fonction des individus : de six à dix heures par nuit. Cette variation s'explique selon des paramètres comme l'âge ou des facteurs génétiques. Ces derniers expliquent l'existence de « gros dormeurs » et de « petits dormeurs ». Il n'y a donc pas une bonne durée de sommeil requise pour se réveiller en pleine forme, mais une quantité propre à chacun.

UNE HORLOGE BIOLOGIQUE INTERNE

L'être humain possède une horloge biologique au sein du système nerveux central qui se manifeste par la sécrétion d'une hormone : la mélatonine. Cette hormone sécrétée du soir au petit matin est également régulée par des synchroniseurs externes (ou « donneurs de temps »), que sont l'alimentation, l'activité physique ou les activités sociales, mais le plus puissant reste la lumière. En effet, la production de mélatonine est inhibée par la lumière du jour, puis libérée après le coucher du soleil pour atteindre des seuils très importants au moment du coucher et ainsi favoriser l'endormissement. Attention, certaines lumières artificielles peuvent avoir les mêmes effets que la lumière naturelle. En effet, les récepteurs de la rétine qui transmettent les informations jusqu'à notre cerveau sont très sensibles à la lumière bleue, émise par les tablettes, téléphones portables, ordinateurs portables ou télévisions. De fait, l'exposition à la lumière bleue en soirée retarde la sécrétion de mélatonine et donc les premiers signes de fatigue. Enfin, au même titre que pour la quantité de sommeil, il existe également une part génétique dans ces rythmes. Certaines personnes sont « du matin », elles préfèrent se coucher et se lever tôt, sont en forme et alertes dès le réveil, plus productives en début de journée. À l'inverse des personnes « du soir », qui ont tendance à se coucher et se lever plus tard et sont en forme en fin de journée.

LES CONSÉQUENCES D'UN MANQUE DE SOMMEIL

Il va de soi que le manque de sommeil impacte les performances sportives, néanmoins il est difficile de synthétiser tous ces effets en quelques lignes. Pour appréhender les effets de la privation de sommeil, il faut prendre en compte un certain nombre de paramètres : le degré de privation de sommeil (privation partielle ou totale), le caractère aigu ou chronique de la privation, ou encore le type de performance évalué. Globalement, il en ressort que les performances de courte durée sont moins affectées par la privation de sommeil. Une étude australienne n'a mesuré aucune diminution des performances physiques en haltérophilie après une nuit blanche, au contraire de nombreux paramètres psychologiques qui se trouvaient altérés, tels la fatigue, l'humeur ou la vigueur. Une autre équipe australienne a mis en évidence certains effets sur des répétitions de sprints courts, notant une diminution des performances sur des sprints de quinze mètres répétés chaque minute durant une heure après une nuit blanche. Sur des efforts de plus longue durée, une équipe de recherche française a mesuré une diminution des puissances mécaniques maximales lors d'un protocole aérobique progressif réalisé jusqu'à épuisement après deux nuits de restriction partielle du sommeil.

Au-delà des performances physiques, le sommeil joue un rôle primordial dans la prévention des blessures. Une étude anglaise a mis en lien les pratiques du sommeil de 112 adolescents sportifs avec leur dossier médical. Les adolescents qui dormaient moins de 8 heures par nuit avaient 1,7 fois plus de chance de se blesser que ceux qui dormaient au moins huit heures. Ainsi, une quantité de sommeil suffisante et de bonne qualité est nécessaire pour être en pleine possession de ses moyens physiques et cognitifs, mais aussi dans un but de prévention des blessures.

Enfin, une équipe américaine, a suivi la quantité de sommeil de 146 sujets en bonne santé avant de les exposer à un virus du rhume. Les résultats ont montré que les personnes dormant moins de 7h/nuit avaient trois fois plus de chance de développer le virus que celles dormant au moins 8h/nuit. Cette étude, qui n'est pas unique dans son domaine, montre l'importance du sommeil dans le maintien d'un système immunitaire efficace, d'autant plus chez le sportif qui peut être fragilisé lors de périodes d'entraînement intense.

LE SOMMEIL DES CYCLISTES DE HAUT-NIVEAU

De nombreux travaux font état d'un sommeil perturbé chez une bonne partie des athlètes de différents niveaux et disciplines sportives. Partant de ce constat, nous (Fédération Française de Cyclisme et l'équipe de recherche EA930 de l'Université de Bourgogne-Franche Comté) avons étudié le sommeil des équipes de France Elite des différentes disciplines olympiques. Les résultats de notre étude avec les meilleurs cyclistes français montrent que la grande majorité des athlètes présentent un sommeil en quantité suffisante, de bonne qualité et une très grande régularité dans les habitudes de coucher et de lever. Ces évaluations vont à l'encontre de nombreux travaux qui montraient un sommeil perturbé pour un bon nombre de sportifs. Nos résultats montrent la nécessité d'une hygiène de sommeil irréprochable pour l'accès au très haut niveau en cyclisme (l'adage d'Antonin Magne semble avoir été bien intégré). Dans ce cadre, nous avons pu également nous concentrer sur la mise en place de stratégies.



LA SIESTE

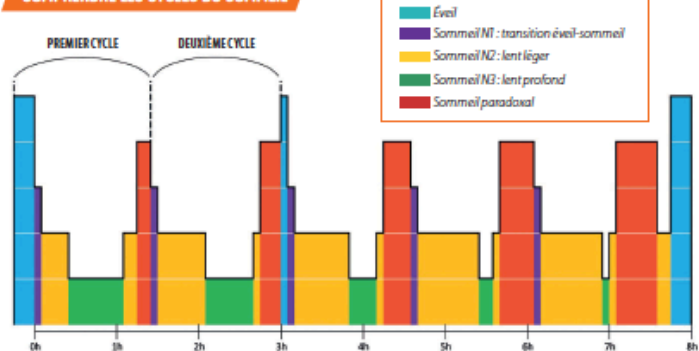
Les derniers travaux sur la sieste montrent des effets bénéfiques sur les performances cognitives et la vigilance mais également sur les performances physiques, lorsqu'elle vient compenser un manque de sommeil de la nuit précédente. Cependant il convient de rappeler qu'une sieste doit se situer entre 12h et 15h et ne doit pas excéder 30mn, faute d'engendrer une inertie de sommeil (sensation de fatigue et diminution de la vigilance à la suite de la sieste), et d'impacter la nuit de sommeil subséquente.

LES BONNES PRATIQUES

Voici quelques conseils et astuces pour une bonne hygiène de sommeil :

- Respecter son horloge biologique en gardant un rythme de sommeil régulier
- Maintenir une quantité de sommeil suffisante
- Favoriser l'aménagement propice au sommeil : température entre 17 et 19°, chambre obscure, literie adaptée, aucun écran, Isolée des nuisances sonores,
- Éviter l'utilisation des écrans dans les deux heures, précédant le coucher. À défaut, programmer un mode nuit (filtre à lumière bleue) sur ses écrans,
- Une exposition quotidienne et suffisante à la lumière naturelle,
- Terminer le dîner deux heures avant l'heure de coucher
- Éviter un dîner trop copieux le soir,
- Éviter les entraînements intensifs en soirée, après 18h
- En déplacement, emporter son propre oreiller, ses bouchons d'oreilles et son masque de nuit,
- Pratiquer une sieste inférieure à 30 minutes en cas d'un manque de sommeil ou d'une performance en soirée. ●

COMPRENDRE LES CYCLES DU SOMMEIL



Effets d'une stratégie de gestion du décalage horaire vers l'Est sur le sommeil et les performances de cyclistes de très haut niveau

L. Garbellotto^{1,2}, E. Petit¹, L. Isacco¹, E. Brunet², F. Mougin¹

¹ Laboratoire EA3920 et plateforme EPSI, ² Fédération Française de Cyclisme

Introduction

Lors des Jeux Olympiques de Tokyo en 2020, les sportifs seront soumis à 7 heures de décalage horaire vers l'Est. Ce décalage, de part l'avance de phase qu'il produit, s'accompagne de difficultés d'adaptation de l'horloge biologique interne désynchronisant les rythmes circadiens (température interne, sécrétions hormonales, rythme veille-sommeil) et altérant les performances physiques et cognitives. Pour prévenir ces effets délétères du décalage, une prise vespérale de mélatonine et une exposition à la lumière vive sont des modalités efficaces pour accélérer la resynchronisation à destination. Toutefois, ces mêmes modalités n'ont jamais été proposées en amont d'un réel décalage horaire chez le sportif de haut niveau. La présente étude se propose donc d'évaluer les effets d'une stratégie de gestion du décalage horaire (combinant mélatonine et lumière) en amont du vol et à destination, sur le sommeil et les performances de cyclistes français qui se déplaceront à Tokyo pour le Test Event.

Matériel et méthodes

Sujets :

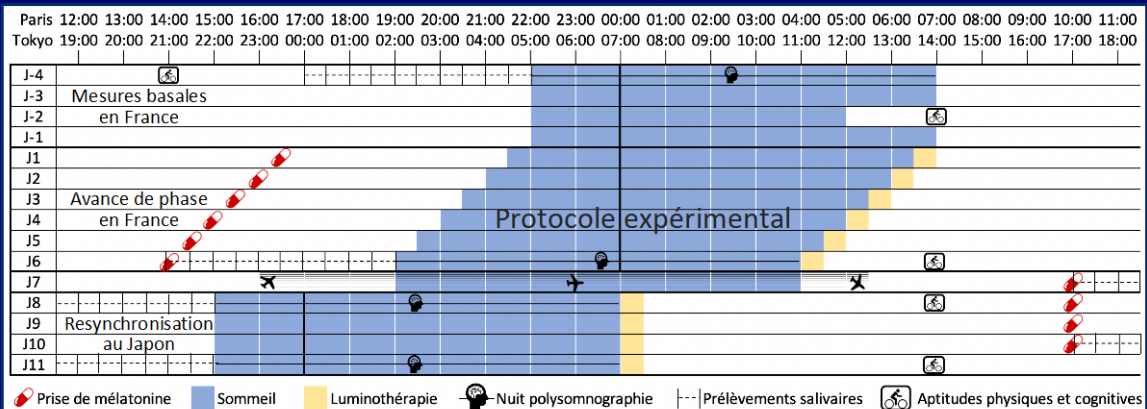
6 cyclistes de l'équipe de France de VTT XCO

Protocole expérimental :

- ① À domicile
 - Prise de mélatonine: 1 mg 5 h avant l'heure du coucher
 - Avance de l'heure de coucher: 30min/jour durant 6 jours
 - Luminothérapie: 20 min à 1500 lux au réveil (Luminette)
- ② Déplacement Paris Charles de Gaulle → Tokyo Haneda
 - Durée: 11h55 de vol en classe affaire
- ③ À destination
 - Prise de mélatonine: 1 mg 5 h avant l'heure du coucher
 - Rythme veille-sommeil: respectant le nouvel horaire du pays
 - Luminothérapie: 20 min à 1500 lux au réveil (Luminette)

Paramètres étudiés :

- Sommeil
 - ↳ Polysomnographie ambulatoire → Morpheus
- Mélatonine (DLMO)
 - ↳ Prélèvements salivaires → salivettes
- Aptitudes physiques aérobie et anaérobie
 - ↳ Wingate + contre la montre 4min en laboratoire → Home trainer Cycleops et Métamax 3BR2
- Aptitudes cognitives
 - ↳ Psychomotor Vigilance Task → ordinateur
- Rythme circadien de la température interne en continu
 - ↳ Capsules ingérables → e-Celsius, Bodycap



Résultats attendus

- Conservation de l'architecture et de la composition du sommeil (qualité et quantité)
- Avance des rythmes circadiens, synchronisés avec la nouvelle période de sommeil
- Pas de dégradation des performances physiques et cognitives

Si ces résultats se confirment, cette stratégie sera adoptée pour les JO de Tokyo

Effects of an eastward flight with a synchronization strategy at destination, on sleep-wake and core body temperature rhythms in professional road cyclists

L. Garbellotto^{1, 2, 3}, E. Petit¹, E. Brunet³, V. Gillet⁴, H. Bourdin^{5, 6}, F. Mougin^{1, 2}

¹ EA3920, Université de Bourgogne Franche-Comté, ² UFR STAPS de Besançon, ³ Fédération Française de Cyclisme, Montigny-le-Bretonneux

⁴ Centre Médical Santé Sommeil Ellipse, Besançon, ⁵ EA481, Université de Bourgogne Franche-Comté, ⁶ Explorations du sommeil et de la vigilance, CHU Besançon

Introduction

In professional athletes, rapid airline travel across several times zones induces jet-lag, caused by conflict between the internal pacemaker and external cues¹. Although the sleep-wake rhythm synchronizes within a few days after transmeridian flight, melatonin or core body temperature (CBT) rhythms take longer to resynchronize². Limited field studies have investigated circadian rhythms during a real eastward flight in professional athletes. Thus, the aim of this study was to assess the effects of a long-haul travel to the east (France-Japan) following an active strategy of synchronization at destination using melatonin and bright light on sleep-wake and CBT rhythms in professional cyclists.

Material and methods

Subjects :

4 male professional road cyclists of the French national team selected for an international competition in Japan, took part in the study. They did not report any significant health problems and none of them take any substance that have an effect on sleep.

Age: 26.0±1.4 yrs; height: 175.8±1.5 cm; weight: 62.8±5.7 kg.

Study design :

At home (D-1) 🇫🇷

- Usual sleep-wake rhythm

Travel (D0) 🌐

- Direct flight Paris to Tokyo in economy class
- Departure : 23:30 - Paris Charles De Gaulle (France)
- Arrival : 11:30 - Tokyo Haneda (Japan)

At destination (D1 to D5) 🇯🇵

- Melatonin : 3.0 mg on D1, 2.0 mg from D2 to D4, and 1.0 mg on D5
- Sleep-wake schedules : in accordance to the new time zone
- Light therapy : 20 min at 1500 lux upon awaking

Studied parameters from D-1 to D5

- Sleep : sleep diary 📅
- CBT rhythm : ingestible capsules (capsule e-Celsius, Bodycap)

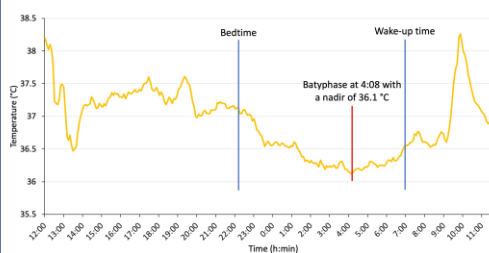


Figure 1: example of circadian CBT profile with batyphase and nadir of an athlete at home.

Results and discussion

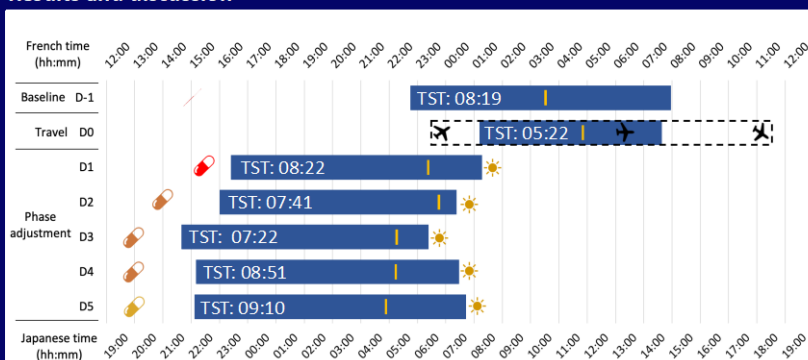


Figure 2: Sleep diary and CBT data. Data represent the mean of the 4 athletes. Ingestion of melatonin 3 mg, 2 mg, 1 mg; flight; light therapy; time in bed; TST: total sleep time; CBT batyphase

Sleep

During flight, TST ↓. On D2 and D3, TST ↓ compared to that recorded on D-1 but on D4 and D5, a rebound effect was observed. Thus, at destination, sleep-wake rhythm was quickly resynchronized.

CBT rhythm

On D-1, batyphase appeared at 03:34 (nadir: 36.1°C). On D1, it shifted at 06:25 (nadir: 36.1°C), i.e. a phase advance about 4 h on the 7 time zones crossed.

On D5, phase advance was then slower, batyphase appeared only at 04:55 (nadir: 36.0°C).

Conclusion

Melatonin administration, bright light exposure, the summer sunset in Japan and finally jet lag experiences of professional athletes might have been favorable to a relatively rapid resynchronization. However, to be more effective, a pre-flight plan with a progressive advance of the sleep-wake schedules could accelerate resynchronization at destination.

1. Lee A, Galvez JC (2012) Jet Lag in Athletes. Sports Health 4:211-216.

2. Duffield R, Fowler PM (2018) Domestic and international travel. In: Routledge A (ed) Sport, Recovery, and Performance: Interdisciplinary Insights, pp 183-197

Annexe 5 : Suivi mis en place au sein des équipes de France de la FFC pour dépister et traiter les troubles du sommeil

