



UNIVERSITÉ DU LITTORAL CÔTE D'OPALE

ÉCOLE DOCTORALE BIOLOGIE-SANTÉ

**Doctorat  
Sciences du Sport**

# **L'Agenda de Sommeil Interactif comme Outil Individuel de Management de la Fatigue**

Du Sport de Haut Niveau à la Santé Publique.

**HURDIEL Rémy**

**Thèse dirigée par**

THEUNYNCK Denis

Soutenue le 2 novembre 2011

|               |               |            |                                     |
|---------------|---------------|------------|-------------------------------------|
| <b>Jury :</b> | PR.HANS       | VAN DONGEN | Washington State University         |
|               | PR.DAMIEN     | DAVENNE    | Université de Caen                  |
|               | PR.PIERRE     | PHILIP     | CHU Pellegrin - Bordeaux            |
|               | DR.CHRISTELLE | MONACA     | CHU Salengro - Lille                |
|               | PR.DENIS      | THEUNYNCK  | Université du Littoral Côte d'Opale |

Cette thèse a été préparée au



ReLACS / ER3S

Centre Universitaire des Darses

Bâtiment Staps

189 B, rue Maurice Schumann

59379 Dunkerque Cedex 01.

☎ 03 21 46 55 90

FAX 03 21 46 55 86

✉ relacs@univ-littoral.fr

Site <http://www-relacs.univ-littoral.fr>

*Je dédie ce travail  
à tous ceux, collègues, amis, famille, qui m'ont permis de le  
réaliser et surtout à mon Papa.*

« Il y a trois sortes d'hommes: les  
vivants, les morts et ceux qui vont  
sur la mer. »

---

ARISTOTE

# Remerciements

Merci aux Syndicat Mixte de la Côte d'Opale qui a financé mes recherches durant ces trois années de thèse.

Je remercie Denis Theunynck qui a dirigé mon travail depuis 2006 ainsi que pour la confiance qu'il m'a accordé tout au long de la réalisation de ces travaux.

Merci aux membres du jury d'avoir accepté de critiquer ce mémoire de thèse.

Je remercie les collègues du laboratoire Relacs, particulièrement Thierry Pezé, Gautier Zunquin, Phillipe Masson, Jeremy Vanhelst, Gilles Bui-Xuân et Jacques Mikulovic pour m'avoir donné les coups de main nécessaire à la réalisation et à l'analyse de ces études.

J'adresse mes sincères remerciements à Christelle Monaca (CHRU de Lille), car elle m'a souvent accueilli et j'ai beaucoup appris à ses côtés. Merci à Benoit Mauvieux (UFR Staps de Caen) pour son coup de main en statistiques.

Merci à Hans Van Dongen et à Peter McCauley pour leur formidable soutien (le mot est faible). C'est une chance pour moi d'avoir pu profiter de leur expertise et de leur rigueur scientifique.

Merci à messieurs Olivier Coste et Pascal Van Beers (IMASSA, Institut de Médecine Aérospatiale du Service de Santé des Armées) ainsi que monsieur Emmanuel Billaud (Respironics) pour leur collaboration scientifique et le prêt de matériel polysomnographique.

Merci à tous les sujets des études de cette thèse, mais particulièrement aux 78

skippers avec qui nous avons travaillé ou avons tenté de travailler. Pendant leurs courses, tous ont donné le maximum pour ces recherches, alors qu'ils naviguaient pour gagner. J'ai essayé en retour de les faire progresser autant que possible. Certains d'entre eux sont désormais de grand champions. Je suis très fier de leur avoir ouvert l'esprit sur la problématique du sommeil et de la vigilance.

Merci à messieurs Christian Le Pape et Jean Philippe Ballet-Baz, respectivement directeur du Pôle France "Finistère Course au large" à Port la Fôret et directeur du Pôle d'Excellence régional de Dunkerque. Ils m'ont permis de rencontrer une bonne partie des sujets des études de ce mémoire et ont parfois participé financièrement à la mise en place de ces études.

Le mot de la fin pour Solenne, ma femme et la maman de nos merveilles, qui s'est beaucoup occupé seule des filles alors que j'étais "planté" devant mon ordinateur pour la rédaction de ce mémoire. Je l'espère, elle n'a pas tenu de statistiques sur le nombre de mes coups de blues...mais il paraît que c'est normal pour un thésard.

# Résumé de notre travail

De nombreuses études se sont attachées à observer, évaluer et démontrer les risques pour la santé et l'impact accidentogène et économique du manque de sommeil. Depuis quelques années, d'autres travaux se sont attachés à prendre en compte les facteurs individuels de sensibilité au manque de sommeil. Des programmes de management de la fatigue existent en milieux professionnels, mais peu d'entre eux s'appuient sur des outils dédiés exclusivement au management individuel du sommeil.

L'objectif de ce travail de thèse était de développer un outil individuel de management de la fatigue utilisable dans un cadre d'éducation à la santé. Cet outil, qui a été dénommé Scextan®, a été conçu sous la forme d'une application informatique. Nous souhaitons que l'application puisse également devenir un nouvel outil d'évaluation du rythme circadien et de recherches en conditions de vie réelle. Le processus d'éducation à la santé qui est associé à cette application informatique repose sur la saisie en temps réel des périodes de veille et de sommeil, et sur la visualisation graphique d'un historique de ces périodes. Cet ensemble est associé à un modèle de prédiction mathématique des performances en fonction des temps de veille et de repos qui ont été enregistrés. L'objectif est de permettre à l'utilisateur de planifier ses périodes d'activité et de repos en tenant compte à la fois de ses caractéristiques individuelles, mais aussi des conditions environnementales et, ou, de charge de travail auxquelles il est soumis.

Pour développer cet ensemble, plusieurs étapes de recherche et de validation ont dû être franchies.

La première partie du document de thèse présente une revue de la littérature qui reprend les principales connaissances sur le sommeil et la gestion de la fatigue. Nous avons également souhaité réaliser un bilan des techniques et des outils de mesure des variables du sommeil et de l'éveil. Nous avons ensuite présenté les effets et conséquences du manque de sommeil. Nous avons éclairé les méthodes permettant actuellement de prédire mathématiquement l'état de fatigue neuro comportementale, ainsi que les principales contre mesures au manque de sommeil, notamment d'un point de vue comportemental et éducatif. Nous avons réalisé un focus spécifique sur les particularités antérieurement décrites des navigateurs en solitaire qui doivent gérer une forte privation de sommeil, durant plusieurs jours, et ce dans des conditions environnementales contraintes mais connues.

Dans une seconde partie, qui constitue la contribution personnelle du travail de thèse, nous avons choisi dans un premier temps de préciser le comportement à terre et en mer de cette population d'étude originale. En effet, les courses à la voile en solitaire mettent à rude épreuve ces marins qui soutiennent un fonctionnement cognitif important 24 h par jour pendant plusieurs jours à plusieurs mois. La fatigue induite par le manque de sommeil, dans ce contexte de charge de travail importante et parfois de déphasage circadien, est une préoccupation majeure pour leur compétitivité et leur sécurité. Très peu de recherches, dont certaines anciennes, ont été consacrées à cela, et ce en partie parce que la collecte de données sur le sommeil et la performance pendant les courses en mer est très difficile.

Notre première étape de recherche a donc comporté deux études qui avaient pour objet d'analyser les comportements de notre population expérimentale. Dans un premier temps, nous avons relevé les quantités de sommeil ainsi que les éventuelles déficiences fonctionnelles des marins ( $N = 16$ ) pendant une course transatlantique en deux étapes et, dans un deuxième temps, nous avons observé l'architecture du sommeil à domicile ainsi qu'au retour de course ( $N = 12$ ). Pendant la course transatlantique, chaque marin a enregistré ses périodes de sommeil et les troubles fonctionnels qu'il dit avoir vécu. La durée du sommeil auto-évaluée par 24 h était de



---

4,1 ± 0,4 h dans la première étape (6 à 8 jours) et 4,6 ± 0,4 h dans la seconde (une vingtaine de jours). Le sommeil polyphasique a variée selon un schéma circadien normal, c'est-à-dire que la propension au sommeil était la plus élevée en milieu de nuit, avec un pic secondaire en milieu d'après-midi. D'importantes déficiences fonctionnelles ont été rapportées pendant toute la course. La vitesse à laquelle se sont produites les déficiences fonctionnelles était plus grande lors de la première étape par rapport à la seconde étape de la course (plus longue). La nature des déficiences enregistrées est compatible avec les conséquences typiques de la perte de sommeil. Dans un deuxième temps, des enregistrements polysomnographiques réalisés au domicile des marins, ainsi que ceux réalisés durant les 24 heures suivant l'arrivée d'une course, suggèrent également que les marins en solitaire sont soumis aux mêmes principes de régulation et de rythme de sommeil que l'individu adulte sain. Les variables de quantité de sommeil et de fatigue étant largement différentes entre vie à terre et compétition en mer, nous avons retenu ces sujets comme population expérimentale.

Dans une deuxième étape, nous avons développé le logiciel Scextan® et nous avons comparé l'enregistrement des variables de sommeil obtenu par Scextan® avec la mesure actimétrique et la mesure subjective par agenda de sommeil. Dans cette étude, 48 adultes sains répartis en deux groupes ont accepté d'enregistrer les données de leur sommeil pendant 6 à 7 jours. Les participants portaient un actimètre au poignet non dominant et ont utilisé l'application Scextan®. Pour chaque époque d'une minute, l'algorithme de Sadeh a été utilisé pour scorer les enregistrements issus de l'actimètre. Dix-neuf participants ont également fourni des données à partir d'un agenda de sommeil manuscrit à intervalles de 15 minutes. Le temps de sommeil total, les réveils après endormissement, l'efficacité du sommeil et la latence d'endormissement ont été calculées. Les analyses statistiques ont révélé une meilleure corrélation et un meilleur agrément (en utilisant la méthode de Bland et Altman) entre l'actimètre et Scextan® qu'entre l'actimètre et l'agenda de sommeil manuscrit. Toutefois, les coefficients de corrélation et les agréments sont faibles en ce qui concerne les éveils nocturnes. Nous avons conclu que l'agenda de sommeil électronique Scex-

tan® est une méthode valable pour mesurer les temps de sommeil chez les sujets sains et qu'il est également plus précis qu'un agenda de sommeil manuscrit. Même si les évaluations subjectives doivent être complétées par l'utilisation d'un accéléromètre pour détecter les éveils au cours du sommeil, l'agenda électronique installé sur un appareil de poche (de type smartphone par exemple) pourrait offrir plus de facilités éducatives que l'agenda de sommeil manuscrit, qui est de plus moins précis.

Nous avons ensuite évalué la pertinence de l'implémentation d'un modèle prédictif de performances dans Scextan®. Le but de l'étude était de mesurer la fatigue psychomotrice en course en solitaire à la voile et de la comparer avec un modèle mathématique de prédiction de performance. 16 marins de haut niveau ont accepté de participer à l'étude pendant deux de leurs courses (36h et 50h). Leur sommeil a été enregistré par agenda de sommeil électronique et par actimétrie, et leur fatigue par temps de réaction simple (SRT 5 minutes). La vitesse du vent, sa variabilité et le cap du bateau ont été également enregistrés dans le but de faire entrer ces données dans la prédiction en tant que charge de travail dynamique. Le modèle de prédiction de McCauley et al. (2009) a été appliqué au pattern veille/sommeil de chaque marin. Le modèle a expliqué 67 % de la variance des SRT, mais les relevés de vent et cap utilisés dans un calcul de régression mixte comme covariables linéaires et quadratiques des résidus de la prédiction n'ont pas constitué d'amélioration significative ( $P > 0.27$ ). Cependant, le temps de course entré en covariable (linéaire et quadratique) a significativement expliqué la variance du résidu de la prédiction ( $P=0.02$ ). En fin de course, les marins ont eu des SRT significativement plus long ( $P=0.02$ ) mais présentent moins de défaillances (Lapses) que le nombre prévu par le modèle. Les marins sont donc moins fatigués en fin de course que ne le prévoit le modèle mathématique. Ceci peut suggérer que des temps de sommeil n'ont pas été enregistrés, mais nous n'écartons pas la probabilité que l'introduction dans le modèle de McCauley et al. (2009) d'un composant spécifique aux courses à la voile en améliorerait la précision.

Dans un dernier temps, Scextan® a été proposé aux skippers de l'édition 2010 de la course transatlantique « Route du Rhum », dans une version ne prenant pas

en compte le modèle de prédiction en raison du délai d'implantation, mais associé à une démarche éducative ponctuelle standardisée de la gestion du sommeil.. Seul le vainqueur de la course a utilisé de façon quasi systématique le logiciel Scextan® pour gérer et anticiper rationnellement son état de forme. Les autres individus ont présenté des progressions variables mais prometteuses qui sont à approfondir.

L'ensemble de ce travail de thèse, portant sur deux transatlantiques et 4 courses du type « La Solitaire du Figaro », a montré que ces sportifs (plus de 70 au total) constituaient une population expérimentale de qualité pour l'étude du sommeil, des rythmes et de la fatigue, et ce malgré les difficultés techniques et méthodologiques rencontrées et inhérentes au milieu et à la pratique.

L'agenda de Sommeil Interactif Scextan® est toujours en cours de développement, mais a déjà montré qu'il pouvait être un outil de recherche à part entière, et qu'il tendrait rapidement à devenir un outil pédagogique individuel. Une étude de preuve de concept à grande échelle en milieu professionnel est programmée.

# Abstract of our work

Many researchers have sought to observe, evaluate and demonstrate the impact of a lack of sleep on health, safety and productivity. In recent years, work has focused on individual factors in sensitivity to a lack of sleep. Fatigue management programmes exist in some professional settings but few are based on dedicated, individualized sleep management tools.

The goal of this thesis was to develop an individual fatigue management tool that could be used for educational and training purposes. The tool (called Scextan®) was designed as a software application. We decided to develop this application as a new tool for studying and evaluating circadian rhythms under "real life" conditions. The health education process associated with this software application is based on (i) the real-time entry of periods of wakefulness and sleep and (ii) a graphic log of these periods. The system is coupled to a mathematical model that predicts the performance level as a function of the previously entered periods of wakefulness and sleep. The objective is to enable the user to plan his/her periods of activity and rest by taking into account not only individual characteristics and workloads but also environmental conditions.

The development of this system involved several research and validation steps.

The first section of this thesis reviews the literature on sleep and on fatigue management. We also reviewed the strengths and weaknesses of the techniques and tools used to measure sleep- and wakefulness-related parameters. We then describe the effects and consequences of a lack of sleep. Next, we highlight currently available mathematical methods for predicting the state of neurobehavioural fatigue and the

main countermeasures for a lack of sleep (notably from a behavioural and educational standpoint). We specifically focus on the particular features of single-handed sailors, who have to manage severe sleep deprivation for several days and under challenging but known environmental conditions.

The second section of this thesis describes original research work. We first describe the behavioural patterns of this novel study population on land and at sea. In fact, single-handed ocean racing is a severe test for these sailors, who have to maintain round-the-clock cognitive activity for periods ranging from several days to several months. The fatigue induced by a lack of sleep, a high workload and (in some cases) a circadian phase shift is a threat to the sailors' health and safety. Very little research has been performed on this subject and the little that has been performed is rather dated. This is partly because it is very difficult to collect reliable data on sleep and performance levels during single-handed ocean races.

Our first research project involved two behavioural investigations in our study population. In the first study, we recorded the amounts of sleep and functional impairments in 16 sailors during a two-leg transatlantic race. In the second study, we analyzed 12 sailors' sleep patterns on land before and after a race. During the transatlantic race, each sailor recorded his/her sleep periods and the functional impairments that he/she experienced. The self-rated duration of sleep per 24 hr period was  $4.1 \pm 0.4$  hr in the first leg (which lasted 6 to 8 days) and  $4.6 \pm 0.4$  hr in the second leg (which lasted around 20 days). Multiphase sleep varied according to a normal circadian pattern; sailors were more likely to sleep in the middle of the night, with a second peak in the mid-afternoon. Significant functional impairments were reported throughout the race. The time to onset of functional impairment was longer in the first leg than in the second leg. The type of impairment noted matched the typical consequences of a lack of sleep. The polysomnographic recordings made on land before the race and within 24 hours of the end of the race also suggested that single-handed sailors are subject to the same principles of regulation and sleep rhythms as other healthy adults. Given that the sleep and fatigue parameters on land and at sea

---

differed significantly, we choose these subjects as our test population.

In a second step, we developed the Scextan® software application and compared the sleep records thus obtained with actimetric measurements and the subjective values entered in a paper-based sleep diary. The study featured 48 healthy adults having agreed to record their sleep data for 6 or 7 days. The participants wore an actimeter on the wrist of their non-dominant hand and used the Scextan® application. For each one-minute epoch, a Sadeh algorithm was used to score the actimeter recordings. Nineteen participants also entered data in a paper sleep diary every 15 minutes. The total sleep time, periods of night-time wakefulness, sleep efficiency and sleep latency were calculated. Statistical analyses revealed a better correlation and better agreement (according to the Bland and Altman method) between the actimeter and Scextan® than between the actimeter and the sleep diary. However, the correlation coefficients and degree of agreement were weak for night-time wakefulness. We concluded that (i) the Scextan® computerized sleep diary is a valid method for measuring sleep times in healthy subjects and (ii) it is more accurate than a paper sleep diary. Even though subjective evaluations must be complemented by the use of an actimeter to detect wakefulness during sleep periods, a computerized diary on a handheld device (a smartphone, for example) may offer greater educational and training potential than a paper-based sleep diary.

We then evaluated the value of equipping Scextan® with a performance prediction module. The study objective was to measure psychomotor fatigue in single-handed ocean race and compare the results with a mathematical model for predicting performance. Sixteen top-level sailors agree to participate in the study during two races (lasting 36 hr and 50 hr, respectively). Sleep was recorded in Scextan® and by actimetry. Fatigue was recorded in terms of a simple reaction time (SRT, 5 minutes). The wind speed, wind variability and boat's heading were also recorded, in order to predict the sailor's dynamic workload. The predictive model developed by McCauley et al. (2009) was applied to each sailor's wake/sleep patterns. The model accounted for 67% of the variance in the SRT but the wind and heading measure-

ments (used in a mixed regression model as linear and quadratic covariables of the prediction's residuals) did not significantly improve the results ( $p > 0.27$ ). However, race duration did indeed explain the variance in the prediction's residuals to a significant extent when included as linear and quadratic covariables ( $p=0.02$ ). At the end of the race, the sailors had a significantly longer SRT ( $p=0.02$ ) but presented fewer lapses than predicted by the model. Hence, the sailors were less tired at the end of the race than predicted by the mathematical model. Although this may mean that some sleep periods were not recorded, the incorporation of a specific ocean racing module in McCauley et al.'s model may well improve its accuracy.

Most recently, skippers in the 2010 "Route du Rhum" single-handed transatlantic race were offered use of a version of Scextan® that (due to time constraints) lacked the predictive model but did feature an on-demand, standardized educational approach to sleep management. The race winner was the only sailor to use the Scextan® software intensively to manage and rationally anticipate his state of alertness. The other individuals displayed variable but promising improvements, which need to be studied in more detail.

The thesis work on two transatlantic races and four races like the "Solitaire du Figaro" has shown that despite the inherent technical and methodological difficulties encountered at sea, these sportspeople (over 70 in all) constitute a high-quality test population for studying sleep, rhythms and fatigue.

Although the Scextan® Interactive Sleep Diary is still being improved, it has already proved itself to be a valuable research tool and is on the way to becoming an individual training and teaching tool. A large-scale proof of concept study is being planned.

# Table des matières

|  |              |
|--|--------------|
| <b>Table des matières</b>                            | <b>xvi</b>   |
| <b>Liste des tableaux</b>                            | <b>xxiii</b> |
| <b>Table des figures</b>                             | <b>xxiv</b>  |
| <b>Introduction Générale</b>                         | <b>1</b>     |
| <br>   |              |
| <b>I Revue de la Littérature</b>                     | <b>5</b>     |
| <br>   |              |
| <b>1 Le Sommeil : généralités</b>                    | <b>6</b>     |
| 1.1 Données épidémiologiques . . . . .               | 6            |
| 1.1.1 Le sommeil en fonction du genre . . . . .      | 6            |
| 1.1.2 Le sommeil en fonction de l'âge . . . . .      | 7            |
| Les adolescents . . . . .                            | 7            |
| Les adultes entrés dans la vie active . . . . .      | 8            |
| Le Sommeil des plus de 50 ans . . . . .              | 9            |
| 1.2 L'architecture du sommeil . . . . .              | 9            |
| 1.2.1 Hypnogramme de l'adulte jeune . . . . .        | 10           |
| 1.2.2 Enregistrement polygraphique d'éveil . . . . . | 11           |
| 1.2.3 Stade N1 . . . . .                             | 11           |
| 1.2.4 Stade N2 . . . . .                             | 12           |
| 1.2.5 Stade N3 . . . . .                             | 12           |
| 1.2.6 Le Sommeil Paradoxal . . . . .                 | 13           |
| 1.3 Régulation de la veille et du sommeil . . . . .  | 14           |
| 1.3.1 Le processus Homéostatique . . . . .           | 15           |
| 1.3.2 Le processus Circadien . . . . .               | 16           |
| 1.3.3 Le processus Ultradien . . . . .               | 17           |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 1.3.4    | L'inertie hypnique . . . . .   | 17        |
| 1.3.5    | Fonctions du sommeil . . . . .   | 18        |
| 1.4      | Conclusion . . . . .   | 19        |
| <b>2</b> | <b>Exploration de l'éveil, du sommeil et des performances</b>                          | <b>20</b> |
| 2.1      | Explorations du rythme veille sommeil par mesure objective . . . . .                   | 20        |
| 2.1.1    | La Polysomnographie . . . . .  | 20        |
|          | Electroencéphalogramme(EEG) . . . . .  | 21        |
|          | L'Electro-occulogramme (EOG) . . . . .   | 22        |
|          | L'Electromyogramme (EMG) . . . . .   | 22        |
|          | L' Electrocardiogramme (ECG) . . . . .   | 23        |
|          | Mesure des Flux Respiratoires . . . . .  | 23        |
| 2.1.2    | L'Actimétrie . . . . .   | 24        |
| 2.2      | Explorations du rythme veille sommeil par mesure subjective . . . . .                  | 31        |
| 2.2.1    | L'Agenda de Sommeil . . . . .  | 31        |
| 2.2.2    | Les Questionnaires d'évaluation des habitudes de sommeil et du<br>chronotype . . . . . | 31        |
|          | Questionnaire de Horne et Otsberg . . . . .  | 31        |
|          | Questionnaire de Pittsburg . . . . .   | 32        |
|          | Questionnaire de Spiegel . . . . .   | 33        |
|          | Questionnaire " St Mary's Hospital" . . . . .  | 33        |
|          | Autres Questionnaires . . . . .  | 33        |
| 2.3      | Investigations de la somnolence . . . . .  | 33        |
| 2.3.1    | Multiple Sleep Latency Test (MSLT) . . . . .   | 34        |
| 2.3.2    | Maintenance of Wakefulness Test (MWT) . . . . .  | 34        |
| 2.3.3    | Mesures basées sur un changement d'état physiologique . . . . .                        | 34        |
| 2.3.4    | Mesures "embarquées" . . . . .   | 35        |
| 2.3.5    | Mesures spécifiques de tâches par simulateurs . . . . .                                | 35        |
| 2.3.6    | Tests subjectifs par questionnaires et échelles . . . . .                              | 35        |
|          | L'Echelle de Somnolence d'Epworth (ESS) . . . . .                                      | 35        |
|          | L'Echelle de somnolence de Stanford (SSS) . . . . .                                    | 36        |
|          | L'Echelle de somnolence de Karolinska (KSS) . . . . .                                  | 36        |
|          | L'Echelle Visuelle Analogique (EVA) . . . . .  | 36        |
| 2.4      | Investigations des fonctions exécutives . . . . .                                      | 37        |
| 2.4.1    | Gamme de tests . . . . .   | 37        |
|          | Classification . . . . .   | 37        |
|          | Les tests les plus utilisés . . . . .  | 38        |
|          | Le Psychomotor Vigilance Task (PVT) . . . . .  | 38        |
|          | Les tests de temps de réaction de choix . . . . .                                      | 38        |
|          | Tâche de Stroop . . . . .  | 38        |
|          | Tour de Hanoï . . . . .  | 38        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.4.2    | Sensibilité des tests, effet d'apprentissage et fiabilité des tests . .               | 39        |
| 2.4.3    | Faisabilité pour les études de terrain . . . . .                                      | 39        |
| 2.5      | Conclusion . . . . .  | 40        |
| <b>3</b> | <b>La privation de sommeil : nature et effets</b>                                     | <b>42</b> |
| 3.1      | Introduction . . . . .  | 42        |
| 3.2      | La privation totale de sommeil . . . . .  | 43        |
| 3.3      | La restriction chronique de sommeil . . . . .   | 44        |
| 3.4      | Effet du manque de sommeil . . . . .  | 44        |
| 3.4.1    | Sur l'architecture du sommeil . . . . .   | 44        |
|          | Au cours de la restriction . . . . .  | 44        |
|          | Pendant la récupération . . . . .   | 45        |
| 3.4.2    | Sur les fonctions neuro-comportementales . . . . .                                    | 45        |
| 3.4.3    | Comparaison de la fatigue subjective et de la fatigue objective .                     | 48        |
| 3.4.4    | Sur les capacités à l'exercice physique . . . . .                                     | 49        |
| 3.4.5    | Perception de la fatigue à l'effort . . . . .   | 51        |
| 3.5      | Risques pour la santé . . . . .   | 51        |
| 3.5.1    | Les troubles du métabolisme énergétique . . . . .                                     | 51        |
| 3.5.2    | L'hypertension artérielle . . . . .   | 53        |
| 3.5.3    | Conséquences psychologiques . . . . .   | 53        |
| 3.5.4    | Phénomènes hallucinatoires . . . . .  | 53        |
| 3.6      | Risques pour la sécurité en milieux professionnels . . . . .                          | 54        |
| 3.6.1    | Les accidents de la route . . . . .   | 54        |
| 3.6.2    | Travail posté et centres hospitaliers . . . . .                                       | 55        |
| 3.6.3    | Le milieu maritime . . . . .  | 55        |
| 3.6.4    | L'aviation . . . . .  | 56        |
| 3.7      | Différences inter-individuelles face à la restriction de sommeil . . . .              | 57        |
| 3.8      | Conclusion . . . . .  | 58        |
| <b>4</b> | <b>Prédiction des performances au cours d'un déficit de sommeil</b>                   | <b>59</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .  | 59        |
| 4.2      | Le Two-Process Model (TPM) . . . . .  | 60        |
| 4.3      | Le "QinetiQ alertness model" (SAFE : System for Aircrew Fatigue Evaluation) . . . . . | 60        |
| 4.4      | Le "Interactive Neurobehavioral Model" . . . . .                                      | 61        |
| 4.5      | Le modèle "Sleep, Activity, Fatigue, and Task Effectiveness" (SAFTE) . .              | 61        |
| 4.6      | Le modèle "Fatigue Audit Inter Dyne" (FAID) . . . . .                                 | 62        |
| 4.7      | Le modèle "Circadian Alertness Simulator" (CAS) . . . . .                             | 63        |
| 4.8      | Le modèle "Sleep/Wake Predictor" (SWP) . . . . .                                      | 63        |
| 4.9      | Le modèle "ALERT" . . . . .   | 64        |
| 4.10     | Modèle de "l'Université de Spokane" . . . . .   | 64        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.11      | Sélection d'un modèle pour une application de terrain . . . . .         | 67        |
| 4.12      | Conclusion . . . . .  | 67        |
| <b>5</b>  | <b>Les contre-mesures à la privation de sommeil</b>                     | <b>68</b> |
| 5.1       | Management de la fatigue par l'utilisation de siestes courtes . . . . . | 68        |
| 5.2       | L'Education au sommeil . . . . .  | 69        |
| 5.2.1     | Actions et programmes éducatifs . . . . .                               | 70        |
| 5.2.2     | Le modèle éducatif de la NASA . . . . .                                 | 71        |
| 5.2.3     | Approche individuelle . . . . .   | 72        |
| 5.2.4     | Actions éducatives accompagnées par des outils d'analyse . . .          | 73        |
| 5.2.5     | Les coachs virtuels . . . . .   | 74        |
|           | Le Système Zeo® . . . . .   | 74        |
|           | La montre Vivago® . . . . .   | 75        |
| 5.2.6     | Des outils de gestion non validés . . . . .                             | 75        |
|           | Agendas de sommeil via internet . . . . .                               | 75        |
|           | Les applications pour smartphone . . . . .                              | 76        |
| 5.3       | Conclusion . . . . .  | 77        |
| <b>6</b>  | <b>La navigation en solitaire et la privation de sommeil</b>            | <b>78</b> |
| 6.1       | Importance de la gestion de la fatigue en course au large . . . . .     | 78        |
| 6.2       | L'Étude polysomnographique du sommeil des marins en course . . . .      | 79        |
| 6.3       | L'étude polysomnographique du sommeil des marins en entraînement        | 80        |
| 6.4       | Le sommeil des navigateurs en solitaire en course de longue durée . .   | 81        |
| 6.5       | Déficiences dues au manque de sommeil . . . . .                         | 82        |
| 6.6       | Des pistes éducatives de gestion de la fatigue . . . . .                | 82        |
| 6.7       | Conclusion . . . . .  | 83        |
| <b>II</b> | <b>Contribution Personnelle</b>   | <b>84</b> |
|           | <b>Introduction</b>   | <b>85</b> |
| <b>7</b>  | <b>Validation de notre population expérimentale</b>                     | <b>87</b> |
| 7.1       | Sommeil et course au large . . . . .                                    | 87        |
| 7.1.1     | Introduction . . . . .  | 87        |
| 7.1.2     | Matériel et Méthode . . . . .   | 89        |
|           | Sujets . . . . .  | 90        |
|           | Agenda et Interview . . . . .   | 91        |
|           | Traitement des Données . . . . .  | 91        |
|           | Analyse Statistique . . . . .   | 93        |
| 7.1.3     | Résultats . . . . .   | 93        |
| 7.1.4     | Discussion . . . . .  | 96        |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 7.2      | Le Sommeil des Marins à Terre . . . . .                              | 101        |
| 7.2.1    | Introduction . . . . .   | 101        |
| 7.2.2    | Matériel et Méthode . . . . .  | 102        |
|          | Procédure . . . . .  | 102        |
|          | Sujets . . . . .   | 102        |
|          | Description des deux courses étudiées . . . . .                      | 103        |
|          | Mesures réalisées . . . . .  | 103        |
|          | Variables étudiées . . . . .   | 103        |
|          | Mesures pendant la course . . . . .                                  | 104        |
|          | Analyses statistiques . . . . .                                      | 104        |
| 7.2.3    | Résultats . . . . .  | 104        |
| 7.2.4    | Discussion . . . . .   | 106        |
| 7.3      | Conclusion . . . . .   | 108        |
| <b>8</b> | <b>Validation d'un Agenda de Sommeil Électronique, le Scextan®</b>   | <b>109</b> |
| 8.1      | Introduction . . . . .   | 109        |
| 8.2      | Matériel et Méthode . . . . .  | 111        |
|          | 8.2.1 Procédure . . . . .  | 111        |
|          | 8.2.2 Participants . . . . .   | 112        |
|          | 8.2.3 Mesure Actigraphique . . . . .                                 | 112        |
|          | 8.2.4 Agenda de sommeil manuscrit . . . . .                          | 113        |
|          | 8.2.5 L'application Scextan® . . . . .                               | 113        |
|          | 8.2.6 Analyse statistique . . . . .                                  | 114        |
| 8.3      | Résultats . . . . .  | 115        |
| 8.4      | Discussion . . . . .   | 122        |
| 8.5      | Conclusion . . . . .   | 124        |
| <b>9</b> | <b>Prediction de fatigue</b>   | <b>125</b> |
| 9.1      | Introduction . . . . .   | 125        |
| 9.2      | Matériel et méthodes . . . . .                                       | 127        |
|          | 9.2.1 Design de l'étude . . . . .                                    | 127        |
|          | 9.2.2 Participants . . . . .   | 128        |
|          | 9.2.3 Mesure du sommeil par Actimètre . . . . .                      | 128        |
|          | 9.2.4 Mesure du sommeil par Agenda de Sommeil Electronique . . . . . | 128        |
|          | 9.2.5 Mesure de performances . . . . .                               | 129        |
|          | 9.2.6 Mesure des variables environnementales . . . . .               | 130        |
|          | 9.2.7 Modèle de prédiction de fatigue . . . . .                      | 130        |
|          | 9.2.8 Analyse statistique . . . . .                                  | 130        |
| 9.3      | Résultats . . . . .  | 131        |
| 9.4      | Discussion . . . . .   | 134        |
| 9.5      | Conclusion . . . . .   | 136        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>10</b>  | <b>Expérience éducative</b>                                    | <b>137</b> |
| 10.1       | Introduction . . . . .   | 137        |
| 10.2       | Matériel et méthode . . . . .                                  | 139        |
| 10.2.1     | Procédure . . . . .  | 139        |
| 10.2.2     | Sujets . . . . .   | 140        |
| 10.2.3     | Cadre Théorique de gestion de la Fatigue . . . . .             | 141        |
| 10.2.4     | Questionnaire sur la gestion de la fatigue en course . . . . . | 143        |
| 10.2.5     | La démarche éducative individuelle . . . . .                   | 143        |
| 10.2.6     | Logiciel de gestion du sommeil SCEXTAN® pendant la traversée   | 143        |
| 10.2.7     | L'entretien d'explication à l'arrivée . . . . .                | 144        |
| 10.2.8     | Indice de Gestion de Fatigue . . . . .                         | 145        |
| 10.2.9     | Analyse statistique . . . . .                                  | 145        |
| 10.3       | Résultats . . . . .  | 146        |
| 10.4       | Discussion . . . . .   | 150        |
| 10.5       | Conclusion . . . . .   | 152        |
| <b>11</b>  | <b>Conclusion et Perspectives</b>                              | <b>153</b> |
| 11.1       | Conclusion . . . . .   | 153        |
| 11.2       | Perspectives . . . . .   | 156        |
| <b>III</b> | <b>Bibliographie</b>   | <b>159</b> |
|            | <b>Annexes</b>   | <b>187</b> |
| <b>A</b>   | <b>Scextan®</b>  | <b>A-1</b> |
| A.1        | Scextan® mode <i>Terre</i> - organigramme . . . . .            | A-1        |
| A.2        | Scextan® mode <i>Terre</i> - captures d'écran . . . . .        | A-1        |
| A.3        | Scextan® mode <i>Mer</i> - organigramme . . . . .              | A-1        |
| A.4        | Scextan® mode <i>Mer</i> - capture d'écran . . . . .           | A-1        |
| A.5        | Scextan® mode <i>Mer</i> - rapport PDF . . . . .               | A-1        |
| A.6        | Scextan® dans sa future version . . . . .                      | A-1        |
| <b>B</b>   | <b>L'agenda de sommeil du Réseau Morphée</b>                   | <b>B-1</b> |
| <b>C</b>   | <b>Parcours de courses</b>                                     | <b>C-1</b> |
| C.1        | Parcours de la course Select 650 . . . . .                     | C-1        |
| C.2        | Parcours de la course Solo Ports de France . . . . .           | C-1        |
| C.3        | Parcours de la course Solo Massif Marine . . . . .             | C-1        |
| C.4        | Parcours de la course Transat 650 . . . . .                    | C-1        |
| C.5        | Parcours de la course Route du Rhum . . . . .                  | C-1        |

|   |             |
|---|-------------|
| <b>D Les Bateaux</b>  | <b>D-1</b>  |
| D.1 Le Figaro Bénéteau . . . . .  | D-1         |
| D.2 Le mini 650 . . . . .   | D-1         |
| D.3 Monocoques et Multicoques . . . . .   | D-1         |
| <b>E Questionnaire Route du Rhum 2010</b>   | <b>E-1</b>  |
| <b>F Agenda de Sommeil Transat 650</b>  | <b>F-1</b>  |
| <b>G Productions scientifiques</b>  | <b>G-1</b>  |
| Publications : . . . . .  | G-1         |
| Brevets et Protections : . . . . .  | G-2         |
| Communications orales : . . . . .   | G-2         |
| Communications affichées : . . . . .  | G-2         |
| Articles soumis : . . . . .   | G-3         |
| Vulgarisation : . . . . .   | G-4         |
| Prix, bourses et contrats de recherche : . . . . .  | G-4         |
| L'agenda de sommeil interactif comme outil individuel de<br>management de la fatigue . . . . .    | quatrième-1 |
| Development Of An Interactive Sleep Diary As An Indivi-<br>dual Fatigue Management Tool . . . . . | quatrième-1 |

# Liste des tableaux

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Appareils d'Enregistrement Polysomnographique Ambulatoires . . . . .                                      | 29  |
| 2.2 | Caractéristiques des actigraphes les plus répandus sur le marché. . . . .                                 | 30  |
| 2.3 | Liste (non exhaustive) de tests existant pour réaliser l'exploration de<br>fonctions exécutives . . . . . | 37  |
| 7.1 | Troubles fonctionnels . . . . .   | 96  |
| 7.2 | Caractéristiques du Sommeil à terre . . . . .   | 105 |
| 7.3 | Repos pris en mer . . . . .   | 105 |
| 7.4 | Sommeil de récupération . . . . .   | 106 |
| 8.1 | Caractéristiques des participants de l'étude . . . . .  | 115 |
| 8.2 | Vue générale des moyennes . . . . .   | 117 |
| 8.3 | Tableau des corrélations . . . . .  | 118 |
| 8.4 | Tableau des agréments . . . . .   | 118 |

# Table des figures

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Hypnogramme de 1960 . . . . .  | 10 |
| 1.2  | Hypnogramme de l'adulte jeune . . . . .                                      | 10 |
| 1.3  | Enregistrement EEG d'un éveil . . . . .                                      | 11 |
| 1.4  | Enregistrement EEG du stade N1 . . . . .                                     | 12 |
| 1.5  | Enregistrement EEG du stade N2 . . . . .                                     | 13 |
| 1.6  | Enregistrement EEG du stade N3 . . . . .                                     | 13 |
| 1.7  | Enregistrement EEG du Sommeil Paradoxal . . . . .                            | 14 |
| 1.8  | Régulation du Sommeil à 2 processus . . . . .                                | 15 |
| 1.9  | Action conjointe des 2 processus . . . . .                                   | 16 |
| 1.10 | Le processus Ultradien . . . . .   | 17 |
| 1.11 | Les Portes du Sommeil . . . . .  | 18 |
| 1.12 | Le Processus d'Inertie Hypnique . . . . .                                    | 19 |
| 2.1  | Système International 10-20 . . . . .  | 22 |
| 2.2  | Electrodes pour EEG . . . . .  | 23 |
| 2.3  | EOG et EMG . . . . .   | 24 |
| 2.4  | Photographie Polysomnographie . . . . .                                      | 25 |
| 2.5  | Photographie d'un Actimètre . . . . .  | 26 |
| 2.6  | Actogramme de plusieurs nuits . . . . .                                      | 27 |
| 2.7  | Agenda de Sommeil . . . . .  | 32 |
| 2.8  | Sensibilité des tests de mesure de la Fatigue . . . . .                      | 40 |
| 3.1  | Instabilité de l'éveil au cours d'une privation de sommeil . . . . .         | 46 |
| 3.2  | Dose-réponse à la restriction de sommeil . . . . .                           | 47 |
| 3.3  | Evolution de la fatigue Objective et subjective . . . . .                    | 49 |
| 3.4  | Relation entre le temps de sommeil et l'Indice de masse Corporelle . . . . . | 52 |
| 3.5  | Vulnérabilité Inter-Individuelle à la privation de sommeil . . . . .         | 58 |
| 4.1  | Prédiction par du modèle SAFTE . . . . .                                     | 62 |



---

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.2  | Modèle de Prédiction de McCauley 2009 . . . . .                         | 65  |
| 7.1  | Parcours de la Transat 650 . . . . .                                    | 90  |
| 7.2  | Agenda de Sommeil Transat 650 . . . . .                                 | 92  |
| 7.3  | Temps de sommeil quotidien - Transat 650 . . . . .                      | 94  |
| 7.4  | Propension de sommeil - Transat 650 . . . . .                           | 95  |
| 7.5  | Deficiences - Transat 650 . . . . .                                     | 97  |
| 8.1  | Corrélation entre ACT, ASE et ASM . . . . .                             | 119 |
| 8.2  | Agrément avec la moyenne des nuits par sujet . . . . .                  | 120 |
| 8.3  | Agrément avec le détail de toutes les nuits . . . . .                   | 121 |
| 9.1  | Mesure actimétrique en mer . . . . .                                    | 131 |
| 9.2  | Distribution des siestes . . . . .                                      | 132 |
| 9.3  | Confrontation du modèle prédictif et des mesures . . . . .              | 133 |
| 10.1 | Protocole de l'étude Route du Rhum 2010 . . . . .                       | 140 |
| 10.2 | Résultats . . . . .   | 146 |
| 10.3 | Sommeil du vainqueur . . . . .  | 148 |
| 11.1 | Modèle d'intervention . . . . .   | 155 |
| 11.2 | Régulation de la fatigue . . . . .                                      | 157 |
| A.1  | Organigramme fonctionnel du mode Terre de Scextan . . . . .             | A-2 |
| A.2  | Capture écran terre . . . . .   | A-3 |
| A.3  | Organigramme fonctionnel du mode Mer de Scextan . . . . .               | A-4 |
| A.4  | Capture écran mer . . . . .   | A-5 |
| A.5  | Capture écran rapport . . . . .   | A-6 |
| A.6  | Organigramme fonctionnel de Scextan dans sa prochaine version . . . . . | A-7 |
| B.1  | Agenda de Sommeil du Réseau Morphée . . . . .                           | B-1 |
| C.1  | Parcours de la course Select 650 . . . . .                              | C-2 |
| C.2  | Parcours de la course Solo Ports de France . . . . .                    | C-3 |
| C.3  | Parcours de la course Solo Massif Marine . . . . .                      | C-4 |
| C.4  | Parcours de la course Transat 650 . . . . .                             | C-5 |
| C.5  | Parcours de la course Route du Rhum . . . . .                           | C-6 |
| D.1  | Le Figaro Bénéteau . . . . .  | D-2 |
| D.2  | Le Mini 650 . . . . .   | D-3 |
| F.1  | Agenda de sommeil Transat 650 . . . . .                                 | F-1 |

# Introduction Générale

Il existe un consensus scientifique pour affirmer que le sommeil est un état inconscient indispensable à la vie et auquel, chaque jour, l'être humain consacre approximativement 8 heures sur 24, soit *in fine*, environ un tiers de sa vie. Ce constat suggère que le sommeil possède une fonction physiologique importante et donc qu'un manque de sommeil ou une altération de celui-ci amèneront à des modifications plus ou moins profondes de son architecture et auront des conséquences physiologiques importantes, notamment sur l'éveil.

Plusieurs faits récents peuvent illustrer ce propos :

- En avril 2010, un cargo chinois transportant du charbon s'est échoué dans la région de la Grande Barrière de corail Australienne. Le *Shen Neng*, par son naufrage, cause une des plus importantes catastrophes écologiques du pays. L'Australian Transport Safety Bureau (ATSB) a remis très récemment son rapport d'enquête ; il attribue la principale cause du naufrage à la fatigue du capitaine et du second du navire. En effet, le capitaine n'avait dormi que deux heures et demie au cours des deux jours précédant l'accident. Le commissaire en chef de l'ATSB, M. Dolan, indique dans ses conclusions que le navire ne disposait pas d'un système de gestion efficace de fatigue mis en place pour s'assurer que le personnel de quart à la passerelle était apte à assurer la veille et le bon déroulement de la navigation (un homme de quart est chargé de conduire le navire). M. Dolan ajoute également que : « La fatigue est l'un des risques pour la sécurité face à des gens de mer, et de quart en particulier. L'incapacité à gérer la fatigue peut entraîner la perte de vies humaines, des dommages aux biens et des dommages à l'environnement ».
- La catastrophe de Tchernobyl a eu lieu à 1h 23 du matin ;
- La fusion accidentelle du réacteur nucléaire de Three Mile Island en 1979 à 4

heures du matin ;

- L'explosion de l'usine de pesticides de Bophal en 1984, tuant officiellement 3500 personnes, est survenue à 00h30 ;
- L'échouage de l'Exxon Valdez en 1989 en Alaska eu lieu à minuit.

La fatigue humaine a été impliquée dans toutes ces catastrophes. Mais il ne faut pas oublier que des accidents, moins médiatiques (ou sur une autre échelle de gravité), attribuables directement ou indirectement à la fatigue, surviennent régulièrement, dans les milieux professionnels comme dans le cadre domestique.

En général, la littérature scientifique observe que les symptômes de la privation de sommeil concernent souvent l'humeur, les fonctions mnésiques, cognitives, exécutives et le contrôle moteur. Parallèlement à ces effets centraux, la restriction de sommeil influence aussi des fonctions telles que le métabolisme énergétique, les systèmes endocriniens et immunologiques. La privation de sommeil entraîne ainsi des changements complexes dans de nombreuses fonctions du corps humain, mais la fonction exacte et exhaustive du sommeil est toujours le sujet d'un débat intense dans les sciences.

En terme de santé publique cette fois, le rapport ministériel «Giordanella» de 2006 a mis l'accent sur la nécessité de prendre correctement en compte le sommeil comme un facteur de bonne santé et de sécurité. Ce rapport, alimenté par les enquêtes menées par plusieurs centres de recherche français, a exposé un large éventail de pathologies associées à des perturbations de la veille et du sommeil. Ce travail, comme celui de l'INPES<sup>1</sup> présenté en 2008, font le constat d'une réduction des temps de sommeil dans la population Française. Il semble également désormais acquis que les toutes les populations et tous les âges sont touchés et sont donc potentiellement exposés aux effets délétères, voire dangereux, de cette restriction de sommeil, qu'elle soit aiguë ou chronique.

Ces éléments nous ont amené à porter notre attention sur la manière dont la population pourrait tirer parti d'actions éducatives ciblées ayant pour objectif de limiter le nombre et l'impact d'incidents et d'accidents attribuables à la fatigue.

Il existe, à la disposition du public, de nombreux supports tels que les actions de sensibilisation à l'école, des formations ponctuelles sur les lieux de travail ou des actions plus ciblées sur la conduite routière ou le sommeil des seniors. Toutefois, les

---

1. Institut National de Prévention et d'Education pour la Santé

outils utilisés lors de ces actions de promotion pour la santé plus que d'éducation à la santé sont peu nombreux et souvent détournés de leur utilisation originelle pour des finalités « éducatives » souvent fort différentes des objectifs pour lesquels ils avaient été conçus à l'origine.

C'est pourquoi, tout en reconnaissant leur bienfondé scientifique et technique, nous avons souhaité apporter une contribution innovante à l'éducation à la santé dans le champ du sommeil.

De plus, le mode de vie et de travail contemporain génère souvent, par obligation, des restrictions de sommeil (travail, transports, vie familiale, etc.). C'est donc cet environnement que les programmes éducatifs de management de la fatigue (PEMF) doivent épouser de façon individuelle en imaginant des solutions rationnelles et écologiques, c'est-à-dire prenant en compte la réalité du terrain.

L'objectif de ce travail de thèse est donc de proposer un PEMF innovant comportant à la fois un modèle d'intervention humain et un développement technologique à travers la conception d'un outil spécifiquement dédié.

Notre démarche repose sur un modèle expérimental construit autour de l'observation d'une activité sportive pratiquée dans des conditions extrêmes (navigation en solitaire transocéanique) où l'environnement implique forcément une privation de sommeil.

Ce modèle permettra la réalisation des différentes étapes nécessaires à la construction de notre outil et des processus éducatifs qui lui sont associés. Notre démarche de développement concerne les milieux professionnels où l'attention, la vigilance et la sécurité sont obligatoires et centrales, mais cherchera aussi à être appliqué plus largement en tant que dispositif médical.

La première partie de ce document comportera une revue de la littérature, où nous vous présenterons les principales connaissances sur le sommeil et la gestion de la fatigue. Ensuite, nous éclairerons les techniques et les outils de mesure des variables du sommeil et de l'éveil, puis les effets et conséquences du manque de sommeil seront décrits. Enfin, nous verrons comment il est actuellement possible de prédire un état de fatigue. Nous présenterons les principales contremesures au manque de sommeil, notamment d'un point de vue comportemental et éducatif et nous réaliserons un focus spécifique sur la population et les particularités des navigateurs en solitaire.

Dans la seconde partie de cette thèse, nous présenterons notre contribution personnelle comportant 4 étapes. La méthodologie, les résultats et analyses seront discutés afin de proposer un outil accompagné d'un processus de formation. Les perspectives d'amélioration, leurs voies d'application et leurs limites seront enfin discutées.

**Première partie**

**Revue de la Littérature**

# Le Sommeil : généralités

## 1.1 Données épidémiologiques

Dans ces quinze dernières années, de nombreuses études épidémiologiques ont montré une diminution des temps de sommeil de la population, en France comme dans les pays industrialisés. Une différence entre les besoins et les comportements est évoquée par les auteurs de ces études. En France, depuis 2004, les enquêtes successives de l'Institut National du Sommeil et de la Vigilance (INSV, 2006)<sup>1</sup> montrent, selon des chiffres stables au cours des années, que le sommeil des français est globalement de bonne qualité. Toutefois, ces études identifient des pathologies du sommeil (insomnies, syndrome des jambes sans repos etc...), modifiant la quantité ou la qualité du sommeil et ayant des effets sur la somnolence diurne ainsi que sur la vigilance. Dans cette section, nous souhaitons en résumer les principales études. Il nous a semblé opportun de centrer la majorité de notre propos autour des études réalisées dans l'hexagone.

### 1.1.1 Le sommeil en fonction du genre

Dans une étude de REYNER, HORNE et REYNER (1995) sur 400 sujets (étude déclarative), il a été montré que les femmes se couchaient et s'endormaient plus tôt que les hommes. Le temps de sommeil était nettement plus long pour les femmes, mais

---

1. Institut National du Sommeil et de la Vigilance

elles ont connu plus de réveils nocturnes et un sommeil de moins bonne qualité. En revanche, GOEL, KIM et LAO (2005) dans une étude par l'enregistrement "gold standard" polysomnographique (voir chapitre sur l'exploration du sommeil 2.1.1 page 20) a montré que les femmes avaient une meilleure qualité de sommeil que les hommes, qu'elles s'endormaient plus vite et avaient une meilleure efficacité du sommeil. Le temps de sommeil était plus long mais, à la différence de REYNER, HORNE et al., les femmes se sont moins éveillées que les hommes. KRISHNAN et COLLOP (2006) ont réalisé une méta analyse des effets du genre sur le sommeil. Ils rapportent que dans la littérature, les femmes ont généralement une meilleure qualité du sommeil par rapport aux hommes, avec des temps de sommeil plus longs, une latence d'endormissement plus courte et une meilleure efficacité du sommeil. Malgré cela, les femmes ont plus de plaintes liées au sommeil que les hommes. Toutefois, les auteurs révèlent que les périodes physiologiques comme la puberté, la menstruation, la grossesse et la ménopause, sont associés à des altérations dans les habitudes de sommeil. D'autre part, l'insomnie semble avoir une prédominance féminine, ainsi que d'une manière générale les pathologies du sommeil (Syndrome d'apnées du sommeil et syndrome des jambes sans repos) comme le confirme l'étude de l'INSV (2006) réalisée sur plus de 1000 français.

En résumé, les différences de genre se manifestent largement en ce qui concerne les temps de sommeil et les troubles du sommeil. Par contre, le sommeil semble se modifier avec l'âge chez les hommes comme chez les femmes. Les femmes jeunes semblent avoir un meilleur sommeil que les hommes, mais cette différence semble largement s'atténuer avec l'âge.

### **1.1.2 Le sommeil en fonction de l'âge**

Les enquêtes successives de l'INSV de 2005 à 2011 présentent un état des lieux des quantités de sommeil en fonction de l'âge.

#### **Les adolescents**

L'enquête INSV (2005) confirme que, sur une population de plus de 502 adolescents français ayant entre 15 et 19 ans, il existe une privation de sommeil durant la semaine de 1h17 en moyenne chez 70% de ces adolescents. En effet, alors que le temps



de sommeil déclaré est de 7h24 en moyenne par jour, l'INSV recommande environ 9h de sommeil à cet âge. De ce fait, près de 25% des adolescents interrogés se sentent somnolents au réveil et presque 10% le sont toute la journée, cela correspondant à une somnolence pathologique (évalué par l'échelle de somnolence d'Epworth (voir dans le chapitre sur l'exploration de la somnolence 2.3.6 page 35)). En semaine les adolescents semblent contracter une dette de sommeil qu'ils tentent de récupérer le weekend. Les conséquences directes évoquées du manque de sommeil sur les adolescents sont la baisse de performances en cours, l'irritabilité et une mauvaise évaluation des risques.

### **Les adultes entrés dans la vie active**

Toujours selon l'INSV (2006), 55% des personnes interrogées disent qu'elles dorment moins que leurs besoins. En semaine, la moyenne de sommeil nocturne des français est évaluée à 6h58 (7h07 en moyenne par 24 heures). Toutefois, les personnes interrogées aimeraient dormir 8h24 en moyenne. Comme chez les adolescents, les sujets tentent, le weekend, de « rembourser » la dette de sommeil contractée pendant la semaine (7h50 de sommeil en moyenne). Cette compensation du weekend se fait également par une sieste d'environ une heure pour 26% des interrogés. Pourtant 80% des français dorment dans de bonnes conditions. Néanmoins, 33% des personnes, d'âge adulte interrogées se sentent fatiguées durant la journée et 10% sont fatigués dès le réveil. Les français souffrant de fatigue déclarent ne pas dormir suffisamment et rapportent un manque d'énergie ainsi que des sensations de lourdeurs.

Les personnes dormant moins de 6 heures sont plutôt des hommes de 50 à 65 ans mais également les moins de 24 ans et plutôt les cadres. Les personnes dormant plus de 9 heures sont plutôt des moins de 24 ans, des seniors, des employés ou des inactifs.

Les conditions de travail sont citées comme co-facteurs de fatigue. En effet, 40% estiment que leur rythme de travail perturbe leur rythme de sommeil. Au passage dans la vie active, l'activité professionnelle a engendré un réveil plus tôt le matin pour 66% d'entre eux ; le couché a été plus tardif de 30 minutes à une heure. Le sommeil a donc été de fait plus court. Les personnes interrogées estiment également que cela leur a imposé de dormir moins bien (ils ont plus de réveils au cours de la nuit).

Ceci semble surtout impliquer une altération du dynamisme au travail, de la concentration et une augmentation des erreurs.

### **Le Sommeil des plus de 50 ans**

Les personnes interrogées dans le cadre de l'enquête INSV (2010) ( $n=1017$  sujets de plus de 50 ans), disent dormir en majorité 7 à 8 heures par jour. La majorité dit ne pas faire la sieste et que l'endormissement se fait en moins d'une heure. Toutefois, les participants révèlent, pour 80% d'entre eux, se réveiller régulièrement la nuit, environ 2 fois. Les retraités interrogés ont répondu que l'arrêt de l'activité professionnelle permettait de se réveiller plus tard et de dormir plus longtemps. Toutefois, les pathologies les plus présentes de cette tranche d'âge sont l'insomnie et les troubles du rythme circadien (décalage des horaires de sommeil). Enfin, l'enquête a révélé que 65% des interrogés connaissaient des phénomènes de somnolence anormaux dus aux prises de médicaments ou au manque de lumière.

## **1.2 L'architecture du sommeil**

Les stades de sommeil ont été initialement décrits par LOOMIS, HARVEY et HOBART (1937), qui ont séparé les différents signaux physiologiques enregistrés pendant le sommeil à l'aide d'un électroencéphalogramme (EEG). Ils divisent alors les caractéristiques des enregistrements en 5 niveaux (voir figure 1.1 page suivante). Au milieu des années cinquante, un stade distinct de sommeil a été découvert par ASERINSKY et KLEITMAN (1953) en observant au cours de ce stade des mouvements oculaires rapides. Quelques années plus tard, DEMENT et WOLPERT (1958) l'associent au rêve. Mais c'est en 1959 que JOUVET et MICHEL (1959) observent durant certaines périodes du sommeil du chat, une atonie musculaire alors que l'enregistrement EEG révèle un état physiologique du cerveau proche de celui de l'éveil. Depuis ces travaux, ce stade particulier se nomme Sommeil Paradoxal (SP) en France et Rapid Eye Movement (REM-Sleep) pour les anglo-saxons. Chez l'homme, le sommeil est donc réparti en deux grandes catégories. Le sommeil à ondes lentes (NREM ou SOL) et le Sommeil Paradoxal (REM ou SP). Chacun de ces deux types de sommeil est associé à des caractéristiques physiologiques, neurologiques et psychologiques. Récemment, et se-

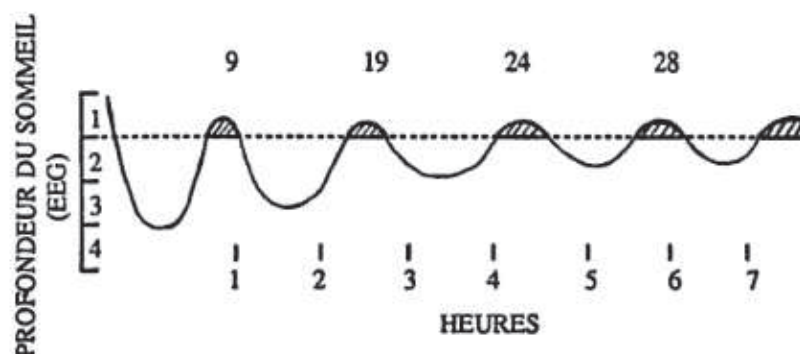


FIGURE 1.1: Conception de l'architecture du sommeil selon les chercheurs de Chicago dans les années 60. La profondeur du sommeil est représentée en abscisse. Les périodes de rêve (parties hachurées) sont assimilés à du sommeil léger. La figure et le texte de la légende sont tirés du livre de Jouvét "Le sommeil et le rêve" (JOUVET, 1992)

lon des recommandations publiées par l'American Academy of Sleep Medicine, le SOL a été divisé en trois stades : N1, N2, N3. Le dernier de ces trois stades est également nommé le Sommeil Lent Profond (SLP) ou Slow Wave Sleep (SWS) (SILBER et al., 2007).

### 1.2.1 Hypnogramme de l'adulte jeune

La représentation graphique des différents états physiologiques enregistrés au cours d'une nuit de sommeil se nomme l'hypnogramme (voir figure 1.2) Chaque nuit,

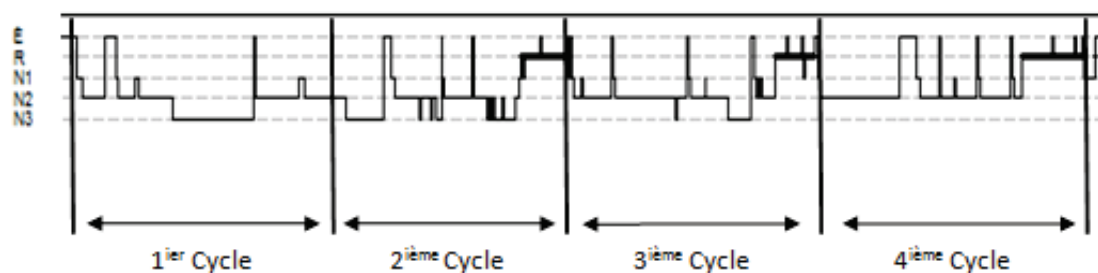


FIGURE 1.2: Sur cette figure est représentée l'hypnogramme de l'adulte jeune non pathologique. C'est à dire la représentation graphique de l'enregistrement des différents stades de sommeil en fonction du temps. On remarque que la succession d'états physiologique différents (Sommeil Paradoxal (SP); Sommeil Léger (N1 et N2); Sommeil Lent Profond (N3)) compose un cycle, une nuit de sommeil étant composées de plusieurs cycles d'environ 90 minutes

le sommeil non pathologique de l'être humain se divise en une succession de cycles de 90 minutes environ (la durée d'un cycle est une caractéristique individuelle), eux-mêmes divisés en une succession de stades de sommeil. Le Sommeil Lent Profond est plus présent en début de nuit et le Sommeil Paradoxal est plus présent vers le matin accompagné de courts éveils. Le sommeil est donc naturellement moins profond en fin de nuit que dans sa première partie.

### 1.2.2 Enregistrement polygraphique d'éveil

Sur la figure 1.3, sont présentées 10 secondes provenant de 2 voies d'enregistrement EEG de l'éveil. L'enregistrement met en évidence une fréquence entre 15 et 45 hz selon le niveau d'attention. On observe des mouvements rapides des globes oculaires liés à l'activité des yeux ouverts. La respiration est rapide, et le tonus musculaire important.

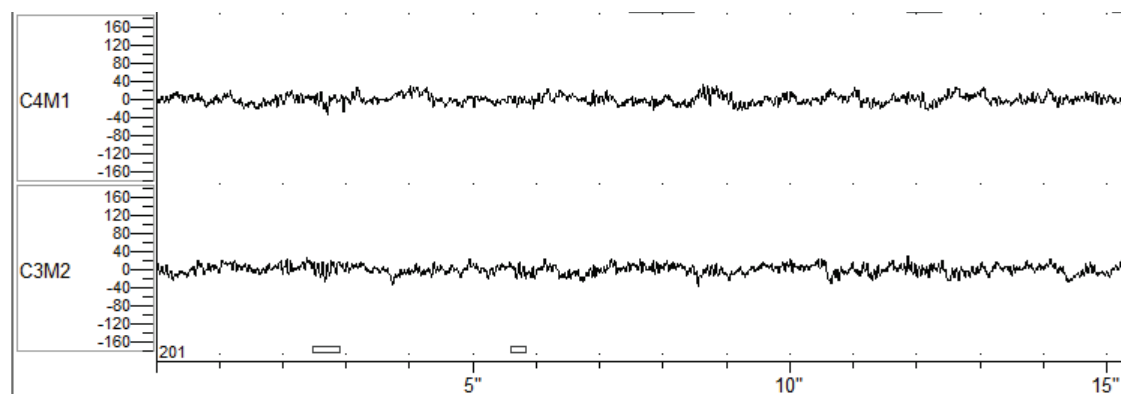


FIGURE 1.3: Sur cette figure sont présentées 10 secondes provenant de 2 voies d'enregistrement EEG de l'éveil actif. L'enregistrement met en évidence une fréquence entre 15 et 45 hz selon le niveau d'attention ici élevé. On observe des mouvements rapides des globes oculaires liés à l'activité des yeux ouverts. La respiration est rapide, et le tonus musculaire important.

### 1.2.3 Stade N1

C'est une phase de transition, signe de détente ; le rythme de dépolarisation des cellules nerveuses du cerveau passe des ondes Alpha ayant une fréquence de 8 à 13 hz (éveil calme) vers des ondes thêta ayant une fréquence plus lente de 4 à 7 hz (voir

figure 1.4). C'est à ce niveau de fréquence que l'on distingue l'état de somnolence. C'est également à ce stade que les hallucinations hypnagogiques ont lieu. Durant ce stade, le tonus musculaire diminue rapidement, et nous perdons également de plus en plus conscience des stimulations environnementales.

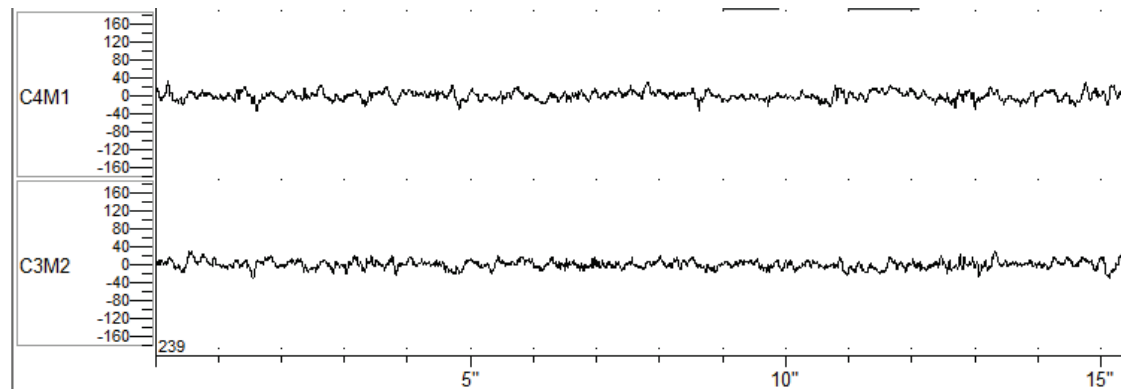


FIGURE 1.4: Sur cette figure, sont présentées 30 secondes d'enregistrement EEG de N1 tirés d'enregistrements personnels.

#### 1.2.4 Stade N2

Ce stade est caractérisé par des fuseaux de sommeil ou spindles. Ces fuseaux sont de brefs états de haute fréquence aux environs de 12 à 14 hz (voir figure 1.5 page suivante). Ici, le tonus musculaire continue de faiblir et la conscience de l'environnement extérieur a disparu. Ce stade de sommeil peut occuper entre 40 et 50 % du temps total de sommeil de l'adulte. La respiration se ralentit fortement.

#### 1.2.5 Stade N3

Ce stade est le sommeil lent profond (SLP). Il est principalement caractérisé par la présence de fréquences très basses, de 0,5 à 4hz (voir figure 1.6 page suivante). C'est à ce niveau de sommeil que se révèlent les phénomènes parasomniaques les plus courants tels que le somnambulisme, les terreurs nocturnes ou encore le bruxisme. Ce stade de sommeil peut occuper 20 à 25 % d'une nuit chez l'adulte et il est très sensible à la privation de sommeil. Au cours de ce stade, la respiration est lente et ample.

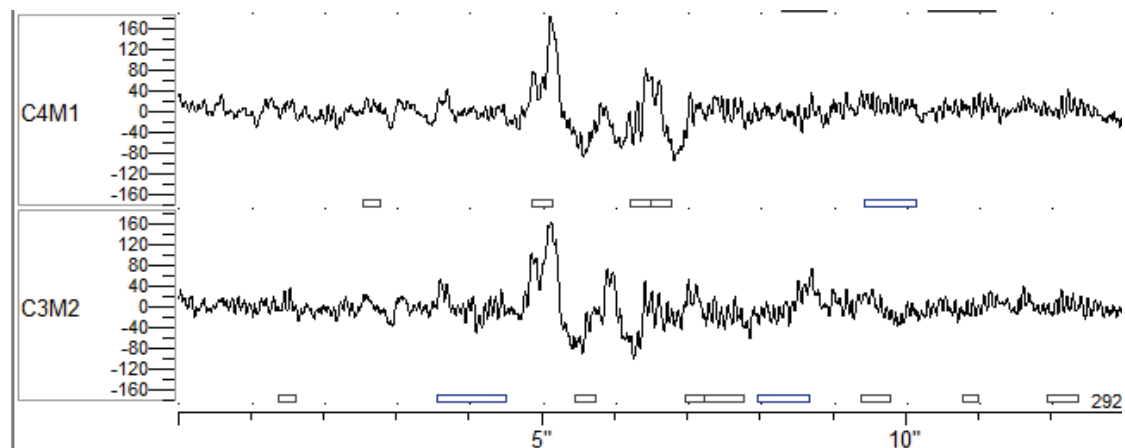


FIGURE 1.5: Sur cette figure, sont présentées 30 secondes d'enregistrement EEG de N2, des fuseaux ou spindles.

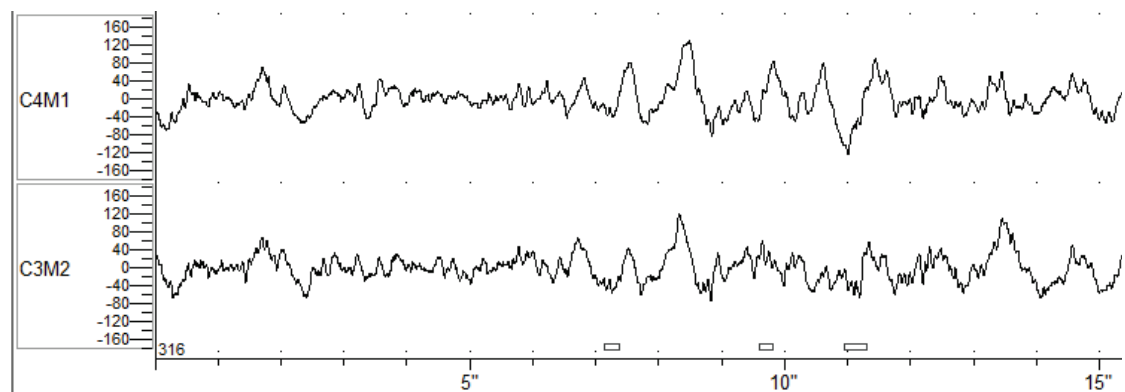


FIGURE 1.6: Sur cette figure, sont présentées 30 secondes d'enregistrement EEG de N3 tirés d'enregistrements personnels.

### 1.2.6 Le Sommeil Paradoxal

Ce stade occupe lui aussi approximativement un cinquième à un quart du temps de sommeil total normal. Les critères qualificatifs de ce stade sont un mouvement périodique et rapide des globes oculaires, une atonie musculaire quasi complète, un enregistrement EEG proche de celui de l'éveil (voir figure 1.7 page suivante). Lorsque l'on réveille un sujet en Sommeil Paradoxal, il se souviendra plus facilement de ses rêves.

Toutefois, lors du sommeil de récupération venant à la suite d'une dette de sommeil, l'architecture normale du sommeil, que nous venons de présenter ici, peut être

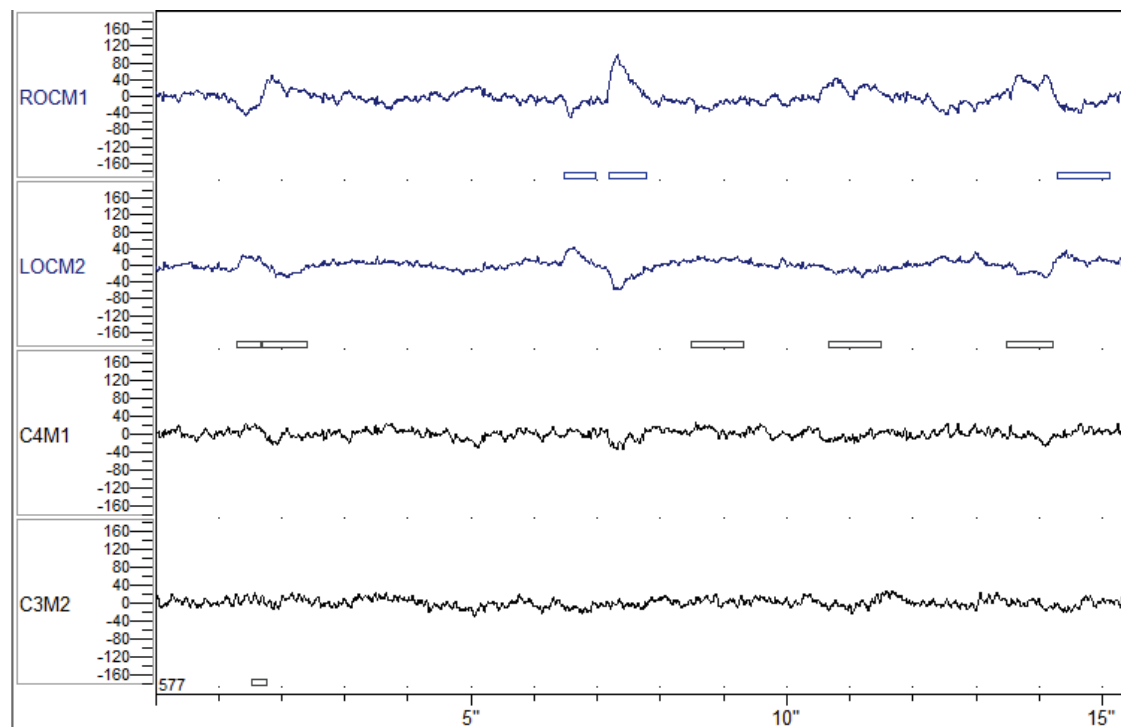


FIGURE 1.7: Sur cette figure, sont présentées 30 secondes d'enregistrement EEG de Sommeil Paradoxal. En haut de la figure, sont représentés les signaux provenant des mouvements oculaires. En bas, les signaux EEG.

modifiée. C'est le principe de la régulation homéostatique du sommeil comme celle que BORBÉLY (1982) propose.

### 1.3 Régulation de la veille et du sommeil

Le modèle de régulation du sommeil proposé par BORBÉLY (1982) et DAAN, BEERSMA, BORBÉLY, KRONAUER et GANDER (1984) fait aujourd'hui l'objet d'un consensus scientifique. Selon ces auteurs, le sommeil est régi par deux principaux processus : le processus homéostatique (appelé processus S), et le processus circadien (appelé processus C). La propension au sommeil (soit la facilité ou la tendance naturelle à s'endormir) est déterminée par les actions conjointes de ces deux processus. Depuis BORBÉLY, la modélisation s'est complexifiée, nous avons vu s'ajouter à ces deux processus, deux autres appelés processus ultradien (BORBÉLY & ACHERMANN, 1999), et processus d'inertie hypnique (W) (ÅKERSTEDT & FOLKARD, 1995).

Nous allons détailler la dynamique de chacun des processus de la régulation du sommeil.

### 1.3.1 Le processus Homéostatique

Ce processus recherche à équilibrer le temps passé à l'éveil avec le temps passé à dormir. Le processus homéostatique (S) correspond à l'accumulation du besoin de sommeil durant l'état de veille. Cette accumulation est aussi appelée pression homéostatique du sommeil. La propension au sommeil augmente donc avec la durée de la veille par l'accumulation de « pression », cette pression étant libérée au cours du sommeil. De nombreux travaux ont montré que la privation de sommeil entraînait une augmentation du sommeil lent profond (SLP) (WEBB & AGNEW, 1971 ; KALES et al., 1970 ; MOSES, LUBIN, NAITOH & JOHNSON, 1978 ; BENOIT, FORET & BOUARD, 1983) alors qu'à l'inverse une réduction de la durée de veille préalable le diminuait (ENRIGHT, 1980). L'intensité du processus homéostatique suit une cinétique exponentielle décroissante au cours du Sommeil Lent Profond. La densité des ondes lentes est le paramètre qui reflète le mieux l'intensité du sommeil. Selon BORBÉLY, BAUMANN, BRANDEIS, STRAUCH et LEHMANN (1981), cette intensité décline exponentiellement cycle après cycle au cours de la période de sommeil. (Voir figure 1.8)

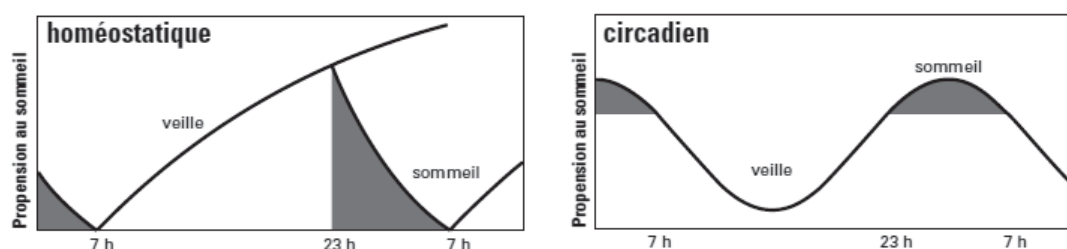


FIGURE 1.8: A gauche est représentée l'évolution de la pression homéostatique de sommeil au décours du temps selon une alternance « normale » du rythme veille-sommeil. La pression augmente durant l'éveil entre 7h et 23h, et elle diminue durant le sommeil entre 23h et 7h. A droite est représentée la propension circadienne au sommeil en fonction du cycle naturel de l'Homme proche de 24 heures. La propension la plus faible se situe en cours d'après midi alors que la plus forte en milieu de nuit (d'après BORBÉLY (2001))



### 1.3.2 Le processus Circadien

Le processus circadien<sup>2</sup> dépend de l'horloge biologique et évolue sur une période proche de 24 heures. Ce processus caractérise le besoin circadien de sommeil, totalement indépendant de la quantité de sommeil ou d'éveil. Le processus C cherche à rendre possible un éveil facilité durant le jour et un sommeil facilité durant la nuit. Cette alternance de propension au sommeil présente un minimum en milieu d'après-

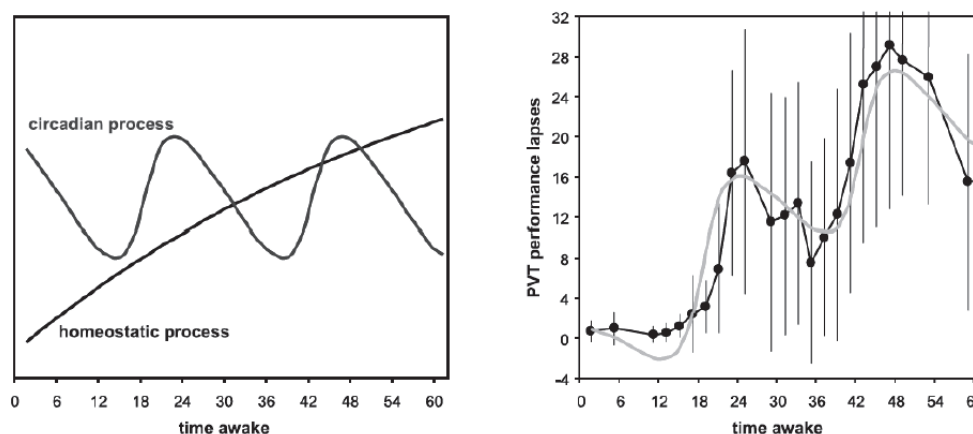


FIGURE 1.9: Présentation de l'action conjointe des processus homéostatique (S) et circadien (C) au cours d'une privation totale de sommeil de 60 heures. À gauche, le processus Homéostatique est illustré par une augmentation constante de la pression de sommeil au cours de l'éveil, tandis que le processus Circadien fait varier la pression de sommeil avec une alternance rythmique d'environ 24 heures. À droite, l'action conjointe des deux processus entraîne l'évolution de la propension au sommeil au cours des 60 heures d'éveil de façon non linéaire. La courbe en gris clair est l'évolution théorique de la pression de sommeil et la courbe noire est la fatigue mesurée (Figure de VAN DONGEN, CALDWELL et al. (2006)).

midi et un maximum au cours de la nuit. Ce processus circadien est donc responsable de l'aspect rythmique du cycle éveil-sommeil en commandant les faibles et fortes propensions à l'éveil au cours des 24 heures. (Voir figures 1.8 page précédente et 1.9) Dans des circonstances normales, et lorsque le rythme veille-sommeil est en phase avec le jour et la nuit, les propension au sommeil des deux processus sont presque synchrones.

2. Rythme biologique d'environ 24 heures, le mot circadien vient du latin *circa* (presque) et de *dies*(jour)

### 1.3.3 Le processus Ultradien

Le processus ultradien<sup>3</sup> intervient pendant l'épisode de sommeil. Il s'illustre par l'alternance du sommeil paradoxal et du sommeil à onde lente (voir figure 1.10).

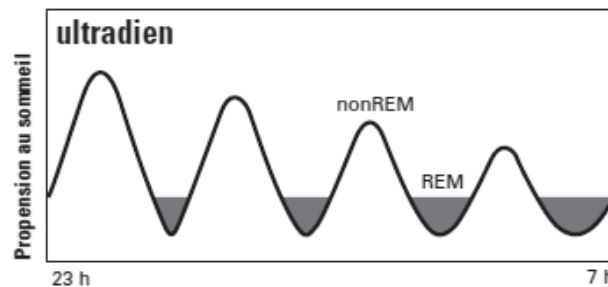


FIGURE 1.10: Durant le sommeil, l'alternance du sommeil à ondes lentes avec le sommeil paradoxal évolue. Avec une période d'environ 90 minutes le processus ultradien augmente la part du sommeil paradoxal (REM) au fur et à mesure que la nuit avance. (d'après BORBÉLY (2001))

Ces deux états distincts peuvent être définis sur la base des paramètres électro-physiologiques mesurés par exemple à l'aide d'une polysomnographie. Toutefois, LAVIE (1986) a témoigné par ses études de la continuité de l'état ultradien physiologiques au long du cycle circadien. Les différences de niveau d'éveil pendant la veille (avec une alternance proche de 90 minutes à l'image d'un cycle de sommeil) ont été définies par LAVIE (1986) comme les portes du sommeil (primaire et secondaire) et la zone interdite (Forbidden Zone) (Voir figure 1.11 page suivante).

Les portes du sommeil sont les moments de la journée où les individus ont des capacités à s'endormir élevés. La zone interdite lorsque la capacité est faible. La privation de sommeil amplifie la somnolence lorsque les portes du sommeil s'ouvrent.

### 1.3.4 L'inertie hypnique

Quelque soit la longueur de la sieste ou du sommeil, il y a un phénomène de somnolence et de performances altérées au réveil. L'inertie du sommeil (processus W) est la période située immédiatement après le réveil et se caractérise par une vigilance et des performances cognitives faibles ainsi que de possibles troubles de l'humeur.

3. Ultradien signifie littéralement plusieurs fois par jour.

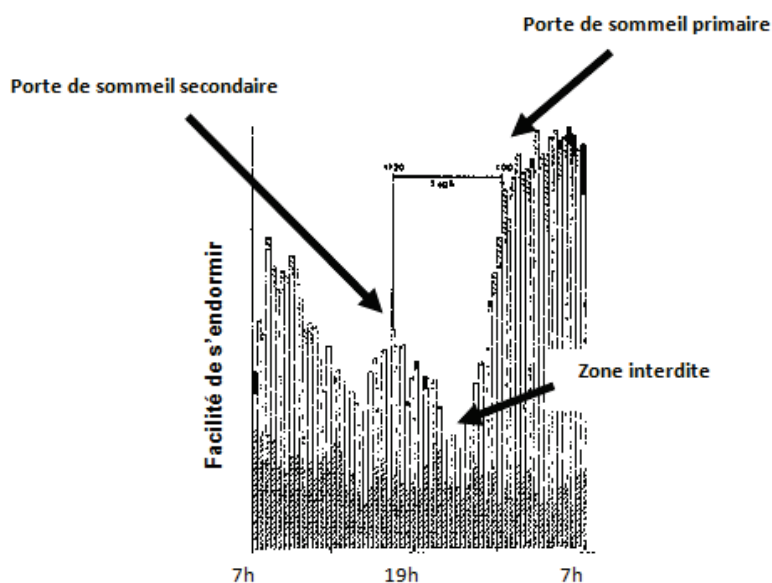


FIGURE 1.11: Illustration des portes de sommeil primaires et secondaires, ainsi que de la zone interdite pour un individu. Cette figure est adaptée de LAVIE (1986)

L'inertie du sommeil est différente de la somnolence puisqu'elle apparaît après une période de sommeil mais que les performances ne font qu'augmenter progressivement dans le temps (voir figure 1.12 page suivante). La sévérité et la durée de ce phénomène sont liés à la dette de sommeil, ainsi qu'au stade de sommeil dans lequel un individu est réveillé.

### 1.3.5 Fonctions du sommeil

La fonction du sommeil est l'un des mystères les plus persistant et compliqué en biologie. De nombreuses théories sont proposées et parfois complexes à déchiffrer, telles que celles de KRUEGER, TONONI, KAVANAU, CRICK-MITCHISON ET DE BENNINGTON ET HELLER. Elles tentent toutes d'expliquer pourquoi nous dormons, mais très peu semblent bénéficier d'un fort support expérimental tel que le rapporte FRANK (2006). Dans tous les cas, les réseaux de neurones les plus touchés par le sommeil semblent être ceux liés à la cognition. Tirées de ces théories, des idées convergent vers l'hypothèse selon laquelle le sommeil favorise la plasticité cérébrale.

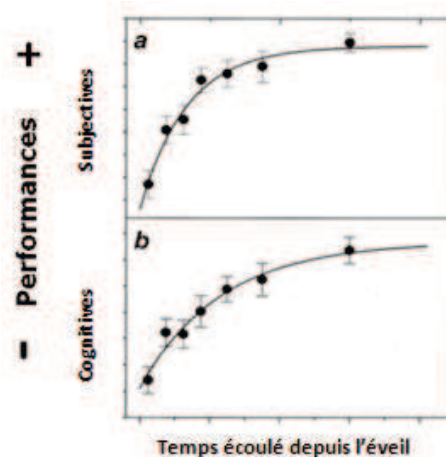


FIGURE 1.12: Evolution des performances subjectives en fonction du temps écoulé depuis l'éveil (en haut) ainsi que l'évolution des performances cognitives objectives en fonction du temps écoulé depuis l'éveil (en bas). Les performances faibles au réveil deviennent meilleures au fur et à mesure du temps. Ces figures sont adaptées de JEWETT, WYATT et al. (1999)

## 1.4 Conclusion

Le sommeil semble être une caractéristique individuelle mais aussi liée à l'âge, au sexe et à la catégorie professionnelle qui contraint ou non l'individu. Toutefois, tous les individus ont besoin de dormir et le font de façon relativement similaire à chaque nuit normale. En effet, les propensions de sommeil rythmiques biologiques (circadienne et Ultradienne) s'accordent avec une propension liée à l'historique veille-sommeil pour réguler le sommeil et la fatigue. Néanmoins, un désalignement de ces processus de régulation risque fort de perturber le déroulement normal du sommeil et de l'éveil.

## Exploration de l'éveil, du sommeil et des performances

### **2.1 Explorations du rythme veille sommeil par mesure objective**

#### **2.1.1 La Polysomnographie**

La polysomnographie (PSG), est reconnue comme la technique « gold standard » des études du sommeil (DE SOUZA et al., 2003) et c'est un outil de diagnostic privilégié en médecine du sommeil. L'enregistrement polysomnographique est un enregistrement complet des changements électro physiologiques, qui traduisent les phénomènes du sommeil et qui se produisent pendant celui-ci. Cette technique permet notamment de reconnaître les stades de sommeil N1, N2, N3 et SP (IBER, ANCOLI-ISRAEL, CHESSON & QUAN, 2007) ainsi que toutes les variables temporelles du sommeil tels que sa durée, la rapidité d'endormissement, le temps passé à chaque stade, le temps pour atteindre les différents stades. La PSG enregistre l'activité électrique du cerveau (EEG), les mouvements oculaires (EOG), ainsi que l'activité musculaire (EMG) et le rythme cardiaque (ECG). Après l'identification de l'apnée du sommeil ainsi que des troubles du sommeil qui lui sont associé, dans les années 1970 (GUILLEMINAULT, TILKIAN & DEMENT, 1976), les fonctions respiratoires ainsi que des indicateurs d'effort respiratoire ont été ajoutés, ainsi que l'oxymétrie de pouls.

La polysomnographie est plus généralement utilisée pour diagnostiquer des troubles du sommeil et elle est souvent proposée pour les patients ayant des plaintes d'hypermnolences diurnes. Même si la PSG n'est pas directement utile pour diagnostiquer les troubles du rythme circadien, elle peut être utilisée pour exclure d'autres troubles du sommeil ou pour apprécier de façon objective, par l'analyse spectrale, la dette de sommeil.

Les paramètres les plus étudiés avec la polysomnographie sont :

- la latence d'endormissement ;
- le temps de sommeil total ;
- le nombre d'éveils intra sommeil ;
- le temps total d'éveil après l'endormissement ;
- l'efficacité du sommeil ;
- les index respiratoires.

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques techniques de la réalisation d'une polysomnographie.

### **Electroencéphalogramme(EEG)**

L'électroencéphalogramme (EEG) utilise généralement six électrodes sur le scalp sauf dans le cas d'enregistrements ambulatoires, les appareils d'enregistrement ne comportant généralement que 2 voies EEG (voir tableau 2.1 page 29).

Le système international 10-20 du placement des électrodes (JASPER, 1958) est la méthode la plus largement utilisée pour décrire l'emplacement des électrodes de scalp (voir figure 2.1 page suivante). Le système 10-20 est basé sur la relation entre l'emplacement d'une électrode et la zone du cortex cérébral. Chaque placement a une lettre (pour identifier le lobe) et un numéro pour identifier l'emplacement de l'hémisphère.

Les électrodes sont le plus communément fixées sur le cuir chevelu à proximité de la zone frontale (F3-F4), centrale (C3-C4) et occipitale (O1-O2) ainsi que deux électrodes de "référence" (A1 et A2) fixés sur les mastoïdes. Dans certains cas comme lors de l'étude de troubles épileptique, un plus grand nombre d'électrodes seront appliquées sur le cuir chevelu (jusqu'à 32 électrodes).

Les électrodes (voir figure 2.2 page 23 ) sont fixées par une pâte qui conduit les

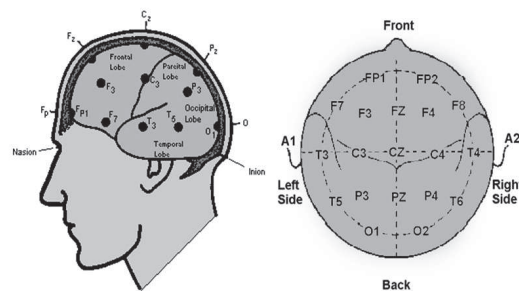


FIGURE 2.1: Les lettres utilisées sont : F pour le lobe frontal, T pour le lobe temporal, C pour le placement central (seulement pour identification car ce lobe n'existe pas), P pour le lobe pariétal et O pour le lobe occipital. Les numéros pairs se réfèrent à l'hémisphère droit et les numéros impairs à l'hémisphère gauche. Z fait référence aux électrodes placées sur la ligne médiane. Plus le nombre est élevé, plus la position de l'électrode par rapport à la ligne médiane est lointaine. FP est synonyme de front polaire, c'est ici que l'on y fixe l'électrode de masse. Le nasion est le point entre le front et le nez et l'inion est la bosse à l'arrière du crâne.

signaux électriques provenant des neurones corticaux .

### L'Electro-oculogramme (EOG)

L'EOG utilise deux électrodes dont une qui est placée 1 cm au-dessus du canthus externe de l'œil droit, la seconde est placée 1 cm au-dessous du canthus externe de l'œil gauche. Ces électrodes captent l'activité des yeux en raison de la différence de potentiel électrique entre la cornée et la rétine. Cela permet de déterminer le moment où le sommeil paradoxal (SP) se produit, dont les mouvements oculaires rapides sont caractéristiques. <sup>1</sup> (voir figures 2.3 page 24 et 1.7 page 14)

### L'Electromyogramme (EMG)

L'EMG utilise généralement deux électrodes pour mesurer le tonus musculaire pendant le sommeil. Deux électrodes sont placées sur le menton ( 2.3 page 24). Ceci,

1. tout comme la figure précédente, la légende suivante est issue de S.DEVUYST - Classification automatique en stades du sommeil : extraction de caractéristiques et comparaison des principaux classificateurs.

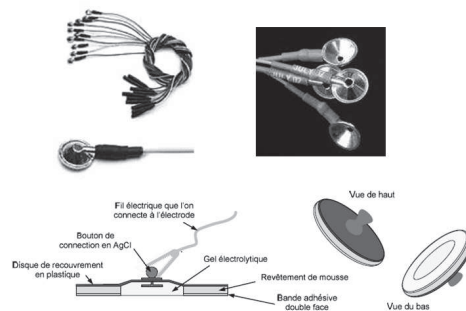


FIGURE 2.2: Electrodes en or (en haut) et électrodes adhésives jetables (en bas).

comme l'EOG, permet de compléter l'observation du sommeil paradoxal puisque le SP comprend une forte diminution du tonus musculaire. Enfin, deux électrodes supplémentaires peuvent être placées sur les muscles jambier antérieur de chaque jambe pour mesurer les mouvements des membres inférieurs (pathologie du mouvement des jambes sans repos).

### L' Electrocardiogramme (ECG)

Pour une polysomnographie du sommeil, un électrocardiogramme utilise seulement deux ou trois électrodes placées en haut à droite du thorax juste en dessous de la clavicule, sur le flanc gauche au niveau de la côte la plus basse et sur le flanc droit au niveau de la côte la plus basse. Ces électrodes mesurent l'activité électrique du cœur afin de dépister des anomalies qui pourraient être le signe d'une pathologie cardiaque sous-jacente pouvant s'exprimer pendant le sommeil (trouble du rythme par exemple, analyse de l'intervalle R/R).

### Mesure des Flux Respiratoires

Des mesures nasales et orales de flux d'air peuvent être réalisées à l'aide de capteurs de pression installés dans ou près des narines. Ceci permet de mesurer les variations de la respiration et d'en identifier les interruptions. Les efforts respiratoires sont également mesurés par l'utilisation de ceintures qui se détendent et se retendent



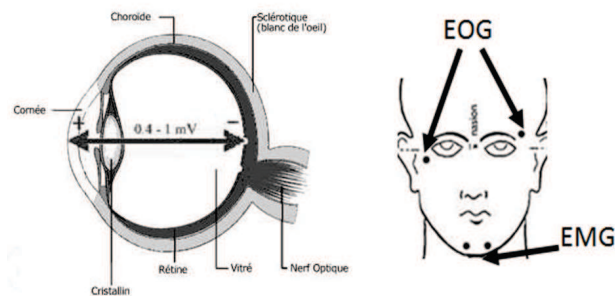


FIGURE 2.3: EOG : En disposant des électrodes au niveau des canthi latéraux inférieur d'un côté et supérieur de l'autre et en utilisant une seule électrode de référence sur la mastoïde, les signaux obtenus doivent être en opposition de phase puisqu'ils correspondent aux mouvements de l'oeil droit et de l'oeil gauche qui sont binoculairement synchrones ( 1.7 page 14) EMG : Les potentiels bioélectriques mesurés en électromyographie correspondent aux potentiels d'action des fibres musculaires. Bien que ce potentiel soit très faible pour une seule fibre , l'innervation simultanée de plusieurs fibres musculaires par un même motoneurone induit une différence de voltage suffisante pour être détectée par une paire d'électrodes sur la peau, ici au niveau du menton.

sous l'action des mouvements respiratoires. C'est par cette méthode que les apnées centrales ou obstructives du sommeil peuvent être détectées. L'oxymétrie de pouls détermine les changements dans les niveaux d'oxygénation du sang (Saturation du sang en  $O_2$ ), fréquents lors d'apnées du sommeil. L'oxymètre de pouls s'adapte sur un doigt ou sur lobe de l'oreille. Le ronflement peut être enregistré avec une sonde son disposée dans le cou, à proximité de la trachée.

### 2.1.2 L'Actimétrie

L'actimétrie implique l'utilisation d'un appareil portable enregistrant les mouvements du membre auquel l'appareil est attaché. Cet enregistrement de mouvements peut être réalisé sur de longues périodes compte tenu de la grande autonomie de la plupart des appareils du marché (Détail dans le tableau 2.2 page 30). Depuis la publication du rapport de 2002 de l'American Academy of Sleep Medicine (AASM) (LITNER et al., 2003), l'actigraphie a connu une explosion concernant le nombre d'articles



FIGURE 2.4: Photographie d'un sujet préparé pour une polysomnographie. Photographie prise lors de la première étude de la contribution personnelle.

de recherche l'utilisant pour mesurer le sommeil et les rythmes circadiens (MORGEN-THALER et al., 2007).

L'actimètre est un dispositif électronique qui se compose généralement :

- d'un capteur piézo-électrique ;
- d'un filtre qui assure que les vibrations externes sont ignorées ;
- d'une minuterie pour démarrer et arrêter l'appareil à des moments précis, permettant d'accumuler des valeurs pour une période donnée ;
- d'une mémoire permettant de stocker les valeurs ;
- d'un logiciel, auquel est connecté l'appareil généralement par USB afin de télécharger et de traiter les données enregistrées.

Les actimètres varient en capacités et en caractéristiques (voir tableau 2.2 page 30) et il y a un certain nombre de facteurs limitant comme :

- La fréquence d'échantillonnage (1 minute d'intervalle semble fournir suffisam-



FIGURE 2.5: Actimètres permettant l'enregistrement des périodes d'éveil et du sommeil

ment de détails pour mesurer le sommeil (LÖTJÖNEN et al., 2003)) ;

- La capacité de la mémoire, qui est fonction de la fréquence d'échantillonnage (la quantité de mémoire détermine combien de temps les mesures peuvent être prises) ;
- La capacité de la batterie (Certains appareils ont une courte durée d'autonomie) ;
- Le poids, car plus l'appareil est lourd, plus le poids est perturbant pour l'utilisateur ;
- La résistance à l'eau (pour des mesures correctes, il est souvent souhaitable que les appareils utilisés puissent être portés sous l'eau).

Pour certaines utilisations, les éléments suivants sont des exemples de fonctionnalités supplémentaires appréciables :

- un dispositif plus attractif pour l'utilisateur, notamment grâce au logiciel de traitement de données ;
- des marqueurs d'évènements (certains appareils incluent un bouton pour que l'utilisateur puisse indiquer un événement spécifique, par exemple l'extinction de la lumière, le soir au coucher) ;
- des capteurs de température, de lumière, de niveaux sonores.

Dans tous les cas, c'est une méthode non-invasive et peu contraignante qui peut être utilisée pour la mesure de l'alternance activité/repos. Dans ce cas, un actimètre,

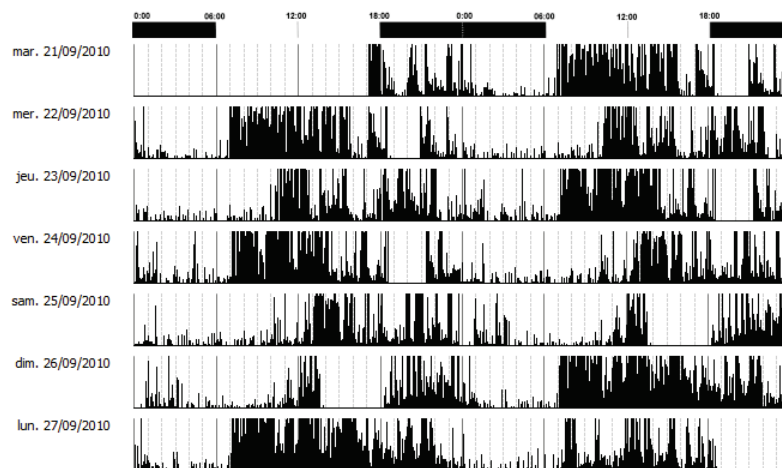


FIGURE 2.6: Actogramme issu de l'enregistrement d'un sujet durant une période de 7 jours consécutifs

de la taille d'une montre, est généralement porté au poignet du bras non-dominant (WOLFSON et al., 2003 ; VAN DEN BERG et al., 2008a) et enregistre en permanence les mouvements qu'il subit selon un, deux ou trois axes.

Les données peuvent être ensuite lues sur un ordinateur et analysées. De cette manière, les habitudes de sommeil et les rythmes circadiens sont observés et mesurés de façons objectives pendant plusieurs semaines successives.

Le traitement automatique des données brutes est effectué grâce au logiciel fourni avec l'appareil actimétrique. Ce scoring automatique est basé sur deux types d'algorithmes, celui de COLE, KRIPKE, GRUEN, MULLANEY et GILLIN (1992) et celui de SADEH, SHARKEY et CARSKADON (1994). Les temps de sommeil, d'éveil, la durée d'endormissement et l'efficacité du sommeil calculés par ces deux algorithmes sont basés sur l'activité enregistrée. Mais l'actimètre est également utile pour évaluer la somnolence diurne (LITTNER et al., 2003) dans les situations où un test de latence d'endormissement (MSLT) dans un laboratoire du sommeil n'est pas possible. L'actimétrie n'a pas été utilisée à l'origine dans le diagnostic du sommeil mais dans la mesure de l'activité physique d'éveil (MEIJER et al., 1991), et elle est désormais de plus en plus utilisée pour remplacer la polysomnographie (DELAFOSSE, LEGER, QUERASALVA, SAMSON & ADRIEN, 2000) car elle est moins coûteuse et moins contraignante. Cette technique est aussi largement utilisée en recherche universitaire.

Dans certaines applications récentes, les données sont transmises et analysées en temps réel. Notons aussi que certaines montres réveils modernes, utilisent un accéléromètre permettant d'identifier les périodes de sommeil plus léger, permettent au dormeur de se réveiller plus facilement, limitent l'inertie hypnique (application pour iPhone d'Apple, l'horloge d'alarme Sleep Cycle, WakeMate), génèrent des graphiques, enregistrent des mouvements du corps pendant le sommeil et ont une fonction d'alarme.

| <b>Marque</b> | <b>Modèle</b>     | <b>Nombre de voies EEG</b> | <b>Poids</b> | <b>Autonomie</b> | <b>Adresse</b>                        |
|---------------|-------------------|----------------------------|--------------|------------------|---------------------------------------|
| Cidelec       | CID102L8          | 2                          | nc           | 10 à 24 hrs      | 49130 Sainte Gemmes sur Loire, France |
| Embla         | Embletta X100     | 2                          | 350g         | 24 hrs           | 1043 BZ Amsterdam, Netherlands        |
| Respironics   | Alice Pdx         | 2                          | 230g         | nc               | 44475 Carquefou cedex, France         |
| Tyco          | Hypnotrace Pocket | 4                          | 560g         | 11 à 20 hrs      | 78370 Plaisir, France                 |
| Weinmann      | SomnoCheck 2 R&K  | 2                          | 300g         | 20 hrs           | 22525 Hamburg, Deutschland            |
| CamNtech      | Actiwave          | 2                          | <50g         | 13 hrs           | Cambridge, CB233UY, United Kingdom    |

TABLE 2.1: caractéristiques des principaux modèles d'enregistrement de PSG ambulatoire des variables du sommeil disponibles sur le marché.

| Distributeur          | Produit             | Poids | Autonomie batterie | Mémoire | Durée d'enregistrement (interval 1 min.) | Capteur de lumière | Étanche | Marqueur d'évènement |
|-----------------------|---------------------|-------|--------------------|---------|--|--------------------|---------|----------------------|
| ActiGraph             | Actisleep           | 25 g  | 8 jrs              | 4 MB    | 1410 jrs                                 | Oui                | Oui     | Non                  |
| Ambulatory Monitoring | Basic Motion logger | 40g   | 60 jrs             | 2 MB    | 60 jrs                                   | Oui                | Oui     | Oui                  |
|                       | Motion logger       | 65g   | 30 jrs             | 2 MB    | 30 jrs                                   | Oui                | Oui     | Oui                  |
| Respironics           | Actiwatch 2         | 15g   | 30 jrs             | 1 MB    | 30 jrs                                   | Oui                | Oui     | Oui                  |
|                       | Actiwatch spectrum  | 30g   | 365 jrs            | 2 MB    | 36 jrs                                   | Oui                | Oui     | Oui                  |
| Somnomedics           | Somnowatch          | 30g   | 26 jrs             | 8 MB    | 45 jrs                                   | Oui                | Oui     | Oui                  |
|                       | Somnowatch plus     | 30g   | 18 jrs             | 64 MB   | 270 jrs                                  | Oui                | oui     | Oui                  |

TABLE 2.2: Caractéristiques des actigraphes les plus répandus sur le marché.

## **2.2 Explorations du rythme veille sommeil par mesure subjective**

### **2.2.1 L'Agenda de Sommeil**

A l'inverse de la polysomnographie et de l'actimétrie, l'investigation par agenda de sommeil est une méthode subjective. L'agenda de sommeil (voir figure 2.7 page suivante) est destiné à recueillir une vue synthétique des rythmes de repos et d'activité, et des événements en lien avec le sommeil. Il s'agit d'une grille que le sujet doit remplir chaque soir au coucher et chaque matin au lever selon de nombreuses instructions comme :

- Noter le déroulement de la nuit dans les cases horaires avec l'heure exacte du coucher par une flèche verticale vers le bas.
- Indiquer l'heure exacte du lever par une flèche verticale vers le haut. (même chose en cas de sieste)
- Griser ensuite les périodes de la nuit où le sujet pense avoir dormi, et laisser en blanc les éventuelles périodes sans sommeil
- Utiliser la colonne spécifique pour donner, chaque matin, une note de satisfaction à la nuit (Très Bonne, Bonne, Moyenne, Passable ; ou note sur 10).

L'agenda de sommeil présente le grand avantage d'être non invasif et non contraignant pour les participants qui, de ce fait, acceptent facilement son utilisation. De plus, son coût est minime.

Plusieurs études ont montré que l'agenda permettait une bonne mesure du temps de sommeil et de la latence d'endormissement (CARSKADON, DEMENT, MITLER, GUILLEMINAULT et al., 1976 ; ESPIE, LINDSAY & ESPIE, 1989).

Par contre, l'agenda de sommeil sous forme papier ne permet aucun traitement informatique rapide des données recueillies.

### **2.2.2 Les Questionnaires d'évaluation des habitudes de sommeil et du chronotype**

**Questionnaire de Horne et Otsberg** (HORNE & ÖSTBERG, 1976)





**Questionnaire de Pittsburg** (BUYSSE, REYNOLDS III, MONK, BERMAN & KUPFER, 1989)

Le centre de sommeil de Pittsburg a développé un index (Pittsburg Sleep Quality Index ou PSQI) dans le but de mesurer de façon valide les qualités de sommeil et de distinguer les bons dormeurs des mauvais dormeurs. Il comporte 19 questions posées au sujet lui-même et 5 aux compagnons des sujets, même si ces questions ne comptent pas dans le score final de l'index. Ce questionnaire pose des questions sur le sommeil du mois précédent.

**Questionnaire de Spiegel** (R. SPIEGEL, 1981)

Ce questionnaire, en 6 questions où le sujet répond selon 5 possibilités, évalue le sommeil de la nuit précédente.

**Questionnaire " St Mary's Hospital"** (ELLIS et al., 1981)

Ce questionnaire a été validé chez des volontaires sains comme pour des cas de personnes hospitalisées. Ce questionnaire en 14 questions évalue le sommeil, le comportement au réveil et dans la journée précédente.

**Autres Questionnaires** Il existe également d'autres questionnaires permettant d'évaluer de potentielles pathologies du sommeil. Il s'agit par exemple du Sleep Symptom Questionnaire (KUMP et al., 1994), le Sleep Disorder Questionnaire (DOUGLASS et al., 1994), le Questionnaire de Sommeil de l'Hôtel Dieu (LÉGER, 2001).

## 2.3 Investigations de la somnolence

Mesurer la somnolence et les pertes de performances lors d'études de laboratoire ou dans le contexte d'études de terrain, comme sur le lieu de travail ou dans des conditions naturelles d'exercice, est souvent difficile et complexe. La somnolence étant la variable reflétant le plus le manque de sommeil, mesurer les performances pourrait indirectement permettre de mesurer la somnolence. Voici, ci-dessous, les principales méthodes utilisées pour mesurer les états de somnolence.

### **2.3.1 Multiple Sleep Latency Test (MSLT)**

La mesure multiple de la latence d'endormissement est le "gold standard" de la mesure de la somnolence (CARSKADON, DEMENT, MITLER, ROTH et al., 1986). Le MSLT est un enregistrement polysomnographique de 20 minutes, effectué par exemple toutes les deux heures (10h, 12h, 14h, 16h). Il est demandé au sujet ou au patient de se mettre au lit sans lutter contre le sommeil. On mesure le délai d'apparition du premier stade du sommeil. Un délai moyen d'endormissement inférieur à 5 minutes est significatif d'une somnolence excessive. Un délai d'apparition du sommeil paradoxal raccourci est potentiellement évocateur d'une narcolepsie, de troubles neurologiques sévères ou d'une très importante dette de sommeil. Compte tenu de la difficulté de mise en place d'un tel test qui semble réservé au milieu hospitalier ou aux études de laboratoire, il n'est pas envisageable de l'utiliser facilement dans un contexte opérationnel ou lors d'études de terrain.

### **2.3.2 Maintenance of Wakefulness Test (MWT)**

Il s'agit d'un test de capacité de maintien de l'éveil (MITLER, GUJAVARTY & BROWMAN, 1982). Il mesure la capacité à résister à l'endormissement. Toutefois, le MWT présente les mêmes difficultés de mise en place que le MSLT, puisqu'il doit être réalisé dans les mêmes conditions rigoureuses (utilisation de la polysomnographie, chambre individuelle calme etc.). Il n'est pas non plus envisageable de l'utiliser simplement dans un contexte opérationnel.

### **2.3.3 Mesures basées sur un changement d'état physiologique**

Des mesures de la somnolence basées sur des changements physiologiques comme la pupillométrie (dilatation de la pupille), oculométrie (mesure des mouvements oculaires), la fermeture des paupières (mesures basées sur le signal EEG, etc...) semblent prometteuses et présentent l'avantage d'être imperméables à la motivation. Toutefois, ces mesures ne sont généralement pas validées de manière adéquate (BALKIN, BLIESE et al., 2004), exigent souvent un lourd matériel spécialisé et, en fonction de la nature de la mesure, comme pour l'enregistrement EEG, un certain entretien peut être nécessaire au bon déroulement de la mesure (par exemple entretien des contacts

des électrodes). Pour les raisons évoquées, ces techniques ne nous paraissent pas facilement utilisables dans un contexte opérationnel ou pour des études de terrain à long terme.

#### **2.3.4 Mesures “embarquées”**

Les mesures de performance “embarquées” nous semblent les plus prometteuses, comme par exemple les appareils de mesure de dépassement de ligne de bas côté sur les camions (GRACE, 2001), car celles-ci pourraient être utilisées pour surveiller les performances dans un environnement opérationnel réel, permettant la détection automatique de la détérioration de la performance. Ceci pourrait signaler les limites de somnolence avant qu’une altération majeure de la performance ne soit atteinte. Ces systèmes, dans des contextes opérationnels, ne sont pas tous susceptibles d’être des méthodes des mesures évidentes à mettre en place, et sont très liés à la spécificité des tâches à accomplir dans un environnement donné.

#### **2.3.5 Mesures spécifiques de tâches par simulateurs**

De nombreux simulateurs de conduite automobile, de moto ou d’avion existent et sont utilisées dans des études de laboratoire<sup>2</sup>. Toutefois, à notre connaissance, il n’existe pas de simulateur de bateau à voile utilisé scientifiquement.

#### **2.3.6 Tests subjectifs par questionnaires et échelles**

##### **L’Echelle de Somnolence d’Epworth (ESS) (JOHNS, 1991)**

Cette échelle est très largement utilisée pour mesurer la somnolence subjective dans les pratiques cliniques. Ce questionnaire est basé sur le risque de s’endormir dans certaines conditions sociales. La popularité de l’ESS est due à sa simplicité, sa brièveté et au fait que le test puisse être effectué par le sujet seul. L’ESS est corrélée positivement avec la probabilité de s’endormir au volant (MAYCOCK, 1997) et avec le risque d’accident corporel au travail (MELAMED & OKSENBERG, 2002). L’inconvénient est que le test n’est pas utilisable pour la réévaluation de la somnolence à intervalles

---

2. Par exemple, la plateforme GENPPHASS

courts pour, par exemple, l'évaluation de la somnolence circadienne. Les valeurs normales de somnolence évaluées par JOHNS dans la version originale ont été fixées à  $5,9 \pm 2,2$ , ou entre 2 et 10 du maximum de 24 points.

**L'Echelle de somnolence de Stanford (SSS)** (HODDES, ZARCONE, SMYTHE, PHILLIPS & DEMENT, 1973)

Il s'agit d'un moyen rapide d'évaluer dans quel état de somnolence un sujet se trouve subjectivement. Cette échelle a été conçue pour quantifier le niveau de somnolence sur une échelle en sept points, de très vigilant (1) à extrêmement somnolent (7). Elle peut être utilisée couramment dans l'étude des pathologies du sommeil et dans l'étude des effets de la privation de sommeil. Les résultats de l'étude de HERSCOVITCH et BROUGHTON (1981) ont montré que la SSS était sensible au déficit de vigilance à la suite d'une privation totale de sommeil, mais qu'elle ne semblait pas adaptée à l'analyse des privations de sommeil chroniques.

**L'Echelle de somnolence de Karolinska (KSS)** (ÅKERSTEDT & GILLBERG, 1990)

La KSS est sans doute l'échelle la plus communément utilisée lors de recherches en contexte de terrain. C'est une échelle en neuf points qui a pour but d'évaluer le niveau de somnolence d'un sujet à un moment donné. Cette échelle correspond à faire traduire des sensations par des descriptions verbales, que le sujet questionné doit avoir intégré. La validation de cette échelle a été réalisée par les auteurs par comparaison des niveaux de somnolence et de vigilance subjectifs et objectifs. Les résultats de leur étude ont montré que les réponses données par les sujets à la KSS étaient étroitement liés aux signaux EEG et EOG.

**L'Echelle Visuelle Analogique (EVA)** (MONK, 1989 ; BOND & LADER, 1974)

Cette échelle est une autre méthode pour évaluer la somnolence subjectivement. Le sujet doit indiquer, en déplaçant un curseur sur une ligne horizontale de 100mm, son état subjectif au moment du test (de très somnolent à pas somnolent du tout).

## 2.4 Investigation de la vigilance, de l'attention soutenue et des fonctions exécutives

### 2.4.1 Gamme de tests

#### Classification

Une large gamme de tests sur les fonctions cognitives, sur la vigilance et sur l'attention soutenue existe. Selon PARROTT (1991) les tests permettant d'explorer la vigilance et la performance peuvent être classés comme suit :

| Fonction testée                             | Description  | Tests  |
|---|--|--|
| <i>Attention</i>                            | Détection de cibles dans une matrice présentée rapidement, stimuli répétitifs        | Barrages de lettre, traitement de l'information rapide.  |
| <i>Vigilance</i>                            | Détection des stimuli incertains et peu fréquents sur une période de temps prolongée | Tests de vigilance auditive, Horloge de Macworth   |
| <i>Traitement de l'information simple</i>   |  | Tests de codage, arithmétique, tâche de Stroop   |
| <i>Traitement de l'information complexe</i> |  | Tests de raisonnement logique, de rotation mentale, d'identification de concept, de créativité, de jugement  |
| <i>Attention cognitive</i>                  | Distinguer des stimuli cognitivement confus  | Tâche de Stroop  |
| Mémoire                                     |  | Test d'empan digital, de reconnaissance, de rappel, de consolidation, de recouvrement  |
| <i>Habilité motrice simple</i>              |  | Taping, poursuite, temps de réaction simple, temps de réaction de choix, temps de réaction continue de Wilkinson, poursuite de cible, stabilité, équilibre             |
| <i>Habilité motrice complexe</i>            |  | Dextérité manuelle, coordination bidimensionnelle, poursuite multidimensionnelle, temps de réaction de choix complexe, pilotage, simulation de performances complexes. |

TABLE 2.3: Liste (non exhaustive) de tests existant pour réaliser l'exploration de fonctions exécutives

### **Les tests les plus utilisés**

Nous présentons ci-dessous les principaux tests utilisés dans la littérature scientifique actuelle :

#### **Le Psychomotor Vigilance Task (PVT)** (DINGES & POWELL, 1985)

Ceci est un test de temps de réaction simple (SRT) où le sujet doit répondre, pendant 10 minutes, le plus rapidement possible, à des stimuli tous identiques apparaissant avec un délai aléatoire de 2 à 10 secondes. Ce test de mesure de l'attention soutenue est le test le plus communément utilisé dans la littérature. Ce test peut également être effectué sur une tâche de 5 minutes et sur un support léger et transportable du type « Palm » (LAMOND, DAWSON & ROACH, 2005 ; ROACH, DAWSON & LAMOND, 2006). Les mesures pouvant être utilisées sont le rapport  $1/SRT$ , les 10% des meilleurs SRT, le nombre de « Lapses » (nombre de temps de réponse supérieurs à 500 ms), la moyenne et la variance des temps de réaction. (BILLIARD & KENT, 2003).

#### **Les tests de temps de réaction de choix** (WILKINSON & HOUGHTON, 1975)

Dans les tests de temps de réaction de choix, le sujet reçoit la consigne de répondre à certains stimuli et non à d'autres. Les mesures habituelles sont le nombre, la moyenne et la variance des réponses correctes et incorrectes, et comme pour le test de temps de réaction simple les « Lapses » (BILLIARD & KENT, 2003). Les tests de temps de réaction de choix sont aptes à mettre en évidence une baisse des performances après 10 minutes de test (GLENVILLE, BROUGHTON, WING & WILKINSON, 1978).

**Tâche de Stroop** Le Test de Stroop est un test de souplesse d'attention. Une couleur est imprimée en toute lettre (jaune, rouge, vert, bleu) affichée dans une couleur différente de sa signification. Par exemple, si le mot «vert» est écrit à l'encre bleue, nous dirons le mot «vert» plus facilement que nous pouvons nommer la couleur dans laquelle elle est affichée, dans ce cas le bleu. Les mécanismes cognitifs impliqués dans cette tâche sont l'attention et l'inhibition. Il s'agit d'arrêter une réponse automatique afin de dire ou de faire autre chose.

**Tour de Hanoi** La Tour de Hanoi est un jeu mathématique. Il se compose de trois tiges, et un certain nombre de disques de différentes tailles qui peuvent coulisser sur une tige. Le casse-tête commence par les disques disposés dans l'ordre croissant de taille sur la tige, la plus petite au sommet, ce qui nous présente une forme conique. L'objectif du jeu est de déplacer la totalité de la pile sur une autre tige, en obéissant aux règles suivantes : un seul disque peut être déplacé à la fois et chaque déplacement consiste à prendre le disque supérieur de l'une des tiges et en le faisant glisser sur une autre tige, au-dessus des autres disques qui peuvent être déjà présents sur cette tige. Aucun disque ne peut être placé au-dessus d'un disque plus petit. C'est le nombre de mouvements de disques effectués pour réaliser la tâche qui permet de scorer la performance.

### 2.4.2 Sensibilité des tests, effet d'apprentissage et fiabilité des tests

Pour que les tests soient considérés comme sensibles, il est primordial que la mesure choisie soit sensible aux effets du manque de sommeil (avec, par exemple, aucun effet de plafond). C'est la précision avec laquelle la mesure choisie reflète le manque de sommeil en termes de performance. Inversement, la mesure choisie doit être relativement imperméable à l'influence d'autres facteurs qui pourraient avoir un impact sur les performances cognitives (BALKIN, BLIESE et al., 2004). La fiabilité sera traduite par le degré de répétition possible sans qu'elle soit soumise aux effets d'apprentissage, c'est-à-dire que la performance ne s'améliore pas en fonction de l'administration répétée de ce même test. Ainsi, la Tour de Hanoi ne serait pas facile à utiliser dans l'environnement opérationnel, parce que même si cette mesure a été très sensible aux effets du manque de sommeil préalable, il faut s'attendre à ce que ce test soit relativement insensible a posteriori, la solution du problème ayant été apprise (AHONNISKA, AHONEN & ARO, 2001).

### 2.4.3 Faisabilité pour les études de terrain

D'un point de vue pratique, il est essentiel que les mesures entraînent un minimum de conséquences pour l'exercice étudié. À cet égard, des mesures discrètes et passives seraient préférables. Néanmoins, les procédures de mesures doivent également être compatibles avec l'environnement de la mesure, par exemple en engen-



drant des dépenses minimales, en ne nécessitant que peu de temps pour la mise en place du test en ne demandant de la part du sujet que peu d'effort individuel pour la collecte des données. La facilité avec laquelle les données peuvent être compilées, traitées et interprétées sont aussi à prendre en compte. (DINGES & MALLIS, 1998).

| <i>Outcome measure</i>                       | <i>Effect size</i> | <i>Lower 95% confidence limit</i> | <i>Upper 95% confidence limit</i> | <i>Confidence interval range</i> | <i>Sensitivity index (ratio of effect size to interval range)</i> | <i>Significant</i> |
|--|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---|--------------------|
| Sleep latency                                | 0.447              | 0.214                             | 0.679                             | 0.465                            | 0.961   | Yes                |
| PVT – speed (1/RT)                           | 0.208              | 0.124                             | 0.343                             | 0.218                            | 0.954   | Yes                |
| StiSim lane deviation                        | 0.186              | 0.063                             | 0.378                             | 0.315                            | 0.591   | Yes                |
| 10-Choice reaction time – speed              | 0.032              | 0.012                             | 0.074                             | 0.062                            | 0.510   | Yes                |
| StiSim lane position                         | 0.075              | 0.024                             | 0.173                             | 0.149                            | 0.502   | Yes                |
| Wilkinson 4-Choice reaction time – speed     | 0.131              | 0.012                             | 0.275                             | 0.263                            | 0.496   | Yes                |
| Stanford Sleepiness Scale                    | 0.095              | 0.030                             | 0.227                             | 0.197                            | 0.482   | Yes                |
| Serial addition subtraction – speed          | 0.048              | 0.017                             | 0.121                             | 0.104                            | 0.467   | Yes                |
| 10-Choice reaction time – % correct          | 0.070              | 0.012                             | 0.175                             | 0.164                            | 0.425   | Yes                |
| Saccadic velocity (FIT)                      | 0.020              | 0.003                             | 0.065                             | 0.062                            | 0.328   | No                 |
| SynWork                                      | 0.055              | -0.004                            | 0.172                             | 0.176                            | 0.314   | No                 |
| StiSim number of accidents                   | 0.094              | -0.195                            | 0.142                             | 0.337                            | 0.280   | No                 |
| Stroop color naming – speed                  | 0.026              | 0.001                             | 0.096                             | 0.096                            | 0.271   | No                 |
| Stroop color naming – % correct              | 0.047              | -0.007                            | 0.178                             | 0.185                            | 0.252   | No                 |
| Serial addition subtraction – % correct      | 0.028              | -0.014                            | 0.099                             | 0.113                            | 0.246   | No                 |
| Time estimation                              | 0.083              | -0.024                            | 0.329                             | 0.353                            | 0.235   | No                 |
| Wilkinson 4-Choice reaction time – % correct | 0.034              | -0.012                            | 0.134                             | 0.147                            | 0.231   | No                 |
| Latency to pupil constriction (FIT)          | 0.012              | -0.003                            | 0.048                             | 0.052                            | 0.229   | No                 |
| FIT impairment index                         | 0.008              | -0.017                            | 0.021                             | 0.038                            | 0.212   | No                 |
| Running memory – % correct                   | 0.052              | -0.029                            | 0.221                             | 0.250                            | 0.210   | No                 |
| Code substitution – speed                    | 0.018              | -0.014                            | 0.087                             | 0.101                            | 0.177   | No                 |
| Running memory – speed                       | 0.029              | -0.022                            | 0.156                             | 0.177                            | 0.166   | No                 |
| Logical reasoning – % correct                | 0.017              | -0.013                            | 0.091                             | 0.104                            | 0.164   | No                 |
| Initial pupil diameter (FIT)                 | 0.000              | -0.002                            | 0.001                             | 0.003                            | 0.139   | No                 |
| Amplitude of pupil constriction (FIT)        | 0.000              | -0.003                            | 0.001                             | 0.004                            | 0.101   | No                 |
| Logical reasoning – speed                    | 0.001              | -0.008                            | 0.002                             | 0.010                            | 0.074   | No                 |

FIGURE 2.8: Résultats des mesures tirées de l'article de BALKIN, BLIESE et al. (2004). Classement par ordre de la sensibilité la plus haute à la plus basse pendant une restriction chronique de sommeil. Les paramètres de l'intervalle de confiance sont énumérés pour chaque test.

## 2.5 Conclusion

Comme nous l'avons expliqué dans la première section de ce chapitre, différentes techniques (Objectives et Subjectives) permettent des mesures du rythme circadien ou des signaux physiologiques intervenant durant le sommeil, de façon plus ou moins précise. Toutefois, cette précision est intimement liée à la difficulté de mise en place de la mesure, ainsi qu'à la contrainte pour les sujets. Au long des études de notre contribution personnelle, ces difficultés et contraintes devront systématiquement être prises en considération pour le choix de la technique utilisée.

---

Compte tenu des éléments cités ci-dessus, de la littérature, de la faisabilité de l'utilisation des différents tests ainsi que de leur sensibilité, la performance et la somnolence, dans nos travaux de recherche de terrain, seront principalement évalués par des tests du type PVT ou temps de réaction simple, par échelle subjective de somnolence de Karolinska (KSS) ou par échelle visuelle analogique (EVA).

# La privation de sommeil : nature et effets

## 3.1 Introduction

Nous savons, grâce aux travaux princeps de PATRICK et GILBERT (1896), que le manque de sommeil affecte les performances à l'accomplissement d'une multitude de tâches et que certaines tâches sont plus ou moins sensibles au manque de sommeil (BALKIN, BLIESE et al., 2004). En 1967, WILLIAMS et LUBIN (1967), font l'hypothèse des «Lapses»<sup>1</sup> survenant inévitablement à la suite d'un manque de sommeil, et correspondant à un état de somnolence de stade 1 enregistré à l'EEG (GUILLEMINAULT & DEMENT, 1977). D'autres recherches ont par la suite montré que les baisses de performance, objectivement mesurées (BALKIN, THORNE et al., 2000 ; MCCARTHY & WATERS, 1997), pouvaient également avoir lieu alors que les sujets sont en plein éveil. Plus récemment, les symptômes cliniques de la privation de sommeil ont été définis par BONNET et ARAND dans leur revue en 2003 et les effets comportementaux et physiologiques ont été passés en revue par BANKS et DINGES (2007). A ce jour, de très nombreuses études ont donc décrit les effets d'une privation ou d'une restriction de sommeil sur la majeure partie des fonctions du corps humain tels que des troubles du métabolisme énergétique, de l'hypertension artérielle, des troubles digestifs, des perturbations de l'humeur et des troubles des fonctions exécutives.

---

1. en français, brefs événements de micros sommeils

A la lecture de ces travaux, on constate que tous les êtres humains sont concernés à plus ou moins long terme lorsque le sommeil n'est pas suffisant. Toutefois, des différences interindividuelles existent créant des inégalités quant à la réponse de l'homme au manque de sommeil qu'il soit aiguë (ou total), ou chronique.

## 3.2 La privation totale de sommeil

Pour sa part, la privation totale de sommeil ne permet pas du tout à l'individu d'acquiescer de temps dédié au sommeil.

Comme nous l'évoquons dans l'introduction de ce chapitre, la première étude sur les conséquences de la privation totale de sommeil remonte à la fin du 19<sup>e</sup> siècle. Depuis, de très nombreuses études se sont intéressées aux effets délétères de la privation de sommeil totale ou aiguë. L'augmentation du temps d'éveil engendre des comportements incontrôlés, comme des micro sommeils ou « sleep attacks » de quelques secondes (N. ROGERS, DORRIAN & DINGES, 2003). Les attaques de sommeil durant l'éveil s'accompagnent de conséquences neurocomportementales dans les réponses à des stimulations, ou bien d'une absence de réponse appelée « Lapses » (WILLIAMS & LUBIN, 1967). Les études expérimentales sur la privation totale de sommeil se sont donc attachées à fournir l'évidence que le manque de sommeil engendrait des conséquences importantes.

Très tôt, de très nombreuses recherches ont mis en évidence des baisses de performances :

- Aux temps de réaction simple et à l'attention soutenue (KLEITMAN, 1963 ; BARKOFF, CASPY & MIKULINCER, 1991) ;
- A la vigilance (GLENVILLE et al., 1978) ;
- A la mémoire à court terme (POLZELLA, 1975 ; ELKIN & MURRAY, 1974) ;
- Au raisonnement logique (LAMOND & DAWSON, 1999) ;
- A la fluence verbale (HARRISON & HORNE, 1997) ;
- Ainsi que des troubles de l'humeur (KLEITMAN, 1963) ;

Il a même été montré que la privation de sommeil prolongée, chez l'animal, engendrait des pathologies sévères allant jusqu'à la mort (RECHTSCHAFFEN, GILLILAND, BERGMANN & WINTER, 1983).

### **3.3 La restriction chronique de sommeil**

Contrairement à la privation totale de sommeil, qui a été étudiée expérimentalement de façon relativement approfondie, les effets de la privation partielle de sommeil ont reçu, dans un premier temps, moins d'attention scientifique. Pour le moins, ce champ de recherche a reçu plus tardivement l'attention particulière des chercheurs, les études expérimentales de longue durée étant difficiles à mettre en place. La plupart des études sur le sujet datent de moins de 10 ans. D'autre part, la restriction chronique de sommeil semble actuellement un problème plus fréquent ayant de multiples causes : santé (syndrome d'apnée du sommeil, etc.), mode de vie et de travail contemporain (travail posté ou en horaires décalés, travail avec décalage horaire, temps de transport, etc.) comme nous en faisons l'état dans le premier chapitre 1.1.2 page 8.

La privation partielle de sommeil peut se produire de 2 façons :

La première est la fragmentation du sommeil, qui peut intervenir dans certains troubles du sommeil (par exemple, dans le cas de l'apnée obstructive du sommeil). Au cours de la fragmentation du sommeil, la progression normale et le séquençage des stades de sommeil (voir le premier chapitre de la revue bibliographique 1.2.1 page 10) sont généralement perturbés.

La deuxième est la restriction de sommeil, qui est aussi appelée dette de sommeil (VAN DONGEN, MAISLIN, MULLINGTON & DINGES, 2003), et qui se caractérise par une durée du sommeil réduite par rapport aux besoins individuels.

### **3.4 Effet du manque de sommeil**

#### **3.4.1 Sur l'architecture du sommeil**

##### **Au cours de la restriction**

La restriction de sommeil altère l'architecture du sommeil, mais elle n'affecte pas de la même manière tous les stades de sommeil. Selon l'heure de la journée, la durée globale de sommeil et le niveau de dette (le nombre de jours de restriction), certains aspects du sommeil sont conservés, se produisent plus tôt, ou s'intensifient, tandis

que d'autres aspects du sommeil sont réduits. En général, le sommeil à ondes lentes N1 et N2 ainsi que le sommeil paradoxal sont diminués alors que le sommeil profond de type N3 est très peu modifié en durée (VAN DONGEN, MAISLIN et al., 2003). Les pourcentages de TST enregistrés pour chaque stade sont donc modifiés, faisant augmenter la part de Sommeil Lent Profond. Des changements progressifs sont également présents à l'analyse spectrale de l'EEG de sommeil paradoxal représentant un corrélat de la pression du sommeil paradoxal et de l'éveil (BRUNNER, DIJK & BORBÉLY, 1993). L'effet global est donc une modification nette de l'architecture du sommeil normal.

### **Pendant la récupération**

Comme durant la restriction elle-même, la latence d'endormissement est raccourcie (BRUNNER, DIJK, TOBLER & BORBÉLY, 1990). Dans les premières nuits de récupération, la durée totale du sommeil est augmentée ainsi que la quantité de sommeil à ondes lentes (BANKS, VAN DONGEN, MAISLIN & DINGES, 2010; ÅKERSTEDT, KECKLUND, INGRE, LEKANDER & AXELSSON, 2009). Un rebond de temps de sommeil paradoxal est également observé s'il avait diminué durant la restriction de sommeil. (BEERSMA, DIJK, BLOK & EVERHARDUS, 1990).

### **3.4.2 Sur les fonctions neuro-comportementales**

Les études portant sur des tâches de temps de réaction sont très utilisées pour étudier les effets de la privation de sommeil (voir chapitre précédent 9.2.5 page 129). D'une manière générale, on remarque que la privation de sommeil influe directement sur les temps de réaction en les allongeant (DINGES, F. PACK et al., 1997). Ceci signifie que le manque de sommeil altère les tâches nécessitant une vigilance psychomotrice et une attention soutenue (DORRIAN, ROGERS & DINGES, 2005). Selon DORAN, VAN DONGEN et DINGES (2001), les défaillances produites par le manque de sommeil peuvent être assimilables à des endormissements et sont sous l'influence des mécanismes de l'endormissement. C'est ce qui, selon les auteurs, implique l'instabilité de l'éveil (voir figure 3.1 page suivante).

Pour illustrer les effets de la restriction de sommeil sur les performances nous proposons de présenter les résultats de l'expérience de BELENKY et al. (2003) où soixante-

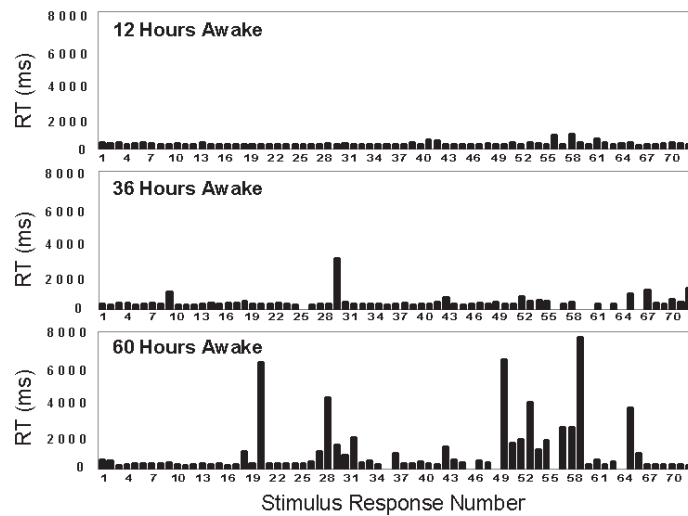


FIGURE 3.1: Temps de réaction (RT) bruts observés au cours d'un test de temps de réaction simple de 10 minutes pour une personne ayant subi une privation de sommeil totale. Les figures montrent les temps de réaction (en ordonnée) en fonction des stimuli successifs (en abscisse), après 12 heures, 36 heures et 60 heures de veille en continu. Ces figures sont adaptées à partir de l'article de DORAN et al. (2001)

six volontaires sains séparés en 4 groupes et ont passé 3h, 5h, 7h ou 9h par jour au lit (« Time In Bed ») pendant 7 jours (voir figure 3.2 page suivante).

A la suite de cette période de restriction de sommeil, 3 nuits de 8 h de récupération ont été offertes aux participants.

Au cours de cette expérience, les performances du groupe « 3h » ont diminué continuellement durant les 7 jours de privation de sommeil. Dans les groupes « 7h » et « 5h » les temps de réaction ont d'abord augmenté (et donc les performances ont baissé), puis ont semblé se stabiliser à un niveau relativement réduit pour toute la fin de la période de restriction de sommeil. Dans le groupe « 9h », les résultats sont restés au niveau de référence.

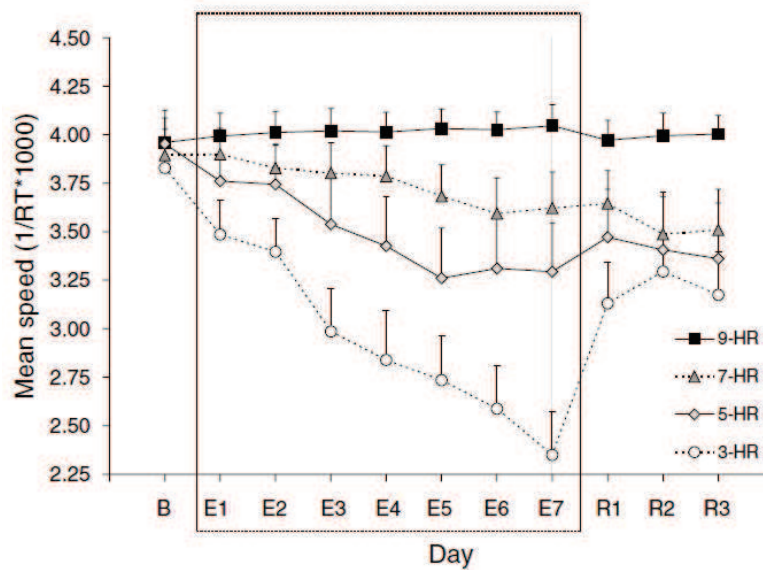


FIGURE 3.2: Performances mesurées par temps de réaction ( $1/\text{Temps de réaction} \times 1000$ ) en fonction du temps. Cette figure de BELENKY et al. (2003) montre l'évolution des niveaux de performances pour 4 groupes de sujets privés de sommeil pendant 7 jours (E1 à E7) après une mesure de référence (B). les performances après 3 nuits de récupération (R1,R2 et R3) sont présentées. Plus les valeurs en ordonnées sont élevées, plus les performances le sont aussi. Cette figure montre que les performances sont altérées de façon dépendante à la quantité de restriction et que la récupération des performances après une restriction chronique de sommeil n'est pas immédiate.

Pendant la période de récupération, les performances du groupe « 3h » se sont rapidement améliorées après la première nuit de sommeil de récupération, mais la récupération a été incomplète et s'est stabilisée à un niveau comparable aux groupes « 7h » et « 5h ». Les performances dans le groupe « 9h » sont, pour leur part, restées à des niveaux de base durant la période de récupération. Les auteurs discutent ces résultats par une adaptation du fonctionnement cortical à la restriction de sommeil chronique, mais aussi à l'intensité légère à modérée de la restriction de sommeil. Toutefois, même si cette adaptation est suffisante pour stabiliser les performances, celles-ci restent à un niveau réduit.

Dans une expérience chez des adultes sains, avec un protocole relativement similaire, où les sujets ont été maintenus pendant 14 jours consécutifs en état de restriction de sommeil chronique (4 h, 6 h, ou 8 h de TIB par nuit), VAN DONGEN, MAISLIN et al. (2003) ont montré les effets négatifs de la restriction de sommeil prolongée. Une



restriction chronique de sommeil à 6 h ou moins par nuit pendant deux semaines produit, au final, des déficits de performances cognitives équivalentes à un maximum de 2 nuits de privation totale de sommeil.

Il apparaît donc que la restriction de sommeil, même relativement modérée peut nuire gravement aux fonctions neuro-comportementales. De ces deux études majeures de la littérature, il est suggéré qu'il existe un «intégrateur neurobiologique» qui dirige le processus homéostatique et les conséquences neurobiologiques de l'éveil (BANKS & DINGES, 2007).

Même si les choses ne sont pas définitivement établies, il se pourrait que cet intégrateur soit en lien avec l'adénosine, comme le proposent BASHEER, STRECKER, THAKKAR et MCCARLEY (2004). En effet, selon ces auteurs, l'accumulation d'adénosine pendant la prolongation de l'éveil est responsable d'altérations au niveau de la partie antérieure du cerveau engendrant de la somnolence et une altération des performances cognitives. Après un éveil prolongé, les récepteurs de l'adénosine sont en augmentation<sup>2</sup> et les antagonistes de ces récepteurs sont par exemple ceux trouvés dans les boissons contenant de la caféine (ceci est le principal mode d'action du café).

### 3.4.3 Comparaison de la fatigue subjective et de la fatigue objective

Certaines études en laboratoire ont montré que lorsque la dette de sommeil était élevée, et surtout lorsqu'elle se prolongeait dans le temps, il existait une différence significative entre la perception de l'état de fatigue subjectif et sa mesure objective. Par conséquent le niveau de danger dans lequel opèrent les individus est modifié. AXELSSON et al. (2008) et PHILIP, TAILLARD et al. (2004) ont montré des différences entre la perception et la fatigue mesurée chez de jeunes conducteurs, ce qui pourrait expliquer le comportement de conduite à risque observé. VAN DONGEN, MAISLIN et al. (2003) ont également montré que, dans le cas d'une réduction prolongée de la durée du sommeil à environ 4 à 6 heures par nuit pendant deux semaines, il existait une absence de rapports entre le sentiment et la mesure objective de la somnolence, alors que les performances objectives empiraient (voir figure 3.3 page suivante). Ces

---

2. L'accumulation d'adénosine durant l'éveil est liée à la déplétion des réserves d'adénosine triphosphate, "monnaie énergétique" aux différentes fonction cellulaires.

différences devraient expliquer en partie pourquoi la restriction de sommeil est largement pratiquée.

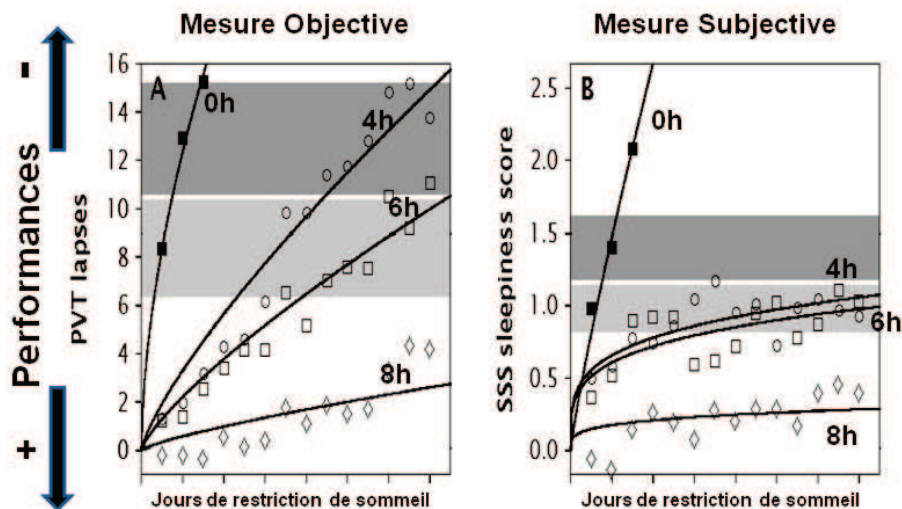


FIGURE 3.3: Réponses neuro-comportementales à des doses variables de sommeil par jour. Quatre différents dosages de sommeil (Privation totale de sommeil(0h) ; 4h par jour ; 6h par jour et 8h par jour) ont servi à mesurer les capacités de performances cognitives par PVT (figure A à gauche) et de la somnolence subjective par l'échelle de Stanford (figure B à droite) en fonction du temps. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, la restriction de sommeil engendre des baisses de performances objectives et subjectives (Plus les performances sont faibles, plus la valeur en ordonnée est forte). Toutefois, pour les groupes 4h et 6h, l'évolution de la fatigue perçue diffère, en quelques jours, de l'évolution de la fatigue testée objectivement.

### 3.4.4 Sur les capacités à l'exercice physique

Un nombre considérable d'études suggère que les sportifs et les athlètes doivent se soucier des effets du manque de sommeil sur leurs performances (revue de REILLY et EDWARDS (2007)). La privation totale de sommeil sur certaines performances phy-

sique semble ne pas avoir d'effets immédiats. En effet, SOUISSI, SESBOÛÉ, GAUTHIER, LARUE et DAVENNE (2003) ont déterminé dans leur étude l'effet de la privation de sommeil d'une nuit sur la performance anaérobie du lendemain. Leur analyse a révélé que les concentrations de lactate dans le sang n'ont pas été affectées par le manque de sommeil. Les auteurs concluent que la privation de sommeil réduisait toutefois la différence entre les performances du matin et de l'après-midi dans les variables de puissance anaérobie (diminution de l'influence circadienne sur les performances). Néanmoins, toujours dans la même étude, les performances anaérobies n'ont pas été affectées après 24 h de veille, mais l'ont été après 36 h sans sommeil.

D'autres études (revue de SOUISSI et DAVENNE (2004)) observent au contraire des effets de la privation de sommeil. Dans tous les cas, les auteurs soulignent que la désynchronisation induite par la privation totale de sommeil se traduit, comme énoncé précédemment, par une diminution de l'amplitude des fluctuations journalières des marqueurs circadiens.

Mais la majorité des études sur l'association entre les exercices physiques et la privation de sommeil se sont concentrées sur les performances aérobies (ANTUNES, ANDERSEN, TUFIK & DE MELLO, 2008), ne montrant que peu ou aucun effet de ce paramètre. Les résultats obtenus dans les études divergent considérablement en fonction du type de privation effectuée et des indices de la performance (DRUST, WATERHOUSE, ATKINSON, EDWARDS & REILLY, 2005). En effet, dans une étude chez des militaires ayant évolué pendant 5 jours en situation de simulation de combat (4h de sommeil moyen par jour) (GUEZENNEC, SATABIN, LEGRAND & BIGARD, 1994), les paramètres de consommation maximales d'oxygène et de performances anaérobies ont été affectées négativement, ce qui ne semblait pas évident dans les conclusions d'autres études (HORNE & PETTIT, 1984; PLYLEY, SHEPHARD, DAVIS & GOODE, 1987; CHEN, 1991). Plus précisément, d'un point de vue des paramètres physiologiques de l'effort, les paramètres ventilatoires pourraient être affectés par la privation de sommeil (MOUGIN et al., 1991; AZBOY & KAYGISIZ, 2009). Enfin, dans l'étude de ZHONG et al. (2005), la privation de sommeil était associée à une augmentation de l'activité sympathique et une diminution de l'activité parasympathique, la modification la plus constante se situant seulement dans certaines conditions (dans la position assise dans cette étude).

En conclusion, le consensus semble difficile à trouver dans la littérature compte

tenu de la nature des protocoles, des tests réalisés et de l'heure des mesures. Par contre, il semblerait que des traits individuels « sensibles » et « résistants » à la privation de sommeil sur les performances d'endurance, aient été depuis longtemps identifiés (MARTIN, 1981).

### 3.4.5 Perception de la fatigue à l'effort

REILLY et PIERCY (1994) ont montré que le manque de sommeil engendrait des pertes de performance dans une tâche de musculation (répétitions de même charges à soulever). Toutefois, il semble que la différence soit principalement l'effet de la perception de l'effort à fournir pour soulever ces poids, cette perception devenant plus élevée au cours de la restriction de sommeil. Cet effet du manque de sommeil sur la perception de l'effort à fournir pour réaliser un exercice a été largement repris dans la littérature, par exemple par RODGERS et al. (1995), OLIVER, COSTA, LAING, BILZON et WALSH (2009), MARCORA et STAIANO (2010).

## 3.5 Risques pour la santé

### 3.5.1 Les troubles du métabolisme énergétique

La relation entre le temps de sommeil réduit et l'augmentation du poids corporel, mais également de l'obésité, est désormais bien rapportée dans la littérature par de nombreuses études transversales et longitudinales, chez l'adulte, l'enfant ou l'adolescent (VIOQUE, TORRES & QUILES, 2000 ; VON KRIES, TOSCHKE, WURMSER, SAUERWALD & KOLETZKO, 2002 ; HASLER et al., 2004 ; CAPPUCCIO, TAGGART, KANDALA, CURRIE et al., 2008).

Selon une étude récente de TAHERI, LIN, AUSTIN, YOUNG et MIGNOT (2004) sur 1024 participants, il existe une association en forme de U entre la durée du sommeil et l'Indice de Masse Corporelle (IMC<sup>3</sup>) (voir figure 3.4 page suivante). La courte durée du sommeil était également associée à de faibles taux de leptine et un taux élevé de la ghréline qui sont deux hormones intervenant dans les processus de régulation de l'appétit. Les auteurs ont conclu que les différences dans la balance leptine/ghréline

---

3. masse d'un sujet divisé par sa taille au carré

sont susceptibles d'augmenter l'appétit (KNUTSON, SPIEGEL, PENEV & VAN CAUTER, 2007; VAN CAUTER & KNUTSON, 2008), ce qui pourrait expliquer l'augmentation observée de l'IMC en cohésion avec de faibles temps de sommeil.

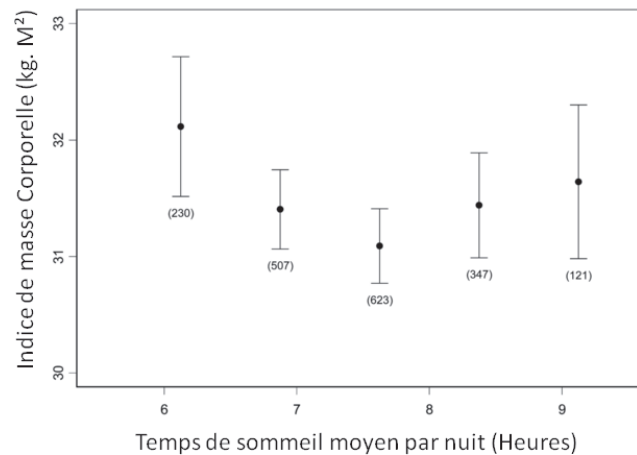


FIGURE 3.4: Les valeurs moyennes de sommeil par nuit qui prédisent l'Indice de Masse Corporelle moyen le plus bas sont représentés par le groupe central. Cette figure est tirée de l'article de TAHERI et al. (2004) sur 1024 participants.

A la lecture des études récentes, l'explication proposée par les auteurs cités précédemment nous semble plus complète que l'explication de SIVAK (2006) selon laquelle l'augmentation du temps d'éveil est associé avec une augmentation de la possibilité de s'alimenter. Toutefois, le modèle de PATEL et HU (2008), prenant en compte ces deux approches simultanément, est sans doute lui aussi intéressant. En conclusion, ces études considèrent toutes que le manque de sommeil peut être un risque de morbidité lié à une augmentation de la prévalence de maladies métaboliques chroniques de type obésité et diabète de type 2 (K. SPIEGEL, KNUTSON, LEPROULT, TASALI & CAUTER, 2005).

### 3.5.2 L'hypertension artérielle

Dans une étude épidémiologique récente réalisée aux Etats-Unis (GANGWISCH et al., 2006), les auteurs suggèrent qu'une courte durée du sommeil pourrait être une des étiologies de l'hypertension. Plusieurs études avaient auparavant décrit les liens entre l'hypertension artérielle et la réduction des temps de sommeil (voir revue de NAGAI, HOSHIDE et KARIO (2010)). Ces résultats ont conduit à l'hypothèse que la privation de sommeil induisait un état de stress, augmentant la pression artérielle par l'augmentation de l'activité du système nerveux sympathique.

### 3.5.3 Conséquences psychologiques

La réduction des temps de sommeil engendre également des altérations psychologiques de mécanismes tels que ceux de l'anxiété (GROSLAMBERT, CANDAU & MILLET, 2008; REILLY & EDWARDS, 2007), de l'humeur (ROSEN, GIMOTTY, SHEA & BELLINI, 2006) ainsi que ceux de la perception temporelle (KURIYAMA et al., 2005).

### 3.5.4 Phénomènes hallucinatoires

La privation de sommeil est bien connue pour avoir été utilisée comme moyen de torture lors de différentes pages de l'histoire, et on compte deux malheureux événements récents confirmant cela<sup>4</sup>. La privation de sommeil est donc l'empêchement de la survenue normale du sommeil entraînant une accumulation anormale de substances hypnogènes pouvant être toxiques et entraînant donc des troubles. Ces troubles pourraient être aggravés en fonction de la durée de la privation. Les effets semblent variables selon les individus et peuvent apparaître très rapidement. Le « record » de privation de sommeil a été porté à 266 heures par l'anglais Tony Wright<sup>5</sup>. Il a rapporté des troubles visuels, auditifs et neurologiques. Dans le cas d'une privation partielle de sommeil il semblerait que le résultat final soit identique mais que la survenue des événements hallucinogènes arrive dans un délai plus important. Les hallucinations hypnagogiques sont définies comme une intrusion de l'imagerie des rêves dans une phase d'endormissement ; les hallucinations étant généralement dé-

4. <http://www.morphee.biz/article-21188656-6.html>

5. <http://www.morphee.biz/article-6691943.html>

finies comme des perceptions qui surviennent en l'absence de stimuli externes correspondant. Toute anomalie dans le système perceptif, qui fait prendre conscience d'objets et de leurs relations avec l'environnement en réponse à une stimulation des organes des sens, peut provoquer des hallucinations (BABKOFF, SING, THORNE, GENSER & HEGGE, 1989). De telles perceptions peuvent impliquer l'ensemble des systèmes sensoriels conduisant à des hallucinations auditives, visuelles, tactiles, olfactives ou gustatives. De tels phénomènes impliquent l'ensemble du système nerveux depuis les organes sensoriels périphériques jusqu'au cortex et sont modulés par les expériences passées (mémoire), les anticipations en cours, et des facteurs de l'environnement.

## **3.6 Risques pour la sécurité en milieux professionnels**

### **3.6.1 Les accidents de la route**

La privation de sommeil augmente le risque accidentel lié aux erreurs humaines (DINGES, 1995). L'accidentologie routière représentait en 2002 la 9<sup>e</sup> cause de mortalité dans le monde ; en 2020 , elle est pressentie comme la troisième cause de décès juste derrière les maladies coronariennes<sup>6</sup>. On considère que 20% des accidents des pays industrialisés sont attribuables à des endormissements au volant (CONNOR et al., 2002). Les accidents de transports étant en France la première cause de mortalité au travail, une partie des accidents liés à la somnolence pourrait être expliquée par la privation de sommeil (Pr Philip dans le « Rapport sur le thème du sommeil au ministre de la Santé et des Solidarités ». Les jeunes conducteurs par exemple, surtout les hommes, constituent une population à risque pour les accidents au volant due à la somnolence et au manque de sommeil (CARSKADON, 1990 ; A. PACK et al., 1995 ; PHILIP, TAILLARD et al., 2004). Dans une étude de LEGER (1994), puis de WEBB (1995), il a été clairement montré que les accidents de la route liés à la privation de sommeil

---

6. Extrait du Livre Blanc : Conséquences Sociales et Economiques des Perturbations du Sommeil ; disponible à l'adresse : <http://www.institut-sommeil-vigilance.org/documents/Livre-blanc-Extrait3.pdf>

avaient un impact économique conséquent. La conduite nocturne ou la réduction du temps de sommeil ou bien encore l'utilisation de médicaments sont des actions qui ont toutes été définies comme contribuant à l'apparition de la somnolence au volant et pouvant induire des accidents (MITLER, MILLER, LIPSITZ, WALSH & WYLIE, 1997).

### 3.6.2 Travail posté et centres hospitaliers

Des études sur la population des travailleurs postés ont rapporté un fort risque accidentel pour les professionnels de l'industrie (GOLD et al., 1992 ; ÅKERSTEDT, 1998), tout comme pour les travailleurs en centres hospitaliers (MARCUS & LOUGHLIN, 1996 ; JHA, DUNCAN & BATES, 2001). Le manque de sommeil implique une détérioration des performances au travail et la fatigue est associée au risque de blessures, d'erreurs et d'accidents, que ce soit parce que la charge cognitive est élevée, ou parce que les tâches sont monotones (voir la revue d' AHASAN, LEWKO, CAMPBELL et SALMONI (2001)). De très nombreuses études de cas ont été réalisées pour illustrer ces propos comme celles de HALVANI, ZARE et MIRMOHAMMADI (2009) ou MESHKATI (2006). Dans le milieu hospitalier, les longues heures de garde affectent également la sécurité des soignants et des patients (A. ROGERS, HWANG, SCOTT, AIKEN & DINGES, 2004 ; LANDRIGAN et al., 2004 ; LOCKLEY, BARGER et al., 2007)(voir également la revue de OLSON, DRAGE et AUGER (2009) au sujet de la privation de sommeil en centre hospitalier).

### 3.6.3 Le milieu maritime

Dans le milieu des années 90, une enquête sur les accidents maritimes et leurs causes suggère qu'environ 80% de ceux-ci sont dus à une erreur humaine. De la même façon, le rapport DONALDSON, RENDLE et MCINTYRE (1994), pointe une erreur humaine à l'origine de pratiquement tous les accidents. Même si la chaîne de causalité des accidents maritimes est longue et complexe, la fatigue a été de façon récurrente identifiée comme cause principale ou comme étant un des principaux facteurs (BURKE, ELLIS & ALLEN, 2003). Les accidents en milieu maritime se soldent souvent par des pertes humaines (*L'Herald of Free Enterprise* en mer du nord : le navire avait appareillé avec ses portes avant ouvertes et, lorsqu'il a franchi les jetées et pris de



la vitesse, il a chaviré entraînant la mort de 193 personnes) ou des incidents entraînant de graves pollutions (*Exxon Valdez* en Alaska : accident survenu durant la nuit, le navire en s'échouant avait largué les 180 000 tonnes de pétrole qu'il contenait). Ces accidents très médiatisés ne donnent qu'une petite indication des nombreux incidents et accidents attribuables à la fatigue et qui ne sont pas signalés (REYNER & BAULK, 1998). Malgré des progrès considérables réalisés en matière de réglementation tant nationale qu'internationale, ainsi que dans la conception des navires, et malgré les avancées technologiques dans certains domaines (navigation par satellite, ordinateurs de bord...), le métier de marin demeure dangereux (TIRILLY, 2002). Il est certain que les conditions environnementales jouent un rôle majeur dans la survenue d'accidents, mais il semble nécessaire que les marins eux même ou les dirigeants des compagnies puissent avoir accès à des programmes éducatifs spécifiques tels que ceux proposés dans les revues de GANDER (2005) et de ALLEN, WADSWORTH et SMITH (2007).

### 3.6.4 L'aviation

Dans le secteur civil, l' Aviation Safety Reporting System (ASRS) aux Etats-Unis (développé par (REYNARD, 1986)), suggère que la fatigue est un facteur dans 21% des incidents aéronautiques signalés et la US National Transportation Safety Board a mis un accent majeur sur le problème de la fatigue (ROSEKIND, CENTER, AERONAUTICS, ADMINISTRATION & ADMINISTRATION, 1999). Dans les analyses du Bureau d'Etude des Accidents portant sur la problématique scientifique et opérationnelle des repos réduits et des services étendus chez les personnels naviguant (rapport du Laboratoire d'Anthropologie Appliquée (Université Paris 5) LABORATOIRE D'ANTROPOLOGIE APPLIQUÉE pour la DGAC en 2006<sup>7</sup>), 44 notifications en aviation générale et 10 en transport public évoquent la fatigue, avec seulement deux incidents pertinent pour la problématique des nuits courtes et des repos réduits (Celui d' Orly, le 23 novembre 1997 et un accident à Pristina, le 12 novembre 1999). CALDWELL (2005) présente dans sa revue plusieurs accidents, dans l'aviation civile américaine ainsi que dans l'aviation militaire de l'US Army, liés à la fatigue et ayant coûté la vie à plusieurs centaines

7. disponible ici : [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport\\_Final\\_DGAC\\_Etude\\_Preliminaire\\_Fatigue\\_v2.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_Final_DGAC_Etude_Preliminaire_Fatigue_v2.pdf)

de personnes. Récemment, en 2010, le Bureau de la Sécurité des Transports du Canada<sup>8</sup> s'est également alarmé en rapportant que douze accidents dans les dix dernières années pouvaient être attribués à la fatigue des pilotes.

### **3.7 Différences inter-individuelles face à la restriction de sommeil**

Comme nous l'avons vu dans le chapitre concernant la régulation du sommeil et de la fatigue ( 1.3 page 14), les deux processus homéostatiques et circadiens ont une influence majeure sur la somnolence et sur les performances durant l'éveil. Il est toutefois des facteurs endogènes encore mal définis (SAGASPE, TAILLARD & PHILIP, 2010) qui apportent aux individus des différences interindividuelles en terme de sensibilités à la privation de sommeil et à la fatigue. Des expérimentations de laboratoire (VAN DONGEN, MAISLIN et al., 2003 ; LEPROULT et al., 2003) dans lesquels ont été effectuées de façon répétée des mesures cognitives, ont mis en exergue ces phénomènes et ont rapporté de forts traits individuels (VAN DONGEN, BAYNARD, MAISLIN & DINGES, 2004) entre les participants (voir figure 3.5 page suivante). Les facteurs de ces variabilités sont à ce jour mal connus mais certains d'entre eux sont identifiés. En effet, l'âge joue un rôle important dans les différences quant à la réponse à la privation de sommeil (PHILIP, TAILLARD et al., 2004 ; BLATTER et al., 2006 ; BLIESE, WESENSTEN & BALKIN, 2006) mais de nombreuses recherches sont en cours pour déterminer d'autres facteurs plus prédictifs. Ces recherches portent sur les caractéristiques physiologiques homeostatiques et circadiennes mesurées par EEG (GALLIAUD et al., 2008), sur les mécanismes adénoenergiques (voir section fonction neuro-comportementales de ce chapitre, 3.4.2 page 48) (RÉTEY et al., 2006), sur les facteurs génétiques (VIOLA et al., 2007) et les sécrétions hormonales comme le cortisol (SEUGNET, BOERO, GOTTSCHALK, DUNTLEY & SHAW, 2006).

---

8. <http://www.tsb.gc.ca/fra/>

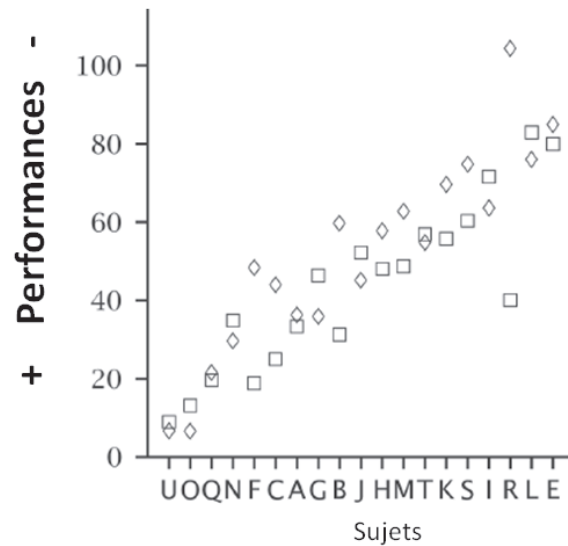


FIGURE 3.5: Réponse individuelle à la privation de sommeil . Tous les sujets ont été testés deux fois dans les mêmes conditions de privation de sommeil. On remarque que les caractéristiques individuelles pour les 21 sujets testés sont fortes au cours des deux périodes de test (Losanges et carrés). Les sujets les moins vulnérables sont à gauche et les plus vulnérables vers la droite. Cette figure est tirée de l'article de VAN DONGEN, BAYNARD et al. (2004)

### 3.8 Conclusion

Il y a donc deux type de restriction de sommeil, l'une est aigüe et l'autre est chronique. Dans tous les cas, le manque de sommeil entraîne des effets délétères sur toutes les fonctions du corps humain, ce qui engendre des risques individuels et collectifs pour la santé et la sécurité. Une fois de plus, les caractéristiques de la vulnérabilité des individus face à la privation de sommeil montrent qu'une démarche éducative doit s'organiser individuellement.

# Prédiction des performances au cours d'un déficit de sommeil

## 4.1 Introduction

Dans les nouveaux schémas économiques et productifs de la plupart des grandes entreprises et des administrations, le fonctionnement humain est souhaité comme optimal. Il s'agit, dans une stratégie d'économie financière ou d'obligation de service rendu, de pouvoir tirer parti au mieux de l'employé, de ses capacités ainsi que de ses performances comportementales. Certaines entreprises, dans les secteurs de l'industrie, de l'énergie, du transport et de la sécurité, fonctionnent 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre de ce mémoire, les horaires de travail ne sont parfois pas en phase avec les rythmes naturels et biologiques de l'homme, notamment celui de la vigilance. Les rythmes de travail peuvent également provoquer des restrictions de sommeil aiguës ou chroniques ce qui n'est pas sans effet pour la sécurité individuelle, collective ou environnementale. Un modèle prédictif des performances pourrait donc prendre tout son sens dans ces conditions contraintes. Selon MALLIS, MEJDAL, NGUYEN et DINGES (2004), l'idée d'un modèle prédictif est :

- De prévoir la durée au cours de laquelle la performance est plus susceptible d'être maintenu à des niveaux acceptables de santé et de sécurité ;
- D'établir les périodes qui sont les plus appropriés pour récupérer ;

- De déterminer les effets cumulatifs des différents horaires de travail et de repos sur les performances globales.

En 2002, le Fatigue and Performance Modeling Workshop de Seattle a permis de passer en revue les principaux modèles de prédiction de l’époque. Un numéro spécial de la revue *Aviation Space and Environmental Medicine* (Vol. 75 N°3, Section II, Mars 2004) nous a aidé à résumer l’origine, l’orientation et les particularités des modèles existants. Toutefois, la majorité des modèles de fatigue et de performance reposent sur le modèle originel de BORBÉLY (1982).

Dans les sections suivantes, nous présentons ces modèles, leurs supports et interfaces.

## **4.2 Le Two-Process Model (TPM)**

Ce modèle original (BORBELY & ACHERMANN, 1999) est au cœur de tous les autres modèles car il a été créé à l’aide de données de laboratoire obtenues à partir d’un certain nombre d’expériences, y compris l’analyse spectrale de l’activité EEG à ondes lentes. L’hypothèse au cœur du modèle repose sur une interaction des processus homéostatique et circadien ainsi que d’une composante d’inertie du sommeil (cinétique exponentielle). Le modèle a été développé pour la communauté scientifique, il a été intégré dans un logiciel dont l’interface graphique n’est pas définie, lui permettant d’être adapté en fonction des besoins spécifiques des chercheurs. Ce modèle permet de prédire la vigilance à partir des cycles activité-repos.

## **4.3 Le “QinetiQ alertness model’ (SAFE : System for Aircrew Fatigue Evaluation)**

Ce modèle de BELYAVIN et SPENCER (2004) est plutôt destiné à l’évaluation de la fatigue dans l’aviation. Le modèle a été développé en laboratoire et, plus tard, ajusté en fonction des données recueillies lors de vols long-courriers. Ce modèle est utilisé par l’aviation civile du Royaume uni (UK CAA). L’interface du logiciel qui l’utilise, permet d’entrer manuellement des informations et les résultats sont affichés sous forme graphique ; les niveaux de vigilance prédits sont rapportés par des codes couleur. Les

éléments pris en compte par le logiciel sont : le nombre de vols compris dans une durée de service, la durée de la tâche (Time on task), l’accumulation de la fatigue, les départs matinaux, le sommeil diurne, l’estimation du sommeil en vol. Toutefois, ce logiciel n’est pas utilisable en temps réel.

#### **4.4 Le “Interactive Neurobehavioral Model”**

Ce modèle de JEWETT et KRONAUER (1999) est basé sur les trois processus homéostatique, circadien et sur l’inertie du sommeil. Ce modèle a été développé notamment grâce au financement de la NASA. Le logiciel du modèle sur un ordinateur personnel (PC) permet à l’utilisateur d’entrer des niveaux de lumière et les heures de veille/sommeil. Les graphiques qui sont générés définissent les niveaux de performance et de la vigilance prédits ainsi que le minimum de la température corporelle. Le modèle permet en temps réel la mise à jour des informations directement à partir d’un actimètre.

#### **4.5 Le modèle “Sleep, Activity, Fatigue, and Task Effectiveness” (SAFTE)**

Ce modèle de HURSH, REDMOND et al. (2004) conceptualise un réservoir de sommeil qui se remplit et qui se vide, son niveau conditionnant le niveau de performance. Pour cela, il combine l’effet du processus homéostatique, du rythme circadien et de la composante d’inertie hypnique. Le modèle a été validé a posteriori en laboratoire (voir figure 4.1 page suivante) et sur le terrain chez des ingénieurs de chemins de fer. Le modèle SAFTE ne comprend pas les effets du travail physique, ni de la charge de travail ou le niveau d’intérêt dans la tâche. Selon Hursh, le modèle a été développé pour une utilisation dans les milieux militaires et industriels. Les utilisateurs actuels sont l’US Air Force et la Federal Railroad Administration. En outre, le modèle SAFTE a été appliqué à la construction d’un outil de planification d’évitement de la fatigue (FAST), qui est conçu pour aider à optimiser l’exploitation et la gestion des équipes des compagnies aériennes au sol et en vol, prenant également en compte le décalage horaire.

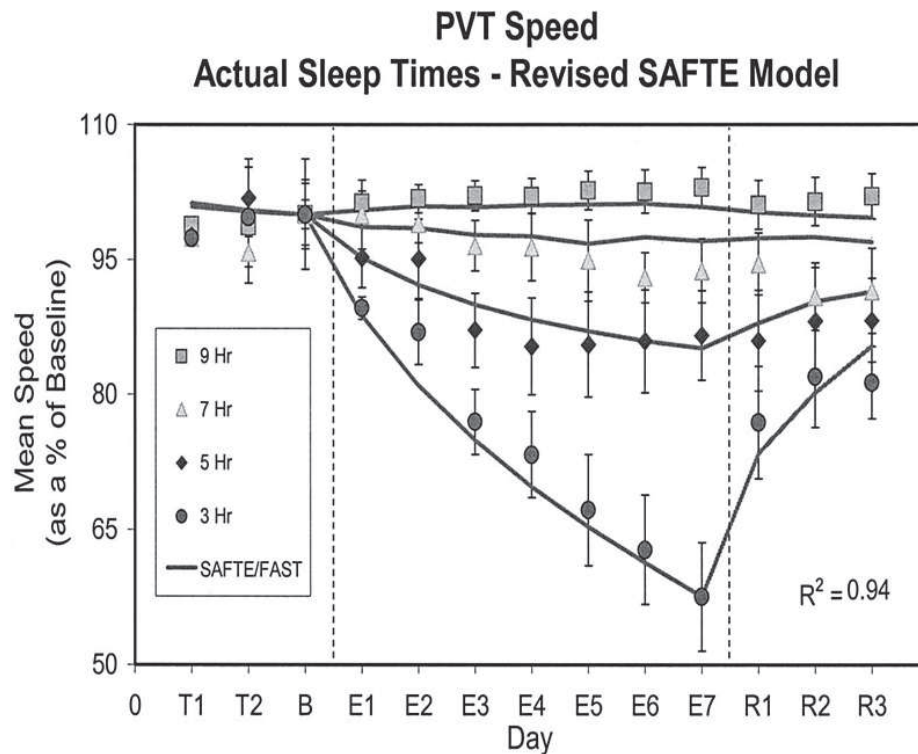


FIGURE 4.1: Cette figure montre l’application du modèle SAFTE de HURSH, REDMOND et al. (2004) sur l’expérience de laboratoire de BELENKY et al. (2003) présentée à la section 3.2 page 47 de ce mémoire. Pour les 4 conditions de temps de sommeil quotidien (3h, 5h, 7h et 9h), le modèle, représenté par les courbes noires, semble prédire correctement les performances moyennes quotidiennes.

## 4.6 Le modèle “Fatigue Audit Inter Dyne” (FAID)

Le FAID de ROACH, FLETCHER et DAWSON (2004) a été créé à partir de recherches existantes collectées au cours d’expériences contrôlées de laboratoire. Cependant, le modèle n’utilise pas le temps de sommeil comme une entrée (il s’agit d’une sortie), mais à la place le temps de travail. Le modèle a été développé pour les organisations qui emploient des travailleurs de nuit, pour l’industrie et pour aider les enquêteurs d’accidents. Le modèle FAID est actuellement utilisé par le Bureau Australien de la Sécurité des Transports (ATSB), par le bureau de la sécurité de l’aviation civile, par la

compagnie aérienne Quantas (ingénieurs de maintenance) ainsi que par les chemins de fer Australiens. Le modèle a la capacité d’être modifié en temps réel et a besoin des heures de travail comme entrée. La planification “court” sur 7 jours.

## 4.7 Le modèle “Circadian Alertness Simulator” (CAS)

Ce modèle de MOORE-EDE et al. (2004) a pour but l’évaluation du risque de baisse de la vigilance au travail. Dans le cadre de périodes de travail irrégulières, il peut être utilisé pour établir le risque de fatigue dans un contexte opérationnel, optimiser l’organisation des horaires de travail et rechercher l’implication de la fatigue dans la survenue d’accidents. Le logiciel adjoint est un simulateur de périodes de sommeil, de vigilance ainsi que d’accumulation de fatigue. Ce logiciel est utilisé entre autre par le Canadian National Roadway et les services de chemin de fer canadiens. L’utilisation des données en temps réel provenant d’un actimètre semble possible.

## 4.8 Le modèle “Sleep/Wake Predictor” (SWP)

Ce modèle de ÅKERSTEDT, CONNOR, GRAY et KECKLUND (2008) a été créé en utilisant les résultats d’expériences sur le sommeil altéré. Le modèle suppose une chute exponentielle de la vigilance au cours de l’éveil, une augmentation exponentielle de la vigilance au cours du sommeil, un rythme circadien de la vigilance avec un pic aux alentours de 17 heures, et un facteur d’inertie du sommeil exponentielle, avec un sommeil normal fixé à 8h au début de la simulation. Les cibles identifiées pour l’utilisation du SWP sont des chercheurs, les entreprises où les heures de travail sont irrégulières, et les organismes en charge de la sécurité et de la santé. L’interface du logiciel fournit en sortie les variables du sommeil (latence et durée), la vigilance et la performance, les risques d’accident et le pourcentage de la période à risque de somnolence (rendement). Le logiciel permet la mise à jour des données en temps réel.



## 4.9 Le modèle “ALERT”

L’objectif de ce modèle de GUNDEL, MARSALEK et ten THOREN (2007) est la prédiction de la somnolence et de la fatigue. Alert est étroitement lié au modèle TPM, mais un quatrième composant a été modélisé ; il s’agit de la durée de la tâche à accomplir (time on task). Si le sommeil n’est pas connu, il peut être estimé. Le modèle prédit la fatigue, la somnolence et les performances d’exécution. Le modèle est basé sur des données recueillies en laboratoire. Les domaines d’application sont la circulation routière, la stratégie militaire sur terre et en mer. L’objectif est d’améliorer le management, de réaliser des missions de consulting, d’offrir un outil de formation pour la gestion de la forme pour les conducteurs. Le programme prévoit des seuils différents de somnolence au-delà desquels le risque d’accident est trop élevé. Le modèle a été appliqué à différentes situations de travail en modifiant la variable de nature de la tâche dans les différents types d’opérations.

## 4.10 Modèle de “l’Université de Spokane”

Ce modèle de MCCAULEY et al. (2009) n’a pas encore d’interface utilisateur mise au point par les chercheurs. Comme pour le TPM, ce modèle n’est pas normalisé graphiquement ce qui lui octroie une grande souplesse. Toutefois il semble que l’entreprise Boeing utilise ce modèle dans son propre logiciel. Certaines études portant sur les liens entre la quantité de sommeil et les conséquences sur la fatigue chronique de BELENKY et al. (2003) et VAN DONGEN, MAISLIN et al. (2003) ont montré qu’il était nécessaire de prédire avec plus de précision (que les modèles cités ci-dessus) les effets cumulatifs des périodes de privation de sommeil sur les facteurs « neuro-comportementaux ». Ces études suggèrent un traitement supplémentaire du processus homéostatique sur le long terme, lorsque les restrictions de sommeil durent de quelques jours à quelques semaines. AVINASH (2005) n’avaient pas réussi à prédire simultanément les performances au cours de privation totale de sommeil et au fil des jours d’une restriction de sommeil. McCauley et ses collègues du Sleep and Performance Research Center de l’Université de Washington (Spokane, WA, USA) ont découvert une solution de modélisation à ce problème. L’objectif, outre de prédire, est d’améliorer la compréhension des effets du manque de sommeil sur les fonc-

tions exécutives et comportementales. La principale hypothèse de ce modèle est que le processus homéostatique est régi par deux sous processus biologiques pendant l'éveil et deux autres pendant le sommeil, interagissant de manière dynamique les uns avec les autres, et bornés par le processus circadien. Un des sous-processus est caractérisé par des constantes de temps de l'ordre de quelques heures, et l'autre par des constantes de temps de l'ordre de quelques jours. Une hypothèse biologique implique des mécanismes adénoenergiques.

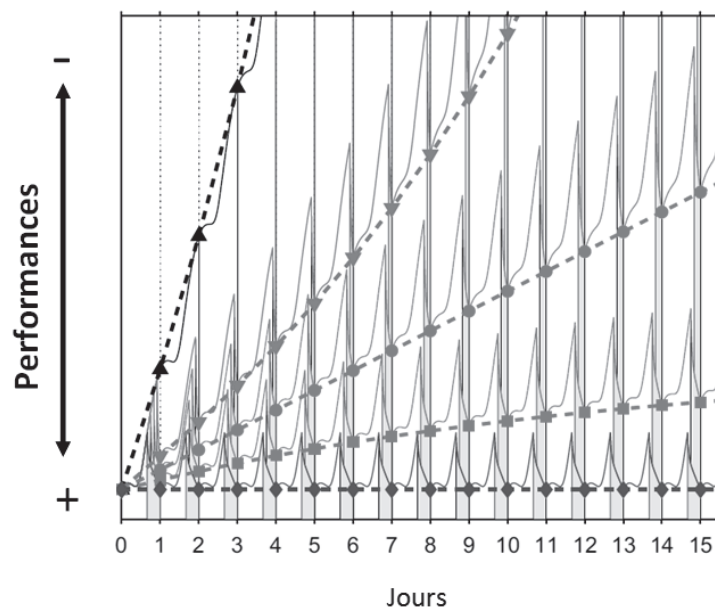


FIGURE 4.2: Cette figure présente les niveaux de performance en fonction du ratio veille/sommeil, tel que le modèle de MCCAULEY et al. (2009) le prédit au cours d'une période de 16 jours. Cette figure illustre également la « bifurcation » de part et d'autre du niveau de 20 heures d'éveil par 24h. Les changements de performances jour après jour sont illustrés par les lignes en pointillés, alors que les changements en cours de journée sont décrits grâce aux courbes fines. En partant du bas, les losanges représentent les performances pour 16 h d'éveil par jour. Les carrés 18h par jour et les ronds 20h d'éveil par jour. Les triangles gris (pointe vers le bas) 22h d'éveil par jour. En noir sont présentés les changements de performances pour une privation totale de sommeil. Les deux courbes du bas tendent vers un état d'équilibre des performances même lorsqu'il y a un manque de sommeil (carrés) les performances diminuent au fil du temps. Par contre, pour les deux courbes du haut, les performances ne tendent pas vers cet état d'équilibre.

Le sous processus avec la constante de temps la plus courte pourrait refléter la concentration extracellulaire d'adénosine (issu du métabolisme énergétique, voir J.

KRUEGER et al. (2008)).

Le sous processus avec la constante de temps la plus longue pourrait refléter une régulation par l'augmentation et la diminution des récepteurs de l'adénosine. L'augmentation de ces récepteurs de l'adénosine intervient en réponse à la perte de sommeil ce qui a pour effet une augmentation de la sensibilité à ce manque (BASHEER, BAUER, ELMENHORST, RAMESH & MCCARLEY, 2007). Ceci pourrait, selon les concepteurs du modèle, expliquer une part des sensibilités individuelles à la privation de sommeil (voir chapitre précédent) et surtout que la sensibilité d'une personne au manque de sommeil soit déterminé par l'alternance veille-sommeil préalable (RUPP, WESENSTEN, BLIESE & BALKIN, 2009) à court et à long terme.

Toutefois, la principale découverte des travaux de MCCAULEY et al. est qu'il y a une différence dans le comportement général du fonctionnement des deux sous processus. Cette différence, entre une privation de sommeil totale, une restriction sévère de sommeil et une faible diminution chronique de sommeil, se remarque au seuil d'environ 4h de sommeil par 24h, c'est ce qu'il a appelé la « bifurcation » (voir figure 4.2 page précédente). Cette théorie de la « bifurcation » a été confirmée par la confrontation aux données de deux publications majeures (BELENKY et al., 2003 ; VAN DONGEN, MAISLIN et al., 2003). Pour un temps au lit (lumière éteinte – Time in Bed) diminuant de 8 heures ou moins, jusqu'à 4 heures par jour, les performances baissent mais tendent vers un état d'équilibre sous optimal des capacités. Par contre, pour une restriction de sommeil mettant les sujets à moins de 4 heures par jour de temps au lit, les performances diminuent rapidement et ne convergent pas vers un état d'équilibre. Selon ce modèle, une ou deux nuits doivent suffire pour la récupération après une privation de sommeil aigue ou totale. Néanmoins, plusieurs nuits de récupérations sont nécessaires pour surmonter les effets de la restriction chronique même si une phase de sommeil plus longue a eu lieu au cours de la période de restriction (LAMOND, JAY et al., 2007 ; BANKS, VAN DONGEN et al., 2010). Enfin, ce modèle n'a pas pour vocation de fournir un niveau de dette de sommeil en tant que tel, mais plutôt de mettre en avant les changements physiologiques induits par la dette et par la récupération en fonction du ratio de temps de veille/temps au lit.

## 4.11 Sélection d'un modèle pour une application de terrain

Il existe deux méthodes pour choisir le modèle le plus approprié (LAWTON, CAMPBELL & MILLER, 2005). Tout d'abord, il est mieux de choisir le modèle qui réalise le meilleur ajustement aux données humaines pour un scénario de validation qui représente le mieux le scénario d'application. La deuxième méthode de sélection est de choisir le modèle qui est le meilleur dans la prédiction de la somnolence et de la performance dans les scénari se rapprochant le plus du scénario d'application.

## 4.12 Conclusion

Dans notre cas, puisque les mêmes marins en solitaire participent à des régates les privant totalement de sommeil (Solitaire du Figaro) ainsi qu'à des régates les restreignant chroniquement de sommeil (Transatlantique, Tour du monde), le meilleur modèle pourrait être celui de MCCAULEY et al. (2009) car il est sensiblement le plus avancé pour pouvoir prédire à la fois les conséquences de la privation totale et de la privation chronique. Ce modèle est également le plus souple pour la création de l'agenda de sommeil interactif car son interface n'est pas graphiquement normalisée. Le modèle de MCCAULEY prend en compte la chronicité de la restriction, ce qui nous paraît fondamental en ce qui concerne l'éducation à la santé puisque comme nous l'évoquions plus en amont, beaucoup de facteurs comme l'hypertension artérielle et les troubles du métabolisme énergétique, sont plutôt des effets à long terme de la privation chronique de sommeil.

# Les contre-mesures à la privation de sommeil

## 5.1 Management de la fatigue par l'utilisation de siestes courtes

La stratégie de la sieste devrait être une solution intéressante pour gérer la fatigue pendant un exercice soutenu. En effet, les siestes prophylactiques peuvent être utilisée lorsque la période d'éveil engendrera inévitablement une baisse prévisible de la vigilance et la performance (DINGES, ORNE, WHITEHOUSE & ORNE, 1987 ; DINGES, WHITEHOUSE, ORNE & ORNE, 1988). Mais, la stratégie de la sieste courte peut être également utilisée pour faire face à un besoin immédiat de sommeil afin d'interrompre de longues périodes d'éveil (NAITOH, 1989 ; NAITOH, KELLY & BABKOFF, 1993) dans les situations de crise (événement non prévisible) ou lorsque la charge de travail est extrêmement élevée. Enfin, la stratégie la sieste doit être utilisé pour accélérer la récupération après une privation de sommeil afin de diminuer rapidement la pression de sommeil homéostatique.

Généralement, la sieste peut améliorer considérablement la vigilance biologique et subjective ainsi que l'humeur (CALDWELL, CALDWELL & SCHMIDT, 2008). De nombreuses expériences ont été menées pour mesurer l'intérêt de sommeils courts mais de durées différentes. (ÅKERSTEDT & GILLBERG, 1986 ; BONNET, GOMEZ, WIRTH &

ARAND, 1995 ; TAKAHASHI & ARITO, 2000 ; HAYASHI, MOTOYOSHI & HORI, 2005). En résumé, plus le sommeil est long, plus l'amélioration des performances est grande.

Cependant, certaines études suggèrent que de courtes siestes peuvent être plus efficaces que des longues siestes (ou ne présentent pas de différences significatives de performances). En effet, STAMPI, MULLINGTON, RIVERS, CAMPOS et BROUGHTON (1990) ont montré que le sommeil polyphasique par des siestes de 50 minutes pendant la journée (après 4 heures d'ancrage de sommeil pendant la nuit) provoquait un phénomène d'inertie de sommeil sévère. Ce travail a également montré que des siestes de 20 minutes, qui avaient été pratiquement sans SLP (moins de 5% du temps de sommeil) avaient été plus efficaces pour faciliter la performance au réveil. TIETZEL et LACK (2001) ont également montré d'une part que l'inertie du sommeil se produisait à la suite d'une sieste de 30 minutes, alors que ce n'est pas le cas pour une sieste 10 minutes contenant que très rarement du SLP, et d'autre part que, même de très courte durée, ces siestes de 10 minutes avaient eu des effets positifs sur la performance de la journée. L'activité du SLP semble donc centrale dans la stratégie de durée de la sieste. En conclusion, bien que la sieste puisse améliorer la vigilance et la performance, elle peut avoir des effets négatifs sur la veille par le biais de l'inertie de sommeil. Il est également clair que la stratégie a deux conséquences positives et potentiellement négatives. Cela renforce l'idée que la combinaison de stratégies est le meilleur moyen d'optimiser la performance opérationnelle et la vigilance (ROSEKIND, SMITH et al., 1995).

## 5.2 L'Éducation au sommeil

Le rapport GIORDANELLA (2006), en France, présente les actions mises place en éducation à la santé sur le thème du sommeil. Ce rapport ministériel s'attache à proposer des axes de travail complémentaires ainsi que des voies d'amélioration des actions menées.

Plusieurs éléments de ce document ont attiré notre attention.

En effet, les experts (principalement des médecins et des chercheurs en santé publique) stipulent qu'un changement de comportements ne peut pas être obtenu par les seules actions d'information et de communication. Selon eux, ces changements sont le résultat d'un cheminement qui implique une sensibilisation préalable des

personnes, une appropriation par elles mêmes des connaissances et une auto observation qui débouchent sur une réflexion, une prise de conscience des avantages prévisibles, puis une décision de faire évoluer leurs pratiques pour mieux respecter leur propre sommeil et leurs rythmes biologiques. D'autre part, l'INPES dans son rapport sur le sommeil de 2008<sup>1</sup>, indique après une enquête réalisée auprès d'un échantillon représentatif de la population française, que les personnes en dette de sommeil y associent plus que les autres des représentations liées aux activités de détente et de loisir alors que les personnes ayant un sommeil suffisant font plus référence, comparativement aux autres, aux aspects fonctionnels et physiologiques du sommeil (« récupérer/recharger/réparer »). C'est donc par une phase de compréhension des mécanismes physiologiques que l'action éducative pourrait transiter, tel qu'avait pu le proposer ROSEKIND, GANDER et al. (1997). Pour sa part, la littérature scientifique suggère plusieurs méthodes qui pourraient permettre de mieux manager la restriction de sommeil, parmi lesquels on trouve l'accompagnement éducatif, l'utilisation de feed-back (retour sur expérience), l'utilisation des deux conjointement ou l'utilisation unique d'un matériel (un actimètre par exemple) (voir le travail de PHILLIPS et SAGBERG (2010)).

### 5.2.1 Actions et programmes éducatifs

De nombreuses actions éducatives sont rapportées dans la littérature. Ces actions sont menées de façons différentes, auprès des professionnels eux même ou auprès des managers des entreprises pour s'assurer des évolutions positives dans l'organisation du travail comme c'est le cas dans une étude réalisé simultanément au Canada et aux Etats Unis sur les transporteurs routier (SMILEY, 2002 ; SMILEY & SMAHEL, 2009). La plupart des programmes de formation sont des séances ponctuelles d'une durée de quelques heures. Dans tous les cas, les lignes directrices et les recommandations sont la sensibilisation aux problèmes engendrés par la fatigue ainsi que les connaissances générales concernant le sommeil et la fatigue. Le but de ces actions est de sensibiliser et de permettre d'améliorer les attitudes. Certaines entreprises comme Easyjet (STEWART & HOLMES, 2008) ont mis en place une formation en ligne<sup>2</sup>, mais

1. <http://www.inpes.sante.fr/70000/dp/08/dp080310.pdf>

2. <http://www.easyjetfact.com/>

il n'y a toutefois pas eu de rapports de l'efficacité de ces formations d'un point de vue individuel. Néanmoins, par exemple, pour mesurer l'effet de la formation pour les conducteurs de l'entreprise BP Oil en Nouvelle Zélande (GANDER, MARSHALL, BOLGER & GIRLING, 2005), les attitudes durant la formation, l'intention de comportement ultérieur, la fatigue subjective, et les connaissances avant et après l'intervention ont été évaluées de façon indépendante. Des mesures post-intervention ont été réalisées jusqu'à plusieurs mois après la formation. De façon encourageante, ces actions semblent entraîner une diminution la fatigue subjective et une augmentation des connaissances.

Même si le contenu de la formation peut varier, on y retrouve néanmoins des enseignements similaires dans tous les programmes. On peut prendre pour exemple celui de la NASA développé par ROSEKIND, NERI et al. (1994) (voir ci-après). En plus de sensibiliser sur les dangers de la fatigue, certaines actions ont également souligné l'importance de la nutrition et de la gestion du stress (GERTLER, 2002 ; G. KRUEGER et al., 2007). Plusieurs des programmes de formation fondés sur des preuves scientifiques sont donc basés sur des modules portant sur le risque de fatigue, la cause de la fatigue, le sommeil et les influences circadiennes ainsi les moyens efficaces pour lutter contre la fatigue (GANDER et al., 2005 ; ROSEKIND, NERI et al., 1994).

### 5.2.2 Le modèle éducatif de la NASA

Depuis 1980, la NASA (ROSEKIND, CENTER, AERONAUTICS, ADMINISTRATION & ADMINISTRATION, 2001) mène des recherches sur le sommeil, les rythmes circadiens, et la fatigue en opérations de vol. L'objectif initial du programme de Rosekind était de transférer vers l'industrie aéronautique les connaissances scientifiques et opérationnelles tirées des missions spatiales. Pour atteindre cet objectif, la NASA a créé un module de formation éducatif appelé "Stratégies pour la vigilance de gestion des opérations de vol". ("Strategies for Alertness Management in Flight Operations."). Ce modèle éducatif a été conçu pour répondre à trois objectifs :

- expliquer l'état actuel des connaissances sur les mécanismes physiologiques sous-jacents de la fatigue ;
- montrer comment ces connaissances peuvent être appliquées pour améliorer le sommeil, les performances et la vigilance de l'équipage ;



- apporter des recommandations.

Le modèle s'appuie sur deux outils d'intervention : une présentation de 60 minutes par une personne avertie spécialiste et un memento informatif. Le contenu global du module est divisé en trois parties :

- il apporte des informations de base sur le sommeil, sur la somnolence, sur les rythmes circadiens, sur la fatigue, et comment les opérations de vol affectent ces facteurs physiologiques ;
- il décrit les idées fausses sur le sommeil, la somnolence et la fatigue ;
- il indique les stratégies de gestion de vigilance, notamment par l'utilisation de siestes courtes (napping).

Le module est destiné aux pilotes, à la gestion du personnel, aux planificateurs et organisateurs des plannings, aux agents de bord et aux nombreuses autres personnes impliquées.

### 5.2.3 Approche individuelle

Toutefois ces actions pourraient sans doute encore plus être adaptées aux besoins individuels (PHILLIPS & SAGBERG, 2010) ; nous avons déjà souligné pourquoi les différences individuelles ne pouvaient pas être omises dans une intervention pédagogique sur le sommeil.

Il existe une étude d'approche exploratoire de formation modulaire qui a été adaptée individuellement (MACHIN, 2003). Cette formation s'est inspirée d'un modèle d'analyse transactionnelle du stress et a été utilisée dans une intervention auprès des chauffeurs d'une société de transport en commun australien (chauffeurs de bus). Une étude pilote a donc été réalisée pour développer des exercices de formation interactifs dans lesquels les conducteurs devaient porter des jugements sur leur manière de réagir personnellement dans différents scénarii engendrant de la fatigue. Les conducteurs donnaient des informations personnelles relatives à leur style d'adaptation et on leur demandait également d'évaluer l'efficacité de leur choix adaptatifs par rapport aux autres solutions proposées. Le but de ce programme était de faire réfléchir les conducteurs sur leurs propres stratégies de gestion de la fatigue et d'offrir des alternatives plus efficaces le cas échéant. Une évaluation indépendante de l'intervention a montré que la formation était bénéfique et améliorait les intentions

comportementales. Toutefois, aucune mesure de changement comportemental dans le contexte même de la profession de chauffeur n'a été décrite par cette étude.

#### **5.2.4 Actions éducatives accompagnées par des outils d'analyse**

Résumés par PHILLIPS et SAGBERG (2010) pour le Centre de Recherche des Transports Norvégien, 61 programmes pour le management de la fatigue ont été identifiés dans la littérature (principalement des actes de congrès), dont un français (MOLLARD et al., 2009) réalisé pour la compagnie aérienne Régional Airlines (Filiale d'Air France). La plupart de ces études, comme celle de MOLLARD et al., se sont attachées à optimiser les tableaux de services.

Dans ces études et dans le reste de la bibliographie, trois expériences ont particulièrement retenues notre attention car elles ont testé l'effet d'actions conjointes de feed back (ou retour sur expérience) et d'utilisation d'outils dédiés aux changements de comportements.

Dans l'une d'entre-elle (MOORE-EDE et al., 2004), des chauffeurs de camions de transport routier ont reçu un feed-back personnel par l'utilisation du logiciel de prédiction CAS (voir chapitre sur les modèles de prédiction de performances, section 4.7 page 63) ainsi que des conseils pour gérer leur propre fatigue. Le but de cette étude était de sensibiliser les conducteurs à leur score de risque encouru en lien avec la fatigue après une première évaluation d'un mois. Ce score, transmit aux chauffeurs par les questionnaires de l'entreprise, semble avoir été utilisé comme une base pour la gestion ultérieure, par le conducteur, de sa propre fatigue. Les conducteurs ont, par ce biais, été habilités à ajuster leurs heures de repos et se sont concentrés sur la façon de réduire leur score de fatigue. L'intervention semble être prometteuse, puisque les scores de risque ont diminué en même temps que les accidents et les blessures. Dans cette étude, il n'était toutefois pas possible au conducteur d'avoir le feed-back en direct et la relation avec les planificateurs de l'entreprise était centrale dans l'étude.

Dans une autre étude, un feed-back provenant de l'historique veille-sommeil enregistré grâce à un actigraphe a également été utilisé avec des conducteurs de train (PHILBRICK et al., 2004). En plus de bénéficier du retour de leurs données de sommeil, les conducteurs ont pu discuter des moyens de changer leurs habitudes avec des spécialistes. Une pré-évaluation et une post-évaluation indépendante de l'inter-

vention sur les variables de stress, de fatigue, de satisfaction au travail, d'anxiété et de qualité de vie, n'a pas révélé de différences significatives entre le groupe test et le groupe contrôle. Toutefois, même si cette étude manque de précision en raison d'un nombre trop faible de participants ( $n=21$  au total), la démarche semble avoir permis aux participants de mieux auto évaluer leur niveau de fatigue.

Enfin, dans une étude chez les personnes âgées (GAURIAU, RAFFRAY, CHOUDAT, CORMAN & LAGER, 2007), la synergie d'un outil accompagné de séances éducatives a également fait ses preuves. Chez 26 participants, deux évaluations du sommeil ont été faites à l'aide d'un agenda du sommeil et d'un actimètre. Entre ces deux évaluations une journée de formation sur l'hygiène du sommeil a été réalisée. Après la formation, les participants avaient augmenté leurs temps de sommeil, et noté une *appréciation positive* de la qualité subjective de leur sommeil ainsi qu'une augmentation de leur dynamisme le matin.

### 5.2.5 Les coachs virtuels

#### Le Système Zeo®

Zeo® est un appareil récemment développé aux Etats Unis, en collaboration étroite avec des équipes scientifique de haut niveau, ce qui a particulièrement attiré notre attention. Avec cet appareil, il s'agit de mesurer et d'enregistrer les variables physiologiques du sommeil en utilisant un bandeau d'enregistrement EEG sans fil. Une fois ces variables enregistrées, elles peuvent être transmises sur un site Internet qui va compiler les informations. Ce site comprend un profil personnalisé de sommeil, un journal de bord, et un certain nombre d'outils permettant d'analyser tous les aspects personnels du sommeil. En outre, Zeo® dispose également d'un centre de commande de coaching du sommeil où il est possible de personnaliser 7 étapes d'un programme éducatif. Il examine les mesures passées et les plans d'action les plus pertinents pour l'utilisateur. Zeo® Software a été validé scientifiquement par comparaison avec la polysomnographie complète en laboratoire (WRIGHT, JOHNSTONE, FABREGAS & SHAMBROOM, 2008) dans une étude où l'objectif était de démontrer que la technologie de mesure utilisée dans Zeo® était fiable et précise. Les changements de comportements des utilisateurs ont été évalués dans une autre étude d'usage réalisée par le biais d'Internet, mais non publiée. En effet, les utilisateurs, présélection-

nés pour avoir exprimé des préoccupations au sujet de leur sommeil ou de faibles performances au réveil, se sont vu offrir un essai gratuit de plusieurs semaines. A la réception de l'appareil, une étude subjective par questionnaire portant sur la qualité du sommeil, la qualité de l'éveil et les connaissances générales au sujet du sommeil a été réalisée. Cette même étude avec le même questionnaire a été réalisée 6 semaines plus tard et a révélé des améliorations significatives concernant la qualité du sommeil, de l'éveil, ainsi que sur les connaissances et sur le sentiment de contrôle du sommeil. C'est la relation entre les facteurs de connaissances sur le sommeil, la qualité de l'éveil et du sommeil qui est mises en avant par ce produit.

### **La montre Vivago®**

Avec la même idée que celle des concepteurs de Zéo®, Vivago® a développé une montre actimétrique dont l'objectif est de permettre aux utilisateurs de gérer leur capital santé par une évaluation de la dépense calorimétrique (VANHELST et al., 2010) ainsi qu'a l'aide d'une mesure du sommeil. Initialement développée pour la surveillance de personnes âgées, l'objectif « wellness » est désormais proposé aux utilisateurs de la montre Vivago®. Concernant le sommeil, l'idée éducative directrice repose sur la définition d'objectifs quantitatifs quotidiens de sommeil. La quantité de sommeil enregistrée jour après jour est observable via une interface graphique. L'utilisateur, en téléchargeant lui-même les données provenant de la montre actimétrique, a la possibilité de comparer ces données avec les objectifs qu'il s'est lui-même fixé ou avec l'aide d'une tierce personne. Si le système de mesure du sommeil est validée (LÖTJÖNEN et al., 2003 ; LAMMINMÄKI, SAARINEN, LÖTJÖNEN, PARTINEN & KORHONEN, 2005), aucune étude, à notre connaissance n'a pu évaluer l'impact éducatif de ce système.

## **5.2.6 Des outils de gestion non validés**

### **Agendas de sommeil via internet**

L'agenda du sommeil électronique en ligne de BLAKE et KERR (2010) présente, selon ses auteurs, des avantages sur l'approche traditionnelle papier. En effet, l'étude de l'utilisation de ce système conclut que, pour un faible coût, les patients ont l'ap-

titude d'analyser leurs propres habitudes de sommeil (l'hygiène du sommeil) et de déterminer les facteurs influençant leurs habitudes. Selon Blake, cette connaissance conduit à une meilleure compréhension et adhésion entre patients et médecins.

L'agenda de sommeil SWES est également une application Internet dédiée à l'observation et à la gestion du rythme veille-sommeil. Cette application comporte également des tests pour mieux se connaître et surtout un agenda du sommeil qui permet d'évaluer le rythme veille-sommeil. Aucune étude de son utilisation n'est actuellement disponible.

L'application Cyclop's de l'entreprise Adsenso est un outil de formation multimédia interactif à la gestion du sommeil et de la vigilance en situations opérationnelles, initialement développé pour les personnels de l'Armée de l'Air Française soumis au décalage horaire. Son objectif est de présenter les notions importantes concernant le rythme veille-sommeil. Des solutions permettent à l'utilisateur de découvrir ou de perfectionner ses connaissances. Cette application n'a toutefois pas fait l'objet de test, ni au niveau de la mesure du sommeil, ni au niveau de son impact.

### **Les applications pour smartphone**

Une application pour Iphone®, peu coûteuse, se nommant « Sleep cycle alarm clock » vient d'apparaître sur le marché. L'application est développée par une société suédoise Lexware Labs AB. Avant tout, cette application utilise les propriétés de l'accéléromètre de l'Iphone® qui détecte les mouvements du dormeur lorsque l'appareil est posé sur le lit. Le constructeur affirme qu'il détecte les cycles de sommeil après quelques nuits de réglages, mais aucune étude de validation ne semble disponible. En effet, sur le plan technique un accéléromètre ne peut donner des informations sur les stades de sommeil. Seuls les deux états, de sommeil et d'activité, peuvent éventuellement être définis (voir section 2.1.2 page 24). L'idée originale des développeurs est de détecter des éveils et de coupler cela avec une alarme, pour favoriser le réveil à un moment où le dormeur est spontanément plus proche d'un stade de sommeil léger afin d'avoir un éveil plus agréable et donc de limiter le phénomène d'inertie hypnique. Selon le Docteur Royant-Parola<sup>3</sup>, même après une période obligatoire de calibration, les résultats obtenus sont moins fins que ceux obtenus avec un acti-

3. informations provenant du site <http://www.carevox.fr/sante-maladies/article/iphone-une-nouvelle-application>

mètre, mais sont intéressants pour avoir une première approche du sommeil chez un patient qui consulte pour des troubles du sommeil.

Une autre application (Sleep Bot Tracker Log) est disponible pour Android®. Toutefois, ces applications ne sont ni l'une, ni l'autre validées et sont des applications anglophones.

### **5.3 Conclusion**

Le management de la fatigue est une problématique largement traitée, compte tenu de son importance du point de vue de la sécurité et de la santé. Les actions et les programmes sont multiples, se basent principalement sur le transfert de connaissance du fonctionnement physiologique et seulement parfois sur la prédiction des états de fatigue en fonction du comportement prévu. Plusieurs systèmes sont intéressants tels que ceux décrits dans les dernières sections de ce chapitre. Toutefois, soit la technique utilisée dans les programmes éducatifs est difficilement accessible pour tous (c'est pour le moment le cas des systèmes prédictifs), soit les techniques "validées" restent onéreuses (Le système Zeo® coûte environ 200 euros, mais c'est aussi le cas de la montre Vivago®), soit les techniques sont très peu chères mais ne sont pas validées, c'est à dire qu'on ne sait pas jusqu'à quel niveau on peut se fier à leur mesure

## La navigation en solitaire et la privation de sommeil

### 6.1 Importance de la gestion de la fatigue en course au large

En course au large en solitaire, les performances des skippers doivent être soutenues pour une durée allant de quelques jours à plusieurs mois. Assurer sa sécurité dans des conditions d'exercices extrêmes associé à la motivation d'être le plus rapide imposent un manque de sommeil (BENNET, 1973). La course au large en solitaire semble avoir évolué parallèlement à l'évolution technologique des bateaux utilisés. Aujourd'hui, la force physique est nécessaire mais n'est plus indispensable comme le prouve la présence des femmes au plus haut niveau (l'anglaise Ellen McArthur dans le Vendée Globe Challenge en 2005 avait terminée à la seconde place). En fait, l'exploit sportif est plutôt désormais une relation intime entre les performances physiques et les performances cognitives. Dans la littérature, on trouvait jusqu'à présent peu d'études. Quelques unes datent des années 80 et 90 et avaient relativement bien détaillé le sommeil des marins lors de courses à la voile.

Toutefois, en vingt ans, la performance des marins dans un tour du monde en solitaire a progressé de 30 jours (gain du temps de 30%). Cette progression sera très certainement accentuée pour les éditions futures du tour du monde en solitaire ou

lors des courses transatlantiques.

La gestion de la fatigue devient donc, là aussi, un élément essentiel de la performance lors de la course à la voile, comme dans la majeure partie des opérations professionnelles d'intensité soutenue et prolongée (missions spatiales, opérations militaires, domaine de la santé etc...). En outre, les difficultés du sauvetage en très haute mer rappellent que les marins doivent prendre en compte une gestion rationnelle de leur fatigue avant et pendant leur traversée en voilier car ils ne peuvent pas compter sur une aide extérieure rapide. D'autre part, ces mêmes marins professionnels doivent effectuer des navigations lors de tout type de course et durant des durées différentes. Ils doivent donc développer des connaissances précises de leurs propres traits individuels. Les principales questions qu'ils se posent, et nous posent, sont :

- Quel est le bon rythme ?
- Jusqu'où la privation de sommeil pourrait elle être acceptable ?
- Quelle est la meilleure gestion de sommeil en fonction de la demande de l'environnement ?

Cependant, la gestion des risques dans ce sport n'a pas pris une grande importance dans la littérature en sciences du sport. Cela implique que, parmi les marins eux-mêmes, les idées d'aller vite pour gagner et de dormir peu sont inexorablement liées, ceci devenant probablement dogmatique. En trente ans, le nombre d'études publiées sur le sommeil et la performance des skippers est faible car il a toujours été techniquement extrêmement difficile d'obtenir des résultats précis et fiables, en combinaison avec un grand nombre de participants. Toutefois, dans toutes les études effectuées, les données enregistrées ont montré une privation de sommeil, mais seulement parfois de la fatigue.

## **6.2 L'Etude polysomnographique du sommeil des marins en course**

TIBERGE (1992) avec son équipe est le seul à avoir pu à notre connaissance et à ce jour, en course, enregistrer le sommeil des marins par la méthode « gold standard » qu'est l'enregistrement EEG polysomnographique. Cette étude a été réalisée lors de deux courses de 3 jours de la course estivale par étape "La Solitaire du Figaro". Après



de lourdes difficultés méthodologiques, les données complètes du sommeil de 5 marins on été exploitables. Le temps de sommeil total (TST) moyen quotidien a été très court, aux alentours de 2,5 heures par jour, étalées sur l'ensemble du nyctémère, et comportant entre 8 et 40 siestes. Le nombre de siestes semble avoir été fonction de la variabilité individuelle des skippers. Le sommeil a été principalement enregistré pendant la nuit, mais des siestes ont aussi été enregistrées le jour. Le sommeil paradoxal (SP) est en faible quantité et a même parfois manqué sur certains enregistrements. Le SP est apparu surtout en fin de nuit et pendant les périodes de repos du début d'après midi, ainsi qu'au cours des plus longues siestes. Toutefois, des micros sommeil en stade 1 (sommeil lent léger), d'une durée de 1 à 6 minutes, ont été enregistrés principalement dans l'après-midi, mettant en évidence la lutte contre le sommeil et le désir de rester éveillé pour faire avancer le bateau au maximum de ses capacités. Dans cette étude, aucune relation entre la durée du temps de sommeil et la performance sportive n'a été mise en exergue.

### **6.3 L'étude polysomnographique du sommeil des marins en entraînement**

Bien que la réponse au manque de sommeil soit généralement associée à des troubles cognitifs, une quantité suffisante de sommeil polyphasique semble sauvegarder (ou tout au moins de préserver partiellement) le skipper des effets délétères de la privation. De la Giclais (DE LA GICLAIS, 1991 ; DE LA GICLAIS, TIBERGE, ARBUS & LÉGER, 2005) a réalisé des enregistrements EEG pendant des périodes de navigation d'entraînement de 2 à 4 jours. La faible quantité de sommeil et un sommeil de mauvaise qualité de la première journée a été observé, avec plus de sommeil léger. Ceci sous-entend, selon les auteurs, que les marins connaissent une période d'adaptation au sommeil polyphasique par un sommeil de mauvaise qualité. La composante psychologique stressante du marin qui prend la mer n'est toutefois pas discutée. Toutefois, après plusieurs jours en mer, l'enregistrement de la première nuit de récupération n'a révélé aucun rebond de sommeil à ondes lentes. Le TST relativement important lors du second nyctémère de navigation par exemple (voir étude de DE LA GICLAIS, LÉGER et TIBERGE (2001)), où près de 10 h de sommeil étalées en 20 siestes

ont été enregistrées), ne semble pas significatif du sommeil au cours d'une véritable course. Néanmoins, ces études montrent que l'adaptation au sommeil polyphasique a été finalement efficace sur le long terme.

## 6.4 Le sommeil des navigateurs en solitaire en course de longue durée

STAMPI (1989b) a été le premier à décrire le bénéfice d'un agencement du repos par l'usage de siestes pour réaliser des performances soutenues malgré la privation de sommeil. Son étude fournit encore aujourd'hui la référence majeure de l'étude des navigations à la voile au long court. Au cours de trois courses transatlantiques (*Ostar*, *Mini Transat* et *Round Britain Race*), Stampi a étudié le TST moyen des marins par questionnaire et entretiens. Son étude rapporte que les marins disent avoir dormi  $6,33 \text{ h} \pm 1,7$  heures de sommeil par jour, ce qui présentait une moyenne de sommeil en mer significativement différente de la moyenne à domicile (environ 7,5 heures par nuit). Là encore, le TST était étalé sur les 24 heures d'une journée, avec des siestes de 0,6 heures à 2,7 heures. Dans cette étude, une relation entre le classement à la fin de la course et le sommeil a été conclue par Stampi, en montrant un lien possible entre les performances en course, la courte durée des siestes et la durée totale du sommeil. Les marins les plus rapides seraient ceux qui étalent le plus leurs siestes et dormiraient le moins par 24 heures. Toutefois, à ce jour aucune autre étude n'a pu conclure sur ce lien.

Dans de nombreux cas relatés dans l'étude de Stampi, le besoin de sommeil n'a pas été en phase avec la possibilité de dormir. En effet, les caractéristiques environnementales ont parfois impliqué un sommeil temporairement anarchique, un désalignement circadien et de la privation de sommeil. KERKHOF (2009) a mesuré l'activité du poignet d'un marin au cours de la course transatlantique *Ostar 2009*. Cette étude, réalisée grâce à la technique de l'actimétrie, a montré une superposition des siestes avec les mesures de la lumière (un second appareil actimétrique avec capteur de lumière (voir chapitre 2.1.2 page 24), collé au hublot du bateau, a permis de définir la période de lumière et les bruits d'enregistrement actimétrique (dûs au mouvement du bateau). L'analyse manuelle de l'enregistrement a montré que, pendant les

22 jours de la traversée, les temps de sommeil quotidiens avaient diminué de 2 heures (6,5 heures) par rapport aux habitudes à la maison (8,5 heures). D'ailleurs, pendant la navigation, près de la moitié du sommeil était nocturne. La durée moyenne des siestes durant cette expérience avait été de 12 minutes.

## 6.5 Déficiences dues au manque de sommeil

La relation entre le peu de sommeil et les déficiences psychomotrices en course au large est encore plus rarement décrite et les données sont peu précises. En effet, les mesures en course sont difficiles à réaliser étant donné le stress constant de l'environnement et le dévouement total du skipper pour son bateau. Toutefois, plusieurs cas d'hallucinations auditives et visuelles ont été signalés dans une étude sur des courses courtes (FOISSAUD, 1986). Une étude d'un marin autour du monde en course sans escale (Vendée Globe 2004) a été réalisée par THEUNYNCK, HURDIEL, PEZÉ, ESTRUCH et BUI-XUÂN (2010) ; les résultats ont montrés que la fatigue subjective avait été influencée par le stress environnemental causant une forte restriction chronique de sommeil dans les mers du Sud. Le marin, à la longitude de l'Australie, par près de 50 degrés de latitude sud, avait connu une très importante déficience cognitive, perturbant fortement l'aspect sécurité de l'homme et de son bateau. Avant le travail personnel que nous vous présenterons dans cette thèse, nous ne connaissions pas d'autres études ayant mis en évidence des baisses de performances significatives, et surtout aucune n'avait jusqu'alors quantifié la fatigue des marins. De ce fait, il était encore possible de penser que ces marins étaient des êtres aux capacités exceptionnelles.

## 6.6 Des pistes éducatives de gestion de la fatigue

En règle générale, la question de la gestion de la fatigue est un élément central lorsque l'exercice est durable et lorsque l'environnement est hostile à l'exercice. Comme nous l'avons vu précédemment dans le début de ce mémoire de thèse, les principes de la fatigue physiologique sont bien connus et maîtrisés dans des modèles approuvés. Dans l'ensemble, les athlètes gèrent la fatigue de façon empirique

avec leur propre "feeling". Toutefois, l'étude du marin autour du monde réalisée par THEUNYNCK, HURDIEL, PEZÉ et al. (2010) avait montré qu'organiser une comptabilité des durées de temps de sommeil engendrait une baisse de la fatigue perçue, car ce skipper avait augmenté ses temps de sommeil bien qu'il avait encore à effectuer le parcours difficile dans le sud de l'océan Pacifique jusqu'au Cap Horn. Theunynck conclut que, dans le cadre sportif et dans des conditions d'exercice difficile, un type de gestion basé sur une responsabilisation rationnelle peut être intéressant afin de limiter les risques induits par la perte de sommeil. STAMPI (1989b), pour sa part, avait indiqué que les navigateurs semblaient être plus attachés à un temps de sommeil moyen quotidien plutôt qu'à la durée des siestes. Toutefois, les marins interrogés avaient empiriquement détectés les périodes propices du nyctémère produisant le moins de problèmes au réveil pour le plus de récupération. Presque la moitié des marins interrogés estimaient en outre que le rythme circadien pour la sieste présentait des avantages, mais qu'il restait difficile de systématiser un rythme à cause de l'environnement changeant.

## 6.7 Conclusion

Comme dans les milieux professionnels identifiés dans le chapitre précédent, les navigateurs doivent gérer de façon complexe leur forme physique, cognitive et leur sommeil. D'autre part et compte tenu de cela, il est envisageable que les marins puissent fournir une population expérimentale de choix pour l'étude du management de la fatigue et pour l'élaboration de programmes d'apprentissage au management. Le nombre limité d'études descriptives du comportement de ces marins, toutefois, laisse la place à plusieurs interrogations, en particulier concernant la nature du sommeil à terre de ces sportifs, la rythmicité circadienne de leur repos en mer, l'influence de l'environnement sur l'accumulation de la fatigue et sur la manière dont nous pourrions les aider à optimiser la gestion du paramètre sommeil pour établir une performance de plus haut niveau.

## **Deuxième partie**

### **Contribution Personnelle**

# Introduction

La première partie de ce mémoire de thèse, a travers une revue bibliographique, nous a permis de constater que le manque de sommeil, qu'il soit aigu ou chronique, avait une influence sur la sécurité et la santé, individuelle comme collective. Ce déficit de sommeil peut être dû notamment à l'environnement, à la profession exercée ou s'inscrire dans le champ particulier de la course au large en solitaire. Cette revue de la littérature à également mis en évidence qu'il pouvait exister de fortes sensibilités individuelles au manque de sommeil, et que les contre mesures devraient donc s'appuyer sur des outils dédiés exclusivement au management individuel du sommeil. Certains outils existent déjà, mais sont onéreux, complexes, ou soulèvent des interrogations vis a vis de la fiabilité de leurs mesures et, ou, de leur efficacité éducative.

La deuxième partie de ce travail sera consacrée à notre contribution personnelle, qui aura donc pour objet la description des recherches réalisées pour créer et valider un modèle éducatif individuel et innovant de management de la fatigue basé sur un outil dédié.

Nous avons choisi de construire ce modèle à partir d'une population expérimentale particulière -les compétiteurs à la voile en solitaire- compte tenu de l'importance qu'a le facteur « privation de sommeil » pour eux. Ce modèle expérimental présente l'avantage de se situer à l'interface entre un modèle de laboratoire et un modèle de "vie réelle". Il nous est en effet possible de connaître les alternances d'éveil et de sommeil de nos sujets, qui évoluent seuls dans un milieu contraint –leur bateau- à un endroit connu et dans des conditions environnementales mesurables, tout en se soumettant volontairement à des restrictions plus ou moins importantes, aiguës et, ou, chroniques, de sommeil.

Nous avons été amenés à construire notre démarche de recherche en plusieurs

étapes complémentaires et successives.

Dans un premier temps, nous avons étudié les caractéristiques du sommeil de 24 marins lors d'une course transatlantique en deux longues étapes qui impliquent une réduction chronique des temps de sommeil. Nous avons complété ces données par l'analyse des modifications architecturales du sommeil de 12 skippers lors de la phase de récupération après une course courte mais comportant une privation quasi-totale de sommeil. Cette première phase avait pour objet de vérifier les caractéristiques et la qualité de notre modèle expérimental.

Dans un second temps, nous avons développé un outil de recueil des temps de sommeil qui soit plus précis que les classiques agendas de sommeil sur papier, qui comporte plus d'informations et soit surtout plus facile à exploiter. Cela a donné naissance à un outil informatique que nous avons testé versus l'actimétrie et l'agenda de sommeil classique (agenda papier) sur une population de 48 volontaires sains.

Une troisième étape a utilisé cet outil informatique chez 16 skippers lors d'une course de trois jours, en lui adjoignant un programme de calcul de prédiction de fatigue en temps réel et un test de vigilance (PVT). Nous souhaitions vérifier l'adéquation, entre le modèle de prédiction qui avait été testé dans le laboratoire qui l'a créé et les conditions réelles.

Une dernière étape a consisté à mettre en œuvre en conditions de course les résultats de l'ensemble de ces approches préliminaires ; un agenda électronique de sommeil et une formation à la gestion du sommeil ont été proposés à 32 concurrents de la « Route du Rhum 2010 », course transatlantique en solitaire. Les résultats des 14 sujets exploitables constituent une approche exploratoire qui permettra un développement de l'outil et du processus éducatif qui lui est associé.

La réalisation des études que nous vous détaillerons ci après a fait l'objet de deux demandes distinctes d'approbation au comité d'éthique local de Lille (Nord ouest IV), qui n'a vu aucune objection à la réalisation de nos études. Le consentement éclairé des sujets a été recueilli par la signature de lettres d'information.

## Validation de notre population expérimentale

### **7.1 Analyse des caractéristiques du sommeil et de la fatigue durant une course au large**

#### **7.1.1 Introduction**

Comme nous l'avons décrit dans la première partie de ce document, la navigation en solitaire est une activité sportive où la durée de course peut dépasser des semaines voire des mois et où les efforts demandés pour les marins sont extrêmes. Seules quelques études publiées sur ces solitaires ont fait état de leur sommeil pendant plusieurs jours au large (STAMPI, 1989b, 1989a; TIBERGE, 1992; GROSLAMBERT et al., 2008). De façon plus générale, la restriction de sommeil soutenue a été largement démontré comme une nuisance pour la vigilance, l'attention, la mémoire, l'humeur et pour les fonctions exécutives (CARSKADON & DEMENT, 1981; DINGES, F. PACK et al., 1997; BELENKY et al., 2003; VAN DONGEN, MAISLIN et al., 2003), le manque de sommeil peut donc également être un problème critique pour les navigateurs en solitaire en termes de sécurité comme cela est le cas dans plusieurs activités professionnelles (ÅKERSTEDT & WRIGHT JR, 2009; HAMAZAKI et al., 2011).

En raison de la difficulté inhérente à l'obtention de données sur le terrain pendant des courses en solitaire, les quantités de sommeil et les habitudes n'ont pas été clai-



rement documentées. Il n'y a pas non plus d'études publiées sur l'influence possible de la durée de la course (jours en mer), ni sur la fatigue, ni sur le sommeil. Les marins adoptent souvent une alternance d'éveil et de sommeil composé de nombreuses siestes ultra-courtes (STAMPI, 1989b). Toutefois, l'accumulation de quantités quotidiennes de sommeil en fonction de la durée de la course n'est pas connue. Une étude des habitudes de sommeil en voile en solitaire pourrait, apporter de nouveaux éclairages sur la façon dont les siestes peuvent jouer un rôle dans la gestion du sommeil au décours d'activités de longue durée (par exemple, dans l'armée, dans les navigations au long court sur les cargos, etc...).

D'autre part, les études publiées sur les marins solitaires en mer n'ont jusqu'à présent pas démontré un effet significatif de la perte de sommeil sur la vigilance, la performance ou la sécurité. Toutefois, THEUNYNCK, HURDIEL, PEZÉ et al. (2010) ont examiné un lien possible dans l'étude d'un solitaire lors d'une course de 104 jours autour du monde qui avait ouvert une réflexion éducative à l'origine de ce travail de thèse. D'ailleurs, la connaissance de l'impact possible du manque de sommeil sur la performance, lorsque les bateaux sont équivalents, n'est pas encore largement répandu chez les solitaires, où l'adage est que le meilleur marin est certainement le plus petit dormeur. En raison d'un manque de données convaincantes de l'effet contraire, ce point de vue persiste et nous pourrions être tentés de croire que ces hommes et ces femmes sont exceptionnels.

La complexité de la réalisation des études sur le sommeil et sur les performances dans les conditions extrêmes de navigation, rend difficile l'évaluation précise de la durée du sommeil et la mise en relations avec les déficiences fonctionnelles. L'actigraphie et la polysomnographie ont été utilisé lors des courses de voile, mais ces techniques se sont avérées difficiles d'utilisation pour mesurer la durée du sommeil en mer (STAMPI, 1989a; THEUNYNCK, HURDIEL, PEZÉ et al., 2010) en raison d'artefacts dus aux mouvements du bateau et de l'environnement humide. Pour la présente étude, nous avons utilisé un agenda de sommeil pour estimer les durées de sieste et pour enregistrer l'importance des déficiences fonctionnelles en temps réel, tout en répondant à la contrainte des solitaires c'est à dire la facilité d'utilisation. En outre, nous avons réalisé des entretiens post-course afin de vérifier et préciser le sommeil et les résultats concernant les déficiences fonctionnelles.

Le but de ce premier travail était d'examiner le sommeil et les déficiences fonc-

tionnelles (auto-déclaré) chez les marins en solitaire au cours de deux étapes d'une course transatlantique afin d'observer si ces sportifs pouvaient constituer une population expérimentale pour la suite de notre travail personnel.

Dans cette course, outre que les deux étapes impliquaient des durées en mer différentes, elle semblaient a priori comparables en termes de conditions et de charge de travail. Nous avons supposé que la voile en solitaire en mer impliquait un manque de sommeil et nous pensions que les résultats de l'état de vigilance seraient diminués, conduisant à des performances affaiblies et des menaces pour la sécurité. Autrement dit, nous avons émis l'hypothèse que les temps de sommeil ainsi que les troubles vécus et signalés varieraient en fonction de la durée des étapes et que les réponses fonctionnelles des navigateurs en solitaire au manque de sommeil correspondrait aux éléments de la littérature.

### 7.1.2 Matériel et Méthode

L'étude a été réalisée lors d'une course transatlantique en solitaire à deux étapes. Tous les marins utilisaient le même type de bateau (Mini de série de 6,50m) ce qui rend la course comparables entre les coureurs (un seul coureur durant la première étape a utilisé un bateau prototype, dont on pouvait penser qu'il serait un peu plus rapide que les autres sujets de l'étude). Les marins étaient sans assistance extérieure pendant toute la durée de la course. Ils recevaient deux fois par jour (11h TU et 19h TU un bulletin météorologique par radio).

Contrairement à d'autres courses transatlantiques, la route de cette course ne permet pas de grandes options stratégique, faisant naviguer tous les skippers dans des conditions de vent et de mer identiques et proche de la route orthodromique. La première étape de la course a débuté à 12h00 (midi) le 18 septembre 2007 à partir du port de La Rochelle, France. Elle a duré de 6 à 8 jours, couvrant plus de 1.100 miles nautiques, et a fini au port de Funchal, île de Madère, au Portugal. Après une période de repos d'au moins 11 jours (plus de temps pour les marins arrivant les premiers), la deuxième étape a commencé à 13h00 le 6 octobre 2007 à Funchal. Elle a duré de 18 à 24 jours, couvrant plus de 3.100 miles nautiques, et a fini au port de Salvador de Bahia, au Brésil.

Tous, les marins participant à la course ont été invités à participer à l'étude que

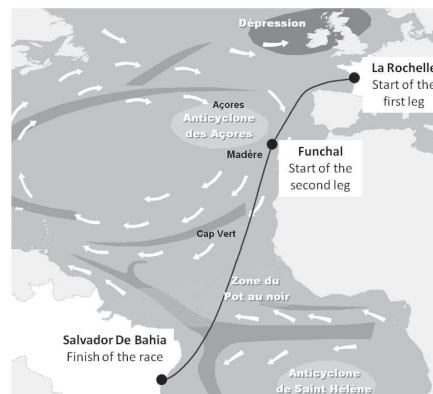


FIGURE 7.1: Cette figure présente le parcours de la Transat 650 dont le départ est donné en France et l'arrivée au Brésil. La première étape (plus courte que la seconde) amène les skippers au port de Funchal sur l'île de Madère, Portugal où ils se sont reposé durant environ 10 jours.

le personnel médical de la course a approuvé.

### Sujets

Au total, vingt-quatre marins en bonne santé et d'âge moyen (sur 89 marins en course) se sont portés volontaires pour l'étude. Un groupe de seize sujets a participé à l'étude de la première étape (courte) de la course. Tous ont accepté d'être étudiés au cours de la seconde étape plus longue. Huit marins supplémentaires ont rejoint l'étude au début de la deuxième étape. 16 sujets âgés de  $34,8 \pm 8,9$  ans (13 hommes, 3 femmes) ont fourni des données utilisables pour l'étude. Douze sujets ont fourni des données utilisables pour la première étape, et huit sujets ont fourni des données utilisables pour la deuxième étape. Quatre sujets ont fourni des données utilisables pour les deux courses.

Les sujets ont rempli un agenda de sommeil manuscrit pour noter leurs temps de sommeil et l'importance des déficiences fonctionnelles en mer. A l'arrivée de chaque étape, les marins ont été interviewés au sujet de leur sommeil et sur leurs performances, en reprenant les données des agendas de sommeil jour par jour et éventuellement en les complétant. Toutes les interviews (récits détaillés de la course) ont été enregistrées et menée par le même enquêteur.

### **Agenda et Interview**

Les lois maritimes obligent les marins à tenir un journal de bord pour garder une trace de la position (longitude, latitude) et des conditions environnementales, plusieurs fois par jour tout au long de leurs traversées. Nous avons développé un agenda de sommeil spécialement conçu pour les sujets, dans lequel chaque période de 24h était couverte par deux pages adjacentes pour l'enregistrement efficace des habitudes de sommeil polyphasique, des événements importants ainsi que leur position géographique et les conditions environnementales qu'ils rencontraient. (Voir figure 7.2 page suivante). Les sujets ont donc été invités à utiliser l'agenda de sommeil et le journal de bord comme un outil unique. Ils ont été invités à enregistrer leur temps de sommeil en heure locale (si cela n'a pas été le cas les heures ont été transformées en fonction de leur position connue) dès que possible et à chaque fois après avoir dormi. Ils ont également enregistré des conditions environnementales telles que la vitesse du vent et la hauteur de la houle mais aussi les incidents à bord, l'auto-évaluation des déficiences et les erreurs techniques.

Dans les 48 h après la fin de chaque étape, un entretien semi-directif a été mené avec chacun des sujets et enregistré. Les entretiens ont duré environ 1 h pour l'étape la plus courte (la première) et 2 h pour la plus longue. L'objectif de ces entretiens était de confirmer, le cas échéant, les informations des agendas de sommeil, afin d'obtenir les données décrites ci-dessous avec autant de précision que possible.

### **Traitement des Données**

A partir des agendas et des entretiens, les données suivantes ont été extraites :

- Heures et durées du sommeil : pour chaque sujet, le sommeil (polyphasique) a été comptabilisé en minutes de sommeil pour chaque bloc d'1 h de la journée sur tous les jours en mer.
- Troubles psychomoteurs : ont été retenus les graves erreurs techniques (omissions, maladresses et sévères « sorties de route »), la casse ou la perte de matériel (sauf pour les problèmes d'usure normale, problèmes électriques, etc), et les situations de risque vital (homme à la mer, feu à bord, etc).
- Les difficultés pour se réveiller : soit l'incapacité d'être réveillé par une alarme (avec le bateau à la dérive librement) mais également l'incapacité à distinguer

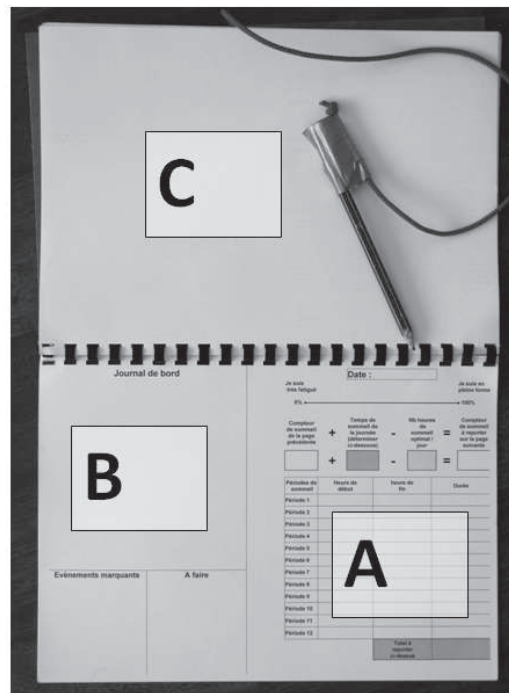


FIGURE 7.2: Cette figure présente l'agenda de sommeil pour une journée en mer. Dans la Zone A seront inscrites les heures de début et de fin de sommeil ainsi que la durée. Dans la Zone B la force du vent et la position (en haut), les déficiences et les événements (en bas). Dans la Zone C : notes libres (par exemple, le classement)

le rêve de la réalité (l'inertie du sommeil sévère) ont été retenus.

- Les expériences hypnagogiques : phénomènes hallucinatoires (par exemple, l'impression que le skipper n'est pas seul à bord, des visions et des délires) ont été enregistrés.
- Les troubles de l'humeur déclarés ont été également pris en compte.

Pour chaque étape de la course, l'analyse des données a débuté à 08 :00 le jour du départ, et s'est terminée à 08 :00 le jour où le premier marin fini. Les données recueillies par les autres sujets après que le premier marin ait eu fini la course ne sont pas utilisées pour les analyses. En somme, 5 périodes de 24 h ont été analysées pour la première étape et 20 pour la seconde.

Nous n'avons pas pu obtenir d'informations fiables en ce qui concerne les heures d'occurrences des troubles fonctionnels (troubles psychomoteurs, difficultés pour se réveiller, expériences hypnagogiques et troubles de l'humeur). Les données de déficiences fonctionnelles ont donc été comptabilisées par jours, défini de minuit à minuit, du premier jour de course à la veille du jour où le premier marin fini la course. Il y avait donc, comme pour les temps de sommeil, 5 jours d'analyse de données pour les déficiences fonctionnelles de la première étape et 20 pour la seconde.

### **Analyse Statistique**

Les données ont été analysées avec SAS 9.2 (SAS Institute Inc, Cary, NC). Les durées de sommeil ont été analysés par analyse de variance à effets mixtes (VAN DON-GEN, OLOFSEN, DINGES & MAISLIN, 2004) pour prendre en compte les aspects intra-sujet (mesures répétées) et les aspects inter-sujets de l'étude. Des analyses spécifiques (ANOVAs à effets mixtes) ont été réalisées pour examiner les différences de la course la plus courte par rapport à la plus longue, respectivement sur la quantité de sommeil totale quotidienne ainsi que sur la quantité de sommeil pris selon l'heure de la journée.

Les données des troubles fonctionnels de chaque étape ont été regroupés par sujets et ont été analysés par régression linéaire en fonction des journées passées en mer.

### **7.1.3 Résultats**

La durée moyenne de sommeil par 24 h était de  $248 \pm \text{min } 21$  ( $4,1 \pm 0,4$  h) dans la première étape de la course (courte) et  $276 \pm 21$  min ( $4,6 \pm 0,4$  h) dans la seconde étape (plus longue). La différence entre les deux étapes en ce qui concerne la durée moyenne générale du sommeil n'a pas atteint le seuil de significativité statistique ( $F_{1,5383} = 1,89$ ,  $P = 0,17$ ). Le classement de la course n'était pas significativement liée à la durée moyenne générale du sommeil, ni au cours de la première étape, ni au cours de la seconde ( $F_{1,5262} = 0,34$ ,  $P = 0,56$ ).

La durée moyenne générale du sommeil a sensiblement varié selon les jours ( $F_{19,5360} = 2,28$ ,  $P = 0,001$ ) mais il n'y a pas eu de différence significative entre les deux étapes de la course ( $F_{4,5360} = 0,30$ ,  $P = 0,88$ ). Voir figure 7.3 page suivante. Distinctement,

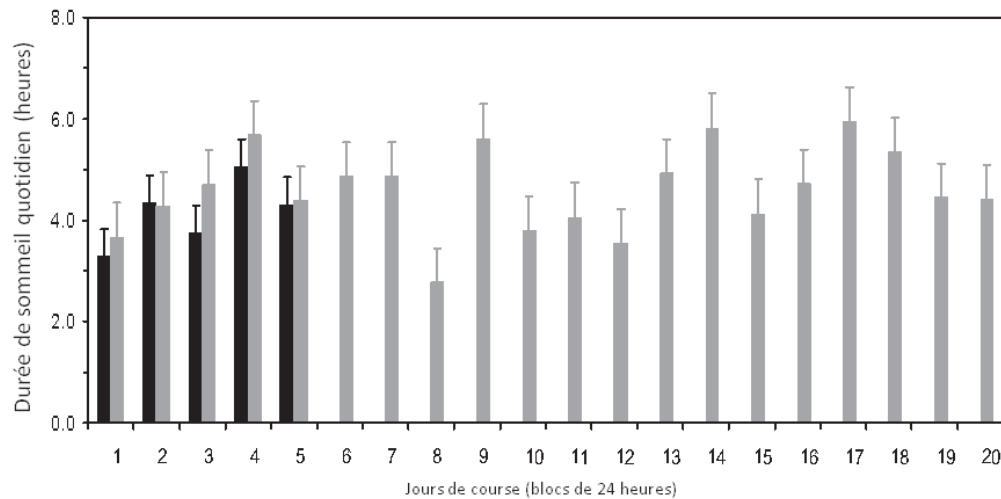


FIGURE 7.3: Cette figure illustre la durée du sommeil par jour de course. Les moyennes quotidiennes (et erreur-type) de la durée du sommeil sont présentés en fonction des jours (blocs de 24 h allant de 08 :00 à 08 :00), pour la première étape (en noir) et la seconde (en gris)

l'analyse révèle un rythme de 24 h en ce qui concerne la propension à dormir, observé en termes de nombre moyen de minutes de sommeil par bloc d'1h au cours de la journée ( $F_{23,5337} = 51.59$ ,  $P < 0,001$ ). La propension au sommeil était la plus élevée aux alentours de 03h00 du matin, avec un plus petit pic secondaire environ 12 h plus tard. Ce profil de propension de sommeil sur 24 h a différé significativement entre les deux étapes ( $F_{23,5337} = 3,76$ ,  $P < 0,001$ ), car on observe une augmentation de la propension au sommeil nocturne qui a commencé plus tôt (vers minuit) dans la seconde étape. (Voir figure 7.4 page suivante). Un total de 33 déficiences fonctionnelles a été rapporté par les 12 sujets dans la première étape au cours des 5 jours analysés. En revanche, un total de 21 déficiences fonctionnelles a été déclaré par les 8 sujets dans la deuxième étape au cours des 20 jours analysés. Le tableau 1 ( 7.1 page 96)

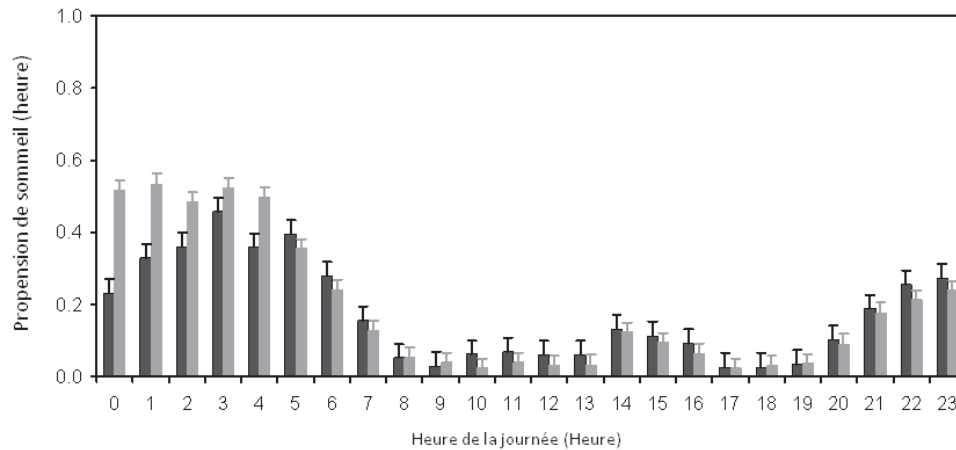


FIGURE 7.4: Cette figure illustre la propension au sommeil moyenne (et erreur-type) à travers les heures de la journée observée dans chaque bloc d'1 h pour la première étape (en noir) et pour la seconde (en gris).

montre la répartition de ces troubles parmi les catégories de déficiences psychomotrices, soit en termes de difficultés à se réveiller, d'expériences hypnagogiques, et de troubles de l'humeur. Pour les quatre catégories, les déficiences ont été signalées au moins trois fois plus souvent (par unité de temps) dans la première étape que dans la seconde. L'occurrence des déficiences fonctionnelles ont été analysés par régression linéaire pour chaque étape et par jours en mer. Il y a eu une augmentation significative de la fréquence des déficiences au fil des jours dans la première étape ( $F_{1,17} = 5,48$ ,  $P = 0,035$ ), mais pas dans la deuxième étape ( $F_{1,17} = 0,21$ ,  $P = 0,65$ ). (Voir Figure 7.5 page 97.

Ni les interviews ni les agendas de sommeil n'ont révélé de conditions atmosphériques particulières (comme une tempête) pendant aucune étape.



|                            | Première étape (courte) |                                     | Seconde étape (longue) |                                     |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
|                            | Nb d'évènements         | Nb d'évènements<br>moyen/sujet/jour | Nb d'évènements        | Nb d'évènements<br>moyen/sujet/jour |
| Déficiences psychomotrices | 15                      | 0,25                                | 12                     | 0,08                                |
| Difficultés de réveil      | 7                       | 0,12                                | 6                      | 0,04                                |
| Expériences hypnagogiques  | 5                       | 0,08                                | 0                      | 0                                   |
| Troubles de l'humeur       | 6                       | 0,1                                 | 3                      | 0,02                                |

TABLE 7.1: Nombre et fréquence des troubles fonctionnels dans les deux étapes de la course.\*  
Un total de 12 sujets x 5 jours = 60 sujet-jours ont été analysés pour la première étape, et 8 sujets x 20 jours = 160 sujet-jours ont été analysés pour la deuxième étape.

### 7.1.4 Discussion

Cette étude a contribué à l'acquisition de données précieuses concernant le sommeil mais aussi en ce qui concerne les déficiences fonctionnelles dans les courses au large en solitaire. Au cours d'une course transatlantique à deux étapes, les habitudes de sommeil polyphasique ont été fortement régies par le rythme circadien de propension au sommeil. Les portes primaire (nocturne) et secondaire (après-midi) du sommeil (Lavie, 1986) et la zone interdite pour le sommeil (le soir) étaient clairement présents (Figure 7.4 page précédente). En tant que tel, les marins sont donc soumis au même principe circadien du sommeil normal typique de l'homme adulte (BORBÉLY, 1982).

Dans la seconde étape de la course (étape la plus longue), la propension nocturne à dormir a commencé plus tôt que dans la première étape (plus courte). Cela peut provenir d'un effet de désynchronisation circadienne mineure, potentiellement associée à la traversée de plusieurs fuseaux horaires ou d'autres effets de zeitgeber (vacations radio par exemple) ou parce que la nuit commence plus tôt lorsque l'on s'approche de l'équateur comme c'est le cas dans la deuxième étape. Parce que les courses en solitaire constituent un environnement de recherche délicat, de plus dans de si petit bateau, aucune tentative simple ne pourrait être faite pour évaluer les marqueurs du rythme circadien. La mesure avec laquelle les sujets sont restés synchronisés n'est donc pas connue. Pourtant, le rythme circadien est prononcé en ce qui concerne la propension au sommeil au cours des deux étapes de la course, indépendamment de la durée de l'étape et la distance parcourue. Ceci suggère donc que les sujets ont continué d'être sensiblement synchronisés avec l'alternance jour-nuit

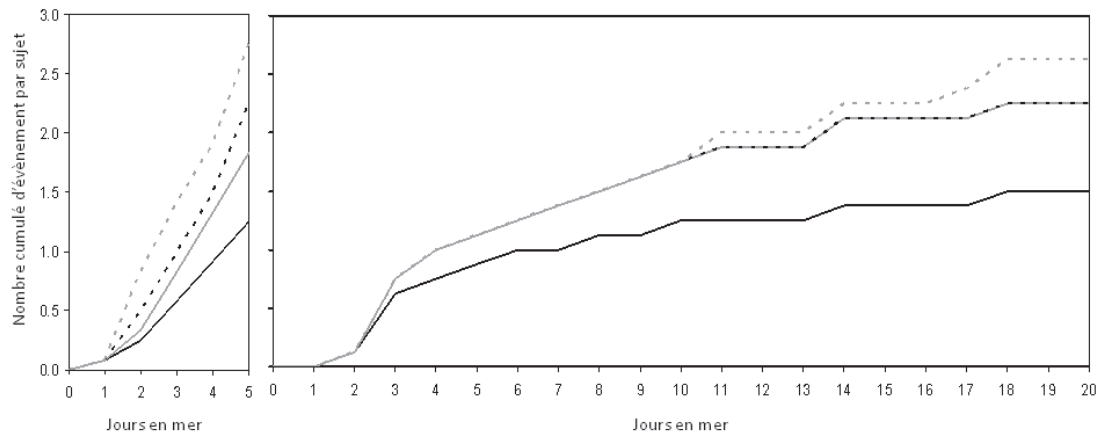


FIGURE 7.5: Nombre cumulé de déficiences fonctionnelles par sujet-jour dans la course. A gauche : la première étape (courte) avec 12 sujets. A droite : seconde étape (longue) avec 8 sujets. Les valeurs sont empilées. la courbe noire présente l'évolution des déficiences psychomotrices ; La courbe grise présente l'évolution des difficultés pour se réveiller ; La courbe en pointillés noirs, les expériences hallucinatoires et les pointillés gris, l'évolution des troubles de l'humeur

pendant toute la course, en accord avec KERKHOF (2009).

La moyenne générale de sommeil quotidien pendant la course à été (selon les individus) entre 4 et 5 h par jour (voir figure 7.3 page 94). Bien que les données de sommeil ont été seulement déclarées et n'ont donc pas pu être vérifiées de façon objective, une certaine confiance dans les résultats peut être déduite du fait qu'ils sont encadrés par les résultats rapportés par d'autres. STAMPI (1989b) a rapporté une durée moyenne du sommeil de 6,3 h par jour pour une course transatlantique de 31 jours (étude réalisée essentiellement à partir d'interviews avec 99 marins), et TIBERGE (1992), une durée moyenne du sommeil de 2,8 h par jour pour une course

de 3 jours en mer, chez 5 marins enregistrés par polysomnographie. Néanmoins, bien que cette restriction du sommeil sévère soit possible sur une période de 3 jours (VAN DONGEN & DINGES, 2003), une modélisation mathématique a récemment révélé qu'une durée de moins de 4 h de sommeil par jour ne serait pas viable sur de longues périodes (MCCAULEY et al., 2009). En ce sens, les sujets de cette étude pourraient avoir repoussé leurs limites jusqu'à un niveau qu'il semble juste temporairement possible de soutenir. Il convient de noter à cet égard que l'analyse n'a pas révélé de relation significative entre la durée du sommeil des sujets et leur classement dans la course alors qu'au départ leurs performances techniques (bateaux identiques) était les mêmes. On peut donc, par l'analyse de ces résultats, affirmer que le skipper le plus rapide n'est pas celui qui dort le moins, le contraire serait dogmatique.

Néanmoins, dormir entre 4 et 5 h par jour en moyenne est sensiblement inférieur à ce qui serait nécessaire pour maintenir le fonctionnement optimal du comportement neurologique au fil des jours selon certaines études (DINGES, F. PACK et al., 1997; BELENKY et al., 2003; VAN DONGEN, MAISLIN et al., 2003). Bien qu'il existe des différences individuelles considérable de vulnérabilité à la perte de sommeil (VAN DONGEN, BAYNARD et al., 2004), et même au sein de groupes « sélectionnés » opérant dans des environnements extrêmes (par exemple les pilotes de chasse), les individus ne sont pas systématiquement à l'abri de déficiences fonctionnelles dues à la perte de sommeil (VAN DONGEN, CALDWELL et al., 2006).

Surtout, comme nous l'avons montré à la section 3.4.3 page 48 de la première partie de ce document, il existe une divergence entre des performances subjectives et des évaluations objectives dans des conditions de privation de sommeil prolongée (VAN DONGEN, MAISLIN et al., 2003; AXELSSON et al., 2008). Les marins dans les courses en solitaire ne devraient donc pas compter sur leurs propres évaluations subjectives afin de savoir si ils peuvent renoncer ou non à dormir. Nous avons mis en place pour cette étude une évaluation uni quotidienne par Echelle Visuelle Analogique, mais par manque de précision sur l'heure d'enregistrement de l'état de forme subjectif (qui n'a pas été respecté et manque donc de fiabilité) cette analyse a été malheureusement abandonnée.

L'analyse des déficiences subjectives (voir tableau 7.1 page 96) a indiqué que les conditions de la course, sans doute par la perception de la durée de l'effort à te-

nir par les skippers, avaient eu un impact significatif sur le fonctionnement neuro-comportemental. La nature des déficiences est compatible avec les conséquences typiques de la perte de sommeil que l'on trouve dans la littérature (DINGES & KRIBBS, 1991 ; JACKSON & VAN DONGEN, 2011). La vitesse à laquelle des déficiences fonctionnelles ont eu lieu était plus grande (augmentation sur plusieurs jours) dans la première étape (courte) par rapport à la seconde (voir figure 7.5 page 97), même si au final de chaque étape le cumul de ces défaillances est le même. Faute d'éléments objectifs, la source de cette différence est spéculative, mais pourrait être liée à la préparation et à l'insuffisance de sommeil et l'agitation de la préparation d'avant départ. Cela semble être plus un problème de projection pour la plupart des sujets, qui sont souvent partis fatigués pour la première étape, en opposition à leur départ pour la seconde étape, après une pause relativement tranquille (par anticipation de la longue navigation qui les attendait). Il se pourrait également que les sujets passent par une phase d'adaptation au rythme marin de deux à trois jours (DE LA GICLAIS, 1991 ; DE LA GICLAIS, LÉGER et al., 2001) et qui engendrerait un cumul de fatigue et de défaillances que le skipper tente de stabiliser pour la suite de l'épreuve à un niveau lui permettant de rallier le port d'arrivée.

Toutefois, utiliser avec succès un équilibre optimal entre le temps d'éveil, d'une part, et le temps passé à dormir pour maintenir la capacité des performances optimales, d'autre part, pourrait donner en voile comme dans d'autres activités un avantage déterminant pour les performances et la sécurité. La question des heures de sommeil permettant d'atteindre une efficacité opérationnelle optimale a déjà été débattue (HORNE, 2010), abordée avec des schémas d'optimisation basée sur un modèle et théorisé (VAN DONGEN & BELENKY, 2011 ; VAN DONGEN, BELENKY & J. KRUEGER, 2010). Actuellement cette balance ne peut pas être facilement quantifiées.

Pour les marins, mais peut être pour d'autres professions où la restriction de sommeil est chronique, cette question pourrait être abordée heuristiquement par la notion de "Wakefulness Made Good" (WVG) (Meilleur compromis veille/sommeil) - analogue au terme utilisé en voile «Velocity Made Good" (VMG). Le VMG est la vitesse réelle projetée sur la route directe menant au point visé. Autrement dit, c'est la composante de la vitesse d'un bateau projetée vers l'arrivée lorsque la direction du vent ne permet pas de naviguer vers la destination finale en ligne droite. Dans de telles circonstances, un skipper doit trouver un équilibre optimal entre la vitesse

relative vers la destination et l'angle au vent, afin d'atteindre son but le plus rapidement. De même, le WMG implique qu'un skipper aurait besoin de trouver un équilibre optimal entre l'éveil (et donc le manque de sommeil) et l'efficacité du comportement neurologique, afin de naviguer plus efficacement. Plus la course est longue (ou plus l'opération professionnelle est longue), plus ce concept peut être pertinent, non seulement pour la compétitivité, mais aussi pour la sécurité. Ce propos pourrait être illustré par l'accumulation de fatigue (et donc de défaillances) plus rapide lors de la première étape que lors de la seconde, compte tenu de la perception de l'arrivée plus proche et donc d'un rythme plus élevé (Les temps de sommeil sont plus long de 30 minutes par jour en moyenne et le sommeil est favorisé en début de nuit lors de la seconde étape).

Enfin, il est probable que les différences individuelles concernant le sommeil et les effets de la privation de sommeil (VAN DONGEN, BAYNARD et al., 2004; A. TUCKER, DINGES & van DONGEN, 2007) conduiront à la variabilité de ce WMG parmi les marins. La faible fiabilité des estimations subjectives des besoins en sommeil et des effets de la privation de sommeil (voir VAN DONGEN, VITELLARO et DINGES (2005)) met l'accent sur l'importance du développement d'outils pour aider les individus à gérer objectivement leurs propres WMG. En milieu professionnel où les exigences de performances sont élevées et où les performances et la sécurité sont essentielles, des outils ont été développés dans le cadre de systèmes de gestion de la fatigue et des risques (ROSEKIND, SMITH et al., 1995; DAWSON & MCCULLOCH, 2005; CALDWELL, MALLIS et al., 2009; VAN DONGEN & BELENKY, 2011) mais il serait sans doute prometteur d'utiliser cette démarche en éducation à la santé de façon plus large. Un outil de gestion de la fatigue basé sur des modèles mathématiques capables de prédire la fatigue, une diminution du rendement due à la perte de sommeil (DEAN, FLETCHER, HURSH & KLERMAN, 2007; HURSH & VAN DONGEN, 2010) peut donc être particulièrement utile dans ce cadre. Il a été démontré que de tels modèles peuvent être adaptés de façons individuelles (OLOFSEN, VAN DONGEN, MOTT, BALKIN & TERMAN, 2010) et ils pourraient être mis en œuvre sur des ordinateurs de poche pour la planification et la surveillance en temps réel d'un état de fatigue. Considérant que le manque de sommeil à long terme implique des risques pour la santé dépassant le risque accidentel, un outil comme celui-ci pourrait être un modeste investissement.

## 7.2 Etude électroencéphalographique du sommeil des navigateurs

### 7.2.1 Introduction

Comme nous venons de le montrer dans l'étude précédente, la course à la voile en solitaire impose une restriction de sommeil aiguë ou chronique. La contre mesure utilisée repose sur des périodes de sommeil ultra courtes, afin de pouvoir exécuter au mieux les tâches cognitives et motrices de la navigation.

Généralement, l'architecture du sommeil de récupération suivant une restriction de sommeil est, selon les conditions de restriction, fortement modifié en comparaison du sommeil normal (BANKS, VAN DONGEN et al., 2010; ÅKERSTEDT, KECKLUND et al., 2009; BEERSMA et al., 1990). Dans certains cas, en mer comme dans les activités « terriennes », des périodes de privations de sommeil ou de restrictions de longues durées sont entrecoupées par des périodes de récupération. C'est par exemple le cas lors de la succession des quarts (périodes travaillées de 4 heures suivies de 4 heures de repos) sur des navires marchands, dans des conditions exceptionnelles d'exercice (opérations militaires ou de sécurité) ou lors de cycles de travail posté.

Il en est de même lors de courses par étapes à la voile en solitaire. En effet, lors de *La Solitaire du Figaro*, chaque été, 4 étapes de 48 à 72 heures (300 à 500 miles nautique chacune) sont disputées par 50 concurrents très entraînés utilisant exactement les mêmes bateaux (monotypie). Cette course engendre pour les skippers une privation de sommeil aiguë à chaque étape et une obligation de gérer la fatigue un mois durant; la durée moyenne d'éveil en mer est très élevée et atteindra souvent plus de 22 heures par jour (TIBERGE, 1992). TIBERGE (1992) avait effectué des enregistrements électroencéphalographie (EEG) de la récupération au cours de la première nuit après l'arrivée de ce type de course et avait observé un rebond de sommeil profond. Néanmoins, DE LA GICLAIS, LÉGER et al. (2001) a semblé ne pas en observer. Toutefois les durées de sommeil que les marins étudiés ont pris dans ces deux études ne sont pas du tout les mêmes, les marins de l'étude de TIBERGE (1992) ayant beaucoup moins dormi.

Puisque nous souhaitons valider une population d'étude avec des navigateurs

en solitaire, dont le sommeil est restreint et pour qui le management de la fatigue est central pour la performance (THEUNYNCK, HURDIEL, PEZÉ et al., 2010), l'objectif de cette seconde partie d'étude était donc de réaliser une observation descriptive de l'architecture du sommeil, tant diurne que nocturne, avant et après une course à la voile de courte durée. Nous souhaitions observer les caractéristiques de sommeil de cette population mais également observer les modifications architecturales du sommeil par rapport à une nuit de référence. Cette étude devait nous permettre définitivement de considérer que le sommeil des navigateurs ainsi que la réponse physiologique à la privation de sommeil induite par l'exercice ne diffère pas de ce que la littérature rapporte (voir chapitre de ce mémoire sur la privation de sommeil).

## 7.2.2 Matériel et Méthode

### Procédure

Au cours de l'hiver 2009, il a été proposé à tous les skippers de deux centres d'entraînement de haut niveau<sup>1 2</sup> de participer à cette étude. La première phase de ce travail était de réaliser un enregistrement polysomnographique ambulatoire d'une nuit au domicile des participants hors période de navigation. La seconde partie était la mesure des temps de sommeil en mer lors d'une course à la voile en solitaire. Enfin, nous leur avons proposé de réaliser l'enregistrement polysomnographique de toutes les phases de sommeil prises dans les 24 heures suivant leur retour au port.

### Sujets

12 skippers volontaires ( $30,4 \pm 7$  ans) ont accepté de participer à l'expérimentation et ont été enregistrés lors d'une nuit de base à domicile. 8 skippers ont accepté de participer aux phases suivantes de l'étude, mais seulement 5 d'entre eux ( $28,2 \pm 4$  ans) ont pu être inclus dans l'étude complète (abandon en cours de protocole ou défauts techniques d'enregistrement engendrant la perte de données).

- 
1. Pôle France de course au large, Port la Forêt, Finistère, France
  2. Pôle Espoir de Voile de Dunkerque, Nord, France

### **Description des deux courses étudiées**

Tous les sujets volontaires ont été testés avant, pendant et après une course de 300 miles nautiques (*Solo Macif Marine* – Les Sables d’Olonne ou *Select 6,50* – Pornichet). Pendant la course, tous les skippers ont utilisé soit des bateaux identiques de trente pieds monotypes (Bénéteau ®, Figaro 2, course dite *Solo Macif Marine*), soit des bateaux de 21 pieds (Mini, course dite *Sélect 6.50*). La durée moyenne des courses étudiées était de  $41,8 \pm 2,5$  heures pour tous, soit deux nuits passées en mer. Le départ des courses était donné à midi et la fin à eu lieu en fin de nuit, vers 5 heures du matin, pour la *Solo Macif Marine* et en début de matinée, aux alentours de 9 heures, pour la *Select 6,50*. Après la course, deux des 5 skippers complètement enregistrés n’ont pas dormi pendant la journée pour ranger les équipements du bateau et préparer leur retour à leur port d’attache.

### **Mesures réalisées**

Avant la course, la polysomnographie de base (PSG) a été réalisée au domicile de chaque sujet (Matériel Respironics Alice ® PDX), en respectant l’heure habituelle de coucher. L’activité électrique du cerveau pendant le sommeil de référence a été enregistré au moyen de deux signaux électro-encéphalographique (EEG) (C3/A2 ; C4/A1), un signal électro-myographique du menton (EMG) et un enregistrement électro-occulographique (EOG). Les sommeils de récupération ont été testés avec la même procédure (EEG, EMG, EOG appareil Embla ®, Flaga) au cours de chaque épisode de sommeil du premier nyctémère après la course. Les mises en place des enregistrements polysomnographique ont été effectués par le même expérimentateur. Le scoring a été réalisé par deux expérimentateurs ayant scoré tous les enregistrements en accord avec les recommandations de l’American Academy of Sleep Medicine (AASM).

### **Variables étudiées**

Les paramètres du sommeil ont été calculés pour chaque épisode de sommeil. Il s’agit de la période de sommeil totale (PST), soit le temps entre l’apparition du sommeil et de réveil final, et le temps de sommeil total (TST), c’est à dire la différence entre PST et la somme des éveils après l’endormissement (WASO). L’indice de



l'efficacité du sommeil (SE), c'est-à-dire le rapport TST / PST, a été calculé. La latence d'endormissement (SOL) et l'index de réveils nocturnes (AI) correspondant au nombre de réveils scorés par époque de 30 secondes par heure de TST ont été inclus dans l'analyse. Les durées relatives (% min et TST) par rapport à chaque stade du sommeil (N1, N2, N3 et REM) ont également été définies.

### **Mesures pendant la course**

Le même agenda du sommeil que pour l'étude précédente (mesure déclarative des durées et heures de sommeil - voir figure 7.2 page 92) conçu pour des conditions humides a été utilisé pour donner des informations sur la durée et l'heure du sommeil pendant la course. Ce même type d'agenda du sommeil avait été utilisé lors d'une course autour du monde (Vendée Globe 2004 ; THEUNYNCK, HURDIEL, PEZÉ et al. (2010)).

### **Analyses statistiques**

L'analyse des données s'est voulu descriptive. Toutefois, les effectifs étant faibles, nous avons choisi de traiter des résultats à l'aide de tests non paramétriques (test de Wilcoxon) pour comparer l'évolution des variables du sommeil avant et après la course.

### **7.2.3 Résultats**

Le détail des résultats d'enregistrement des nuits de base est présenté dans le tableau 7.2 page suivante.

Ces résultats montrent que la latence d'endormissement est de  $13 \pm 12$  minutes. Trois sujets n'ont pas donné d'information sur l'heure exacte de l'extinction de la lumière. Deux sujets ont des latences de 26 et 42 minutes. La période totale de sommeil est de  $468 \pm 77$  minutes, soit environ 7 heures 45 minutes entre le début du sommeil et l'éveil final. La durée d'éveil intra sommeil (WASO) s'élève à  $30 \pm 20$  minutes en  $26 \pm 10$  épisodes (NbA) et le TST à  $438 \pm 78$  minutes. L'efficacité du sommeil est de  $93,4 \pm 4$  %. Le temps passé dans les deux stades de sommeil léger est de  $7,4 \pm 5$  % pour le stade N1 et de  $47,5 \pm 8$  % pour le N2. Le sommeil lent profond (N3) occupe  $23,5 \pm 7$  % du TST alors que le sommeil paradoxal en représente  $21,6 \pm 7$ %.

| Sujets    | SOL<br>(min) | PTS<br>(min) | TST<br>(min) | N1<br>(%)   | N2<br>(%)   | N3<br>(%)   | REM<br>(%)  | AI<br>(nb/h) | WASO<br>(min) | SE<br>(%)   |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|-------------|
| A         | 10           | 506          | 506          | 7,4         | 41,1        | 26,6        | 25          | 2,1          | 13,5          | 97,4        |
| B         | 14           | 505          | 495          | 0,8         | 40,6        | 31,6        | 27          | 2            | 9,5           | 98,1        |
| C         | 42           | 560          | 537          | 2           | 51,1        | 24,1        | 22,8        | 2,9          | 23            | 96          |
| D         | 3            | 360          | 337          | 7           | 60          | 18          | 14,3        | 3,5          | 23            | 93,6        |
| E         | 3            | 548          | 474          | 10,5        | 52,1        | 20,4        | 17,1        | 3,8          | 75            | 86,3        |
| F         | <b>7</b>     | <b>515</b>   | <b>460</b>   | <b>17,2</b> | <b>46,6</b> | <b>16,7</b> | <b>19,5</b> | <b>6,7</b>   | <b>54</b>     | <b>89,4</b> |
| G         | <b>nd</b>    | <b>438</b>   | <b>419</b>   | <b>4,4</b>  | <b>38,9</b> | <b>26,1</b> | <b>30,5</b> | <b>2,6</b>   | <b>19</b>     | <b>95,7</b> |
| H         | <b>7</b>     | <b>501</b>   | <b>481</b>   | <b>13</b>   | <b>35,5</b> | <b>29</b>   | <b>22,5</b> | <b>3,2</b>   | <b>20</b>     | <b>96</b>   |
| I         | 9            | 507          | 484          | 11,4        | 44,5        | 15,8        | 28,4        | 2,8          | 23            | 96          |
| J         | 26           | 467          | 419          | 2,1         | 51,4        | 16,1        | 30,3        | 3            | 48,5          | 90          |
| K         | <b>nd</b>    | <b>401</b>   | <b>384</b>   | <b>10,4</b> | <b>57,8</b> | <b>24,5</b> | <b>7,3</b>  | <b>3,7</b>   | <b>17</b>     | <b>95,8</b> |
| L         | <b>nd</b>    | <b>309</b>   | <b>267</b>   | <b>2,2</b>  | <b>50,7</b> | <b>33</b>   | <b>14</b>   | <b>4,9</b>   | <b>42</b>     | <b>86,4</b> |
| Moy. (ET) | 13 (12)      | 468 (77)     | 438 (78)     | 7,4 (5)     | 47,5 (8)    | 23,5 (6)    | 21,6 (7)    | 3,4 (1)      | 30,6 (20)     | 93,4 (4)    |

TABLE 7.2: Caractéristiques du Sommeil à terre enregistré par polysomnographie ambulatoire au domicile des sujets. Les sujets ayant été enregistrés lors de la suite de cette étude ont leurs variables surlignées en gras ; La moyenne et l'écart type (Moy (ET)) de chacune des variables a été calculée.

Le détail des durées de sommeil en mer est présenté dans le tableau 7.3.

| Sujets           | PTS (min)        | Détail (Nb de siestes x durée (min)) | Hallucination |
|------------------|------------------|--------------------------------------|---------------|
| K                | 120              | 6 x 20                               | non           |
| B                | 390              | 13 x 30                              | non           |
| C                | 15               | 1 x 10 et 1 x 5                      | oui           |
| E                | 70               | 5 x 10 et 4 x 5                      | non           |
| F                | 20               | 2 x 10                               | oui           |
| <b>Moy. (ET)</b> | <b>123 (155)</b> |                                      |               |

TABLE 7.3: Période totale de sommeil pris en mer (PTS) et enregistré par agenda de sommeil. Plusieurs sujets ont eu des hallucinations au retour au port.

Les durées des siestes sont courtes, allant de 5 minutes de prise volontaire de repos à 30 minutes. Deux skippers n'ont dormi que 15 ou 20 minutes durant la course (skippers C et F), le skipper E a dormi 70 minutes, le sujet K a dormi 2 heures en 6 périodes. Seul le skipper B a nettement plus dormi que les quatre autres (390 minutes) en treize siestes. Les deux skippers ayant le moins dormi ont vécu chacun une période d'hallucination entre 5h et 6h (fin de deuxième nuit de restriction aiguë de sommeil).

Le tableau 7.4 page suivante présente le détail des enregistrements de toutes les périodes de sommeil de récupération au cours des 24 heures suivant l'arrivée au port.

Trois skippers ont été enregistrés dès le matin de leur arrivée (L, G, F) et les trois

| Sujets                      | Heure début | SOL (min) | PTS (min)         | TST (min)        | N1 (%)         | N2 (%)           | N3 (%)          | REM (%)         | AI (nb/h)      | SE (%)        |
|-----------------------------|-------------|-----------|-------------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|
| K                           | 00 :54      | 3         | 582               | 543              | 3              | 36               | 28              | 24              | 3,7            | 92,8          |
| L                           | 10 :42      | <i>nd</i> | 256               | 235              | 5              | 26               | 53              | 16              | 0,9            | 91,1          |
|                             | 23 :17      | <i>nd</i> | 603               | 578              | 2              | 50               | 16              | 33              | 1,6            | 95,7          |
| H                           | 00 :13      | <i>nd</i> | 507               | 482              | 6,5            | 34               | 30,5            | 21              | 2,6            | 94,8          |
| G                           | 06 :57      | 9         | 314               | 288              | 4              | 48               | 42              | 6               | 1,9            | 91            |
|                             | 01 :01      | <i>nd</i> | 220               | 200              | 3              | 14               | 50              | 33              | 1,4            | 90            |
| F                           | 07 :39      | 6         | 470               | 390              | 5              | 37               | 40              | 16              | 4              | 79,5          |
|                             | 01 :12      | <i>nd</i> | 352               | 352              | 11             | 43               | 30              | 16              | 3,2            | 96,2          |
| <b>Moyenne (Ecart Type)</b> |             |           | <b>660 (167)*</b> | <b>613(153)*</b> | <b>4,8 (3)</b> | <b>37,3 (5)*</b> | <b>32,4 (8)</b> | <b>23,2 (7)</b> | <b>2,4 (1)</b> | <b>92 (3)</b> |
| <b><i>p</i></b>             |             |           | <b>0,01</b>       | <b>0,02</b>      | <b>0,57</b>    | <b>0,01</b>      | <b>0,06</b>     | <b>0,84</b>     | <b>0,12</b>    | <b>0,67</b>   |

TABLE 7.4: Les moyennes et écarts type (Moy.(ET)) sont calculés pour la totalité du sommeil pris dans les 24 heures de récupération, sauf pour AI.

autres ne se sont couchés que le soir. En moyenne, dans les 24 heures suivant l'arrivée au port, la période totale de sommeil et le TST sont significativement plus longs que lors de la nuit de base (respectivement  $660 \pm 167$  minutes ;  $p = 0,01$  et  $613 \pm 153$  ;  $p = 0,02$ ) . Sur la période des 24 heures, la distribution des stades de sommeil, ne diffère significativement qu'au regard du stade N2 qui diminue ( $37,3 \pm 3\%$  ;  $p = 0,01$ ). L'augmentation du stade N3 n'atteint pas le seuil de significativité ( $32,4 \pm 8\%$  ;  $p = 0,06$ ).

Aucune autre valeur n'est significativement différente par rapport à la nuit de base.

#### 7.2.4 Discussion

Les enregistrements de l'architecture du sommeil par polysomnographie ambulatoire que nous avons effectués dans cette étude, montrent que les marins, au cours de la nuit de base, sont globalement de bons dormeurs (LANDOLT, DIJK, ACHERMANN & BORBÉLY, 1996 ; DAUVILLIERS & BILLIARD, 2004 ; BILLIARD & KENT, 2003). Compte tenu des valeurs enregistrées dans les différents stades de sommeil léger (55%), profond (23 %) et paradoxal (22 %), et compte tenu du nombre de réveils nocturnes enregistré relativement faible (moyenne de l'index de réveils nocturnes de 3,5 par heure de plus de 15 secondes). Toutefois quelques skippers ont été gênés, à cause de "l'effet première nuit", par l'appareillage lors de l'endormissement (LORENZO & BARBANOJ, 2002). Néanmoins, la latence d'endormissement est courte puisqu'en moins de 15 minutes, la presque totalité des skippers se sont endormis. Ceci est caractéristique

d'une population jeune (BONNET & ARAND, 1999) et d'une forte propension au sommeil intervenant naturellement à l'heure du coucher (LAVIE, 1997).

D'autre part, seulement 8 skippers ont accepté de réaliser le protocole jusqu'au bout, 3 d'entre eux ayant invoqué la probable gêne occasionnée par le matériel pour dormir correctement au retour de course. Les enregistrements de trois skippers lors de la phase de récupération ont été inexploitablement sans que nous puissions objectivement en déterminer les causes. Ceci souligne dans tous les cas les difficultés d'acceptation pour les sujets et de mise en place des enregistrements polysomnographique ambulatoires surtout lorsque les sujets sont dans un état de fatigue extrême et que le temps qui est offert pour réaliser la pose du matériel est très restreint. Par exemple, lors de l'arrivée de la *Solo Macif marine*, trois skippers très fatigués ont dû être équipés en moins d'une heure (skippers J, F et G) par l'expérimentateur.

Sur l'eau, même si nous supposons que des micros sommeil involontaires ou «sleep attack» (DURMER & DINGES, 2005) n'ont pas été enregistrées par les marins, les périodes de sommeil très faibles en course sont en accord avec la littérature (TIBERGE, 1992). Egalement, de graves conséquences cliniques sont observées puisque deux marins ont vécu des hallucinations, symptômes connus lors de la privation de sommeil et de l'isolement (ASAAD & SHAPIRO, 1986), ce qui montre comme dans l'étude précédente, que les skippers "flirtent" avec les limites physiologiques de leurs capacités cognitives.

Chez les sujets en bonne santé, il est admis que le sommeil est régulé par deux processus principaux (BORBÉLY, 1982; DAAN et al., 1984). Le processus homéostatique (S) dépend des quantités d'éveil et de sommeil. Pour qu'il n'y ait pas de dette de sommeil, l'augmentation de la pression lors de l'éveil doit s'équilibrer avec la dissipation exponentielle de la pression au cours du sommeil. Après une veille prolongée, l'architecture du sommeil est donc modifiée de manière à favoriser un rapide retour à l'équilibre normal (DIJK, HAYES & CZEISLER, 1993). Par conséquent, il est logique d'observer un rebond de sommeil profond lors de la récupération après l'arrivée, car la durée du sommeil dans la course étant très faible, la pression de S est très élevée lors des premiers sommeils de récupération. Toutefois, l'étude de la récupération après deux jours de forte restriction de sommeil ne montre pour cette étude qu'un rebond de sommeil en ce qui concerne le PTS et le TST. En dépit de la grande dette de sommeil, le sommeil profond ne montre pas ici de rebond statistiquement

significatif, peut être en raison du faible nombre de sujets étudiés. Cependant, une très forte tendance à l'augmentation du sommeil profond est observée, ce qui est largement en accord avec la littérature (FINELLI, BAUMANN, BORBÉLY & ACHERMANN, 2000), cette augmentation de sommeil profond, s'étant faite au dépend de la quantité de sommeil léger, puisque le pourcentage de stade N2 au cours des sommeils de récupération est significativement plus faible.

## 7.3 Conclusion

Ces deux premières phases de notre travail se sont attachées à montrer que les marins navigateurs en solitaire, à terre comme en course, répondaient aux mêmes principes physiologiques que ceux de l'être humain "normal". De façon générale, l'alternance spontanée de l'éveil et du sommeil suit une distribution circadienne et ultradienne tels qu'avait pu décrire la littérature. D'autre part, à partir d'un sommeil de bonne qualité à domicile, et lorsque le sommeil manque, les skippers connaissent eux aussi des défaillances à des degrés plus ou moins importants allant de simple troubles de l'humeur aux hallucinations.

Compte tenu de ces résultats, nous pouvons prétendre que ces sportifs peuvent constituer une population expérimentale pour la suite de nos travaux, même si, comme nous l'avons montré, des difficultés méthodologiques apparaissent. Nous avons pensé que ces difficultés pouvaient être limitées en créant une version électronique de l'outil de mesure (Agenda de sommeil), pour une saisie d'informations plus simple et répondant aux objectifs éducatifs par un caractère interactif. Toutefois, une étude de validation préalable de ce nouveau système de mesure nous semblait nécessaire et a fait l'objet de l'étude suivante.

# Validation d'un Agenda de Sommeil Électronique, le Scextan®

## 8.1 Introduction

En France, le sommeil est considéré comme étant une préoccupation de santé publique (LÉGER & OGRIZEK, 2009), mais les troubles du sommeil sont encore insuffisamment diagnostiqués et pris en charge (LEGER, 2008). Récemment, le groupe de travail pour l'information, l'éducation et la promotion de la santé (rapport GIORDANELLA (2006) insistait sur le besoin de sensibiliser et d'impliquer largement la population dans une démarche éducative individuelle. Ce rapport propose que la promotion se fasse par une auto-observation qui conduise à une prise de conscience, chacun prenant alors la décision de faire évoluer lui-même son respect des temps et des rythmes sommeil.

Le développement et la validation d'appareils qui enregistrent les paramètres du sommeil, facilement utilisables et de faible coût, sont donc d'un intérêt important pour la recherche sur le sommeil et pour l'éducation à la santé, ainsi que pour le management de la fatigue dans les milieux professionnels (MOORE-EDE et al., 2004).

Plus simple que la polysomnographie qui est admise comme la technique gold standard d'évaluation de l'activité veille sommeil (cf. chapitre 2.1.1 page 20), l'actigraphie (SADEH & ACEBO, 2002) est la technique de mesure objective répandue dans les recherches cliniques (voir également au chapitre 2.1.2 page 24). Son coût est plus

faible que la polysomnographie, et ce matériel permet un enregistrement de longue durée sans interférer avec la vie des sujets. La mesure, basée sur l'enregistrement du mouvement du membre auquel l'appareil est attaché, permet de distinguer indirectement la veille du sommeil.

Le téléchargement régulier des données actimétriques sur un ordinateur et l'utilisation d'un logiciel dédié peuvent éventuellement promouvoir une action éducative. En outre, il est largement conseillé (voire obligatoire) de tenir un cahier d'activité pour pouvoir traiter les données enregistrées et affiner l'observation (KUSHIDA et al., 2001 ; VAN DEN BERG et al., 2008b), et ce en complément de la mesure actimétrique. Le recueil de données d'évaluation de la veille et du sommeil sont donc essentielles pour de nombreuses recherches mais sont également très répandues auprès des médecins des centres hospitaliers, qui réalisent des observations du rythme circadien de leurs patients. Ces observations doivent être faciles, et le patient autonome durant plusieurs semaines.

On a donc recours dans ce cas à une solution plus légère, mais subjective : les agendas de sommeil manuscrits proposés par les différents réseaux de santé français ou étrangers (par exemple le *Réseau Morphée*, *Institut National du Sommeil et de la Vigilance*, *American Academy of Sleep Medicine* etc...). Ces agendas, desquels nous nous étions inspiré pour créer celui que nous avons présenté dans les études précédentes, ont été plusieurs fois comparés à la polysomnographie, à l'actimétrie ou à des questionnaires. Ils ont prouvé leur efficacité (LOCKLEY, SKENE & ARENDT, 1999 ; USUI et al., 1999) mais aussi parfois montré de lourdes imprécisions en termes de mesure (KAWADA, 2008 ; IWASAKI et al., 2010).

Les agendas de sommeil présentent d'autre part un inconvénient non négligeable pour les chercheurs et les médecins puisque les informations recueillies de façon manuscrite requièrent un travail considérable pour saisir les données. L'agenda de sommeil oblige souvent un vaste déchiffrement de l'écriture, et présente, bien sûr, les inconvénients standards de données subjectives, comme les défauts d'utilisation (MELTZER & MINDELL, 2007).

Dans nos études de terrain en conditions extrêmes, l'utilisation des techniques polysomnographique et actimétrique est rendue difficile par l'environnement (STAMPI, 1989a). Le temps que les participants peuvent dédier à nos études et à la saisie de données nous a ainsi conduit à développer notre propre outil de mesure, à cause

des conditions environnementales dans lesquelles les sujets évoluent obligent à une saisie simple et rapide des informations de sommeil (THEUNYNCK, HURDIEL, VAN-HELST et al., 2007) et présentent une problématique identique à celle rencontrée en pratique clinique. Nous avons donc été amené à développer un agenda de sommeil sur un support informatique et l'avons dénommé Scextan®. Avant d'en poursuivre le développement comme outil de mesure, de recherche et d'éducation au management de la fatigue et au risque opérationnel, nous avons réalisé une étude dont l'objectif a été de comparer le taux d'agrément entre les données recueillies par cette application, l'agenda de sommeil "classique" manuscrit et l'actigraphie.

## 8.2 Matériel et Méthode

### 8.2.1 Procédure

Pour prendre en compte le biais méthodologique de l'utilisation conjointe de l'agenda de sommeil manuscrit et de l'agenda de sommeil électronique (puisque un ordinateur de poche présente systématiquement une horloge à son utilisateur), deux groupes de participants ont été constitués selon leur ordre d'arrivée dans l'étude. Le groupe A a conjointement utilisé un Actimètre (ACT), un Agenda de Sommeil Manuscrit (ASM) ainsi que l'Agenda de Sommeil Électronique (ASE) Scextan® qui a été développé par notre laboratoire. Le groupe B n'a utilisé que l'Actimètre et l'Agenda de Sommeil Électronique Scextan®.

Les participants ont été conviés individuellement ou par groupe de 8 personnes maximum à une réunion d'information dans les locaux de l'Université du Littoral Côte d'Opale. Un entretien a permis au médecin chargé du bon déroulement de l'étude d'écartier, chez les volontaires, toute pathologie associée au sommeil. L'inclusion dans l'étude a été réalisée à la suite de cette réunion et les volontaires ont finalement accepté de participer à cette étude.

L'observation s'est faite en condition de vie réelle, c'est-à-dire qu'aucun aménagement de veille et de sommeil n'a été demandé au cours de la période d'étude. La durée de l'étude a été fixée à sept jours et sept nuits pour tous les participants. Les résultats des participants n'ayant réalisé le protocole que durant six jours ont aussi été inclus dans l'analyse.



### 8.2.2 Participants

De septembre 2010 à février 2011, 48 sujets se sont portés volontaires pour cette étude. Les 24 premiers participants ont été inclus dans un groupe A et les 24 suivant dans un Groupe B. Dix sujets (cinq dans chaque groupe) ont été écartés de l'analyse à cause de déviation de protocole (défaut d'utilisation d'une des méthodes de mesure). L'analyse des résultats de l'étude n'a été conduite, in fine, qu'au près d'un total de trente huit participants volontaires en bonne santé (21 hommes et 17 femmes ;  $29 \pm 9$  ans) habitant Dunkerque ou ses alentours.

### 8.2.3 Mesure Actigraphique

Il a été demandé à chaque participant de porter, en continu durant la période d'étude, une montre actigraphique (Actisleep, TheActigraph®, Pensacola, Florida, USA) au poignet non dominant excepté lors du bain, d'activités aquatiques ou de pratique physique pouvant porter atteinte au bon fonctionnement de l'appareil. Les échantillons de données sont tirés de l'accéléromètre à un taux de 30Hz, le dispositif ayant enregistré des époques de 60 secondes, il a stocké  $30 \times 60 = 1800$  échantillons par minute. Pour chaque époque, l'état de veille ou de sommeil a été déterminé par l'algorithme de SADEH, SHARKEY et al. (1994) que nous avons préféré à celui de COLE et al. (1992) compte tenu de l'âge de la population étudiée (SADEH, SHARKEY et al. avaient étudié des sujets de 23 ans en moyenne et COLE et al., des sujets de 50 ans en moyenne). Les données enregistrées ont été traitées automatiquement par le logiciel Actilife5 version 5.5.5 (TheActigraph®) qui a donné, pour chaque minute d'enregistrement, l'état de veille ou de sommeil du participant.

Les mesures des paramètres du sommeil ont été effectuées selon la méthodologie employée par SADEH, KEINAN et DAON (2004) comme suit :

- (a) L'heure d'endormissement (End) a été définie comme étant la première minute suivant l'heure de coucher (elle même définie par Scextan®) ayant été scoré comme du sommeil par l'algorithme, et qui a été suivie d'au moins 15 minutes de sommeil ininterrompu ;
- (b) la latence d'endormissement (LE) a été définie selon une durée entre l'heure de l'extinction de la lumière (définie par l'agenda de sommeil électronique) et l'heure d'endormissement ;

- (c) Le temps total de sommeil (TTS) est défini par la période de temps entre l'heure d'endormissement et l'heure de réveil final le matin ;
- (d) Le temps de sommeil vrai (SV) est le temps de sommeil total avec exclusion de toutes les périodes d'éveil ;
- (e) L'efficacité du sommeil (ES) est exprimée par le pourcentage du sommeil vrai par rapport au temps de sommeil total ;
- (f) Les réveils nocturnes (NbE) sont définis par le nombre de réveils qui ont duré 5 minutes ou plus, et qui ont été précédés et suivis d'au moins 15 minutes de sommeil ininterrompu ;
- (g) La somme de la durée des éveils nocturne (EvN) a également été calculée ;
- (h) Enfin, l'heure du réveil final (Rév) a été définie par la première minute du premier épisode d'éveil suivant le dernier épisode de sommeil.

#### 8.2.4 Agenda de sommeil manuscrit

Les participants ont utilisé l'agenda de sommeil du *Réseau Morphée* que nous avons analysé avec un intervalle de 15 minutes. Une explication de son utilisation a été donnée lors de la prise en main des outils de mesure et une fiche explicative a également été fournie avec l'agenda (fiche fournie par le *Réseau Morphée* conjointement à l'agenda). Les paramètres donnés directement par l'agenda de sommeil (End, Rév, NbE, Ev) ont permis de déterminer les paramètres (TTS et ES) indirectement.

#### 8.2.5 L'application Scextan®

(voir détail en annexes) Il a été demandé aux participants d'utiliser l'application Scextan®, disponible sur un netbook et développé en langage JAVA®, au coucher et au lever pour chaque jour de l'étude. Il était possible pour les participants d'utiliser leur propre netbook, s'ils en disposaient, ou d'utiliser un appareil du laboratoire. L'application Scextan® comporte les mêmes évaluations qu'un agenda de sommeil manuscrit. En temps réel, sont saisies les heures de mise au lit à l'extinction de la lumière par un click sur un bouton GO et de lever du lit par un click sur un bouton STOP. Entre les deux, l'application peut être fermée et l'appareil mis hors tension. Au réveil, sont saisies la latence d'endormissement (LE en minutes) (*En combien de temps vous êtes vous endormi ?*), le temps écoulé depuis l'heure de réveil (en minutes)

(*Depuis combien de temps êtes vous réveillé ?*), le nombre (NbE), les heures et la durée de chacun des réveils nocturnes (par méthode graphique) permettant de calculer le temps total d'éveil nocturne (EvN). Indirectement sont calculées, les valeurs de TTS et ES. Enfin, toutes les données saisies par l'utilisateur, soit dates, heures et valeurs, sont archivées dans un répertoire codé.

### 8.2.6 Analyse statistique

Il existe différentes façons de montrer un agrément entre plusieurs méthodes de mesure par l'analyse statistique. Quelques études ont ainsi uniquement utilisé les coefficients de corrélation pour décrire l'agrément entre deux méthodes de mesure du sommeil (TSUCHIYAMA, NAGAYAMA, KUDO, KOJIMA & YAMADA, 2003 ; LOCKLEY, SKENE et al., 1999). Toutefois, la seule utilisation du coefficient de corrélation ne nous semble pas suffisante puisque ce test statistique ne fait que montrer un lien linéaire entre deux variables sans pour autant prendre la grandeur des valeurs en ligne de compte. Ceci peut vouloir dire qu'il peut y avoir une très forte différence dans les valeurs de mesure entre les différentes méthodes et faire néanmoins apparaître un fort coefficient de corrélation. De plus, les études comparatives publiées utilisent quasi systématiquement pour chaque sujet les résultats moyens sur 6 à 7 nuits. Le coefficient de corrélation réalisé seul ne serait pas d'une grande preuve statistique pour montrer l'accord ou le désaccord entre les variables étudiées.

Nous avons choisi de comparer l'utilisation des résultats des moyennes par sujets sur 6 à 7 nuits mais également les résultats de toutes les nuits.

Après avoir vérifié la normalité des données recueillies, les variables du sommeil que nous avons obtenu par les trois méthodes citées ci-dessus ont été analysées par le coefficient de corrélation de Pearson et par la méthode proposée par BLAND et ALTMAN (1986). Cette technique est utilisée en l'absence de gold standard et considère séparément les mesures à opposer. Pour chacune des nuits de chacun des sujets, la moyenne des différences entre les variables, l'écart type des différences, les limites hautes et basses (moyenne  $\pm$  1,96 Ecart Type) et les différences minimum et maximums ont été calculées. La moyenne des différences est considérée comme le biais, c'est à dire la différence de mesure systématique entre les méthodes. Si la moyenne des différences est égale à zéro alors la concordance est parfaite, si elle est positive ou

négative, elle indique une surestimation ou une sous-estimation. 95% des différences seront comprises entre les limites haute et basse. L'étendue de cet intervalle doit permettre de conclure à l'interchangeabilité des méthodes ou non. Cette méthode a été utilisée pour l'analyse de l'agrément des variables de Temps de Sommeil Total (TTS), Nombre des Eveils Nocturnes (NbE) et l'Efficacité du Sommeil (ES). L'analyse de la Latence d'Endormissement (LE) a été uniquement réalisée entre l'Agenda de Sommeil Électronique et l'Actimètre (Groupes A et B).

Le test de Student pour échantillons indépendants a été utilisé pour comparer les moyennes enregistrées pour les sujets des groupes A et B. Cette analyse a été effectuée pour chacun des paramètres de sommeil enregistrés par l'Actimètre et par l'Agenda de Sommeil Électronique. Le test de Student pour échantillons appariés a été utilisé pour calculer la différence statistique de la mesure des variables entre les appareils. Les données ont été saisies et analysées dans et par le logiciel R.

### 8.3 Résultats

38 participants (21 hommes et 17 femmes) âgés de 20 à 55 ans (voir tableau 8.1) ont réalisé le protocole avec rigueur et n'ont pas révélé d'insomnie à l'enregistrement. 19 sujets font parti du groupe A et 19 autres du groupe B. Ces sujets sont jeunes pour la plupart, puisque 17 d'entre eux ont moins de 25 ans, 18 ont entre 26 et 40 ans et seulement 3 ont plus de 40 ans. Cent vingt trois nuits ont été traitées pour le groupe A et 126 pour le groupe B, soit une moyenne de 6,55 nuits étudiée par sujet.

|          | Hommes | Femmes | Age(années) | Méthodes    | Nb de Nuits |
|----------|--------|--------|-------------|-------------|-------------|
| Groupe A | 10     | 9      | 27±10       | ACT/ASE/ASM | 123         |
| Groupe B | 11     | 8      | 30 ±7       | ACT/ASE     | 126         |

TABLE 8.1: Caractéristiques des participants de l'étude de validation de Scextan®. Comme le montre ce tableau, le groupe A a utilisé un actimètre (ACT), l'agenda de sommeil Électronique Scextan®(ASE) et un agenda de sommeil manuscrit (ASM). Le groupe B n'a pas utilisé d'agenda de sommeil manuscrit.

Les moyennes et écart types des paramètres de sommeil mesurés par les trois méthodes sont présentées dans le tableau 8.2 page 117.

En moyenne, pour tous les enregistrements, les mesures des différentes variables ne sont pas statistiquement différentes entre les deux groupes ( $n=123$  et  $n=126$ ) qu'elles

soient mesurées par Agenda de Sommeil Électronique ou par Actimètre, excepté pour la mesure du nombre d'éveil nocturnes avec l'Agenda de Sommeil Électronique ( $p < 0,05$ ), le groupe A ayant mesuré plus de réveils nocturnes.

Pour le Groupe A (ACT+ASM+ASE), seules les variables en relation avec les éveils nocturnes (NbE, EvN et ES) diffèrent statistiquement de la mesure Actimétrique, qu'elles soient mesurées par n'importe quel outil subjectif. Pour le groupe B (ACT+ASE), toutes les variables diffèrent significativement entre l'Agenda de Sommeil Électronique (ASE) et l'Actimètre (ACT). Toutefois, il n'y pas de différence significative dans les variables entre l'Agenda de Sommeil Électronique et l'Agenda de Sommeil Manuscrit excepté pour le nombre de réveils nocturnes ( $p < 0,001$ ), l'ASE ayant mesuré plus de réveils.

L'étude de corrélation, dont la totalité des résultats est présentée dans le tableau 8.3 page 118, révèle un lien fort entre les paramètres mesurés par Actimètre et par l'Agenda de Sommeil Électronique, sauf en ce qui concerne les mesures dérivées des éveils nocturnes (NbE, EvN, SE). Les représentations graphique des corrélations du Temps Total de Sommeil (TTS), de la Latence d'Endormissement (LE), du Nombre d'Eveil nocturne (NbE) et de l'Efficacité du Sommeil (ES) sont présentée figure 8.1 page 119. Les résultats montrent une meilleure corrélation entre l'Actimètre et l'Agenda de Sommeil Électronique qu'entre l'Actimètre et l'Agenda de Sommeil Manuscrit. Les corrélations avec la mesure Actimétrique, entre les variables déduites ou mesurées liées aux éveils nocturnes, sont faibles pour les deux méthodes subjectives. Ces résultats sont identiques pour l'étude des nuits moyennées sur 6 à 7 jours comme pour l'étude détaillée.

La latence d'endormissement mesurée par l'Actimètre présente une bonne corrélation avec l'Agenda de Sommeil Électronique. La latence d'endormissement n'a pas été calculée pour l'agenda de sommeil manuscrit car dans l'étude nous ne pouvions la comparer de façon fiable à aucune autre méthode.

Comme pour l'étude de corrélation, l'agrément (BLAND et ALTMAN) est meilleur entre l'Agenda de Sommeil Électronique et l'Actimètre, qu'entre l'Agenda de Sommeil Manuscrit et l'Actimètre (voir Tableau 8.4 page 118).

Les résultats montrent que les agréments du TTS entre l'Agenda de Sommeil Électronique et l'Actimètre sont meilleurs lorsque la moyenne sur 6 à 7 nuits est calculée que pour toutes les nuits enregistrées par tous les sujets. Toutefois, selon les deux méthodes d'analyse, l'agrément du TTS est toujours meilleur entre l'Agenda de Som-

|                     |          | <b>Actim.</b> | <b>A.S.Élec.</b> | $p^b$ | <b>A.S.Man.</b> | $p^c$ | $p^d$ |
|---------------------|----------|---------------|------------------|-------|-----------------|-------|-------|
| <b>End</b> (h :min) | Groupe A | 0 :33(1 :18)  | 0 :30(1 :13)     | ns    | 0 :24(1 :12)    | ns    | ns    |
|                     | Groupe B | 0 :28(1 :50)  | 0 :23(0 :47)     | <.001 |                 |       |       |
|                     | $p^a$    | ns            | ns               |       |                 |       |       |
| <b>Rev</b> (h :min) | Groupe A | 8 :13(0 :37)  | 8 :14(0 :34)     | ns    | 8 :09(0 :40)    | ns    | ns    |
|                     | Groupe B | 8 :04(0 :47)  | 8 :08(0 :46)     | <.001 |                 |       |       |
|                     | $p^a$    | ns            | ns               |       |                 |       |       |
| <b>LE</b> (min)     | Groupe A | 25(12)        | 23(13)           | ns    | NA              | NA    | NA    |
|                     | Groupe B | 20(9)         | 15(9)            | <.001 |                 |       |       |
|                     | $p^a$    | ns            | ns               |       |                 |       |       |
| <b>TTS</b> (min)    | Groupe A | 459(54)       | 463(56)          | ns    | 464(49)         | ns    | ns    |
|                     | Groupe B | 457(38)       | 465(34)          | <.001 |                 |       |       |
|                     | $p^a$    | ns            | ns               |       |                 |       |       |
| <b>NbE</b> (#)      | Groupe A | 3,4(0,7)      | 0,4(0,4)         | <.001 | 0,1(0,3)        | <.001 | <.001 |
|                     | Groupe B | 3,5(1,3)      | 0,3(0,2)         | <.001 |                 |       |       |
|                     | $p^a$    | ns            | <.05             |       |                 |       |       |
| <b>EvN</b> (min)    | Groupe A | 31(14)        | 7(9)             | <.001 | 4(8)            | <.001 | ns    |
|                     | Groupe B | 30(13)        | 5(8)             | <.001 |                 |       |       |
|                     | $p^a$    | ns            | ns               |       |                 |       |       |
| <b>ES</b> (%)       | Groupe A | 93(3)         | 98(2)            | <.001 | 99(2)           | <.001 | ns    |
|                     | Groupe B | 94(3)         | 99(2)            | <.001 |                 |       |       |
|                     | $p^a$    | ns            | ns               |       |                 |       |       |

TABLE 8.2: Vue générale des valeurs moyennes (Moyenne( $\pm$  Ecart Type)) pour les variables mesurées par Actimètre, Agenda de Sommeil Électronique et Agenda de sommeil Manuscrit ; NA : Non Applicable ;

$p^a$  : seuil de significativité du t de Student sur échantillons indépendants entre les moyennes des groupes A et B pour chaque outil de mesure et chaque variable ;

$p^{a,b,c}$  : seuil de significativité du t de Student sur échantillons appariés calculés pour chaque variable et pour chaque groupe entre l'Actimètre et l'Agenda de Sommeil Électronique ( $p^a$ ), entre l'Actimètre et l'Agenda de Sommeil Manuscrit ( $p^c$ ), l'Agenda de Sommeil Électronique et l'Agenda de Sommeil Manuscrit ( $p^d$ ).

meil Électronique et l'Actimètre qu'entre l'Agenda de Sommeil Manuscrit et l'Actimètre, même si l'analyse du groupe B (ACT+ASE) montre une mesure moins bonne que pour le groupe A. (voir figures 8.2 page 120 et 8.3 page 121)

|            |                | ACT vs ASE        |                   | ACT vs ASM        | ASE vs ASM        |
|------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|            |                | Groupe A          | Groupe B          | Groupe A          | groupe A          |
| <b>End</b> | <i>Moyenne</i> | 0,98 <sub>a</sub> | 0,73 <sub>a</sub> | 0,37              | 0,4               |
|            | <i>Détail</i>  | 0,99 <sub>a</sub> | 0,98 <sub>a</sub> | 0,61 <sub>a</sub> | 0,61 <sub>a</sub> |
| <b>Rev</b> | <i>Moyenne</i> | 0,90 <sub>a</sub> | 0,97 <sub>a</sub> | 0,93 <sub>a</sub> | 0,86 <sub>a</sub> |
|            | <i>Détail</i>  | 0,99 <sub>a</sub> | 0,98 <sub>a</sub> | 0,81 <sub>a</sub> | 0,82 <sub>a</sub> |
| <b>LE</b>  | <i>Moyenne</i> | 0,89 <sub>a</sub> | 0,63 <sub>b</sub> | NA                | NA                |
|            | <i>Détail</i>  | 0,94 <sub>a</sub> | 0,94 <sub>a</sub> | NA                | NA                |
| <b>TTS</b> | <i>Moyenne</i> | 0,92 <sub>a</sub> | 0,79 <sub>a</sub> | 0,70 <sub>a</sub> | 0,75 <sub>a</sub> |
|            | <i>Détail</i>  | 0,98 <sub>a</sub> | 0,96 <sub>a</sub> | 0,78 <sub>a</sub> | 0,76 <sub>a</sub> |
| <b>NbE</b> | <i>Moyenne</i> | 0,2               | -0,02             | 0,26              | 0,59 <sub>b</sub> |
|            | <i>Détail</i>  | 0,13              | -0,08             | 0,04              | 0,09              |
| <b>Ev</b>  | <i>Moyenne</i> | 0,11              | 0,12              | 0,32              | 0,38              |
|            | <i>Détail</i>  | 0,21 <sub>c</sub> | 0,18 <sub>c</sub> | 0,22 <sub>b</sub> | 0,69 <sub>a</sub> |
| <b>ES</b>  | <i>Moyenne</i> | 0,08              | 0,29              | 0,25              | 0,38              |
|            | <i>Détail</i>  | 0,17              | 0,15              | 0,18 <sub>c</sub> | 0,69 <sub>a</sub> |

TABLE 8.3: Corrélations de Pearson de toutes les variables entre les trois types de mesure pour les valeurs moyennée pour chaque sujet ou pour le détail de toutes les nuits enregistrées ;

Valeur de la significativité du lien entre les variables : a :  $p < 0,001$  ; b :  $p < 0,01$  et c :  $p < 0,05$

|                  |                     | Valeurs Moyennes<br>Grp.A : n=19 ; Grp.B : n=19 |          |            | Détail des Valeurs<br>Grp.A : n=123 ; Grp.B : n=126 |          |            |
|------------------|---------------------|---|----------|------------|---|----------|------------|
|                  |                     | ACT vs ASE                                      |          | ACT vs ASM | ACT vs ASE  |          | ACT vs ASM |
|                  |                     | A   | B        | A          | A   | B        | A          |
| <b>LE (Min)</b>  | <i>Biais(ET)</i>    | 3,3(13)   | 4,1(6)   | NA         | -0,2(10)  | 5,6(12)  | NA         |
|                  | <i>Moy.+1.96 ET</i> | 29,9  | 15,5     | NA         | 20,1  | 29       | NA         |
|                  | <i>Moy.-1.96 ET</i> | -23,4   | -7,38    | NA         | -20,5   | -17,8    | NA         |
| <b>TTS (Min)</b> | <i>Biais(ET)</i>    | -3,9(7)   | -8,4(13) | -5(30)     | -1,8(12)  | -8,7(11) | -3,7(56)   |
|                  | <i>Moy.+1.96 ET</i> | 11,4  | 18,2     | 55,2       | 23,9  | 33,6     | 109,2      |
|                  | <i>Moy.-1.96 ET</i> | -19,4   | -35      | -65,3      | -27,4   | -51,1    | -116,6     |
| <b>NbE (Nb)</b>  | <i>Biais(ET)</i>    | 2,9(1)  | 3,3(1)   | 3,3(1)     | 2,9(2)  | 3,3(2)   | 3,2(2)     |
|                  | <i>Moy.+1.96 ET</i> | 4,4   | 5,9      | 4,7        | 6,7   | 7,7      | 7          |
|                  | <i>Moy.-1.96 ET</i> | 1,5   | 0,6      | 1,8        | -0,8  | -1,2     | -0,5       |
| <b>ES (%)</b>    | <i>Biais(ET)</i>    | -5,2(3)   | -5,7(4)  | -5,8(3)    | -5,1(6)   | -5,6(6)  | -5,9(6)    |
|                  | <i>Moy.+1.96 ET</i> | 2,5   | 1,3      | 0,7        | 6,3   | 5,7      | 0,7        |
|                  | <i>Moy.-1.96 ET</i> | -12,9   | -12,7    | -12,5      | -16,7   | -16,9    | -12,5      |

TABLE 8.4: Moyenne des différences systématiques entre les méthodes de mesure et limites d'agrément ainsi que des limites hautes et basses, soit Moyenne  $\pm 1.96$  Écart Type

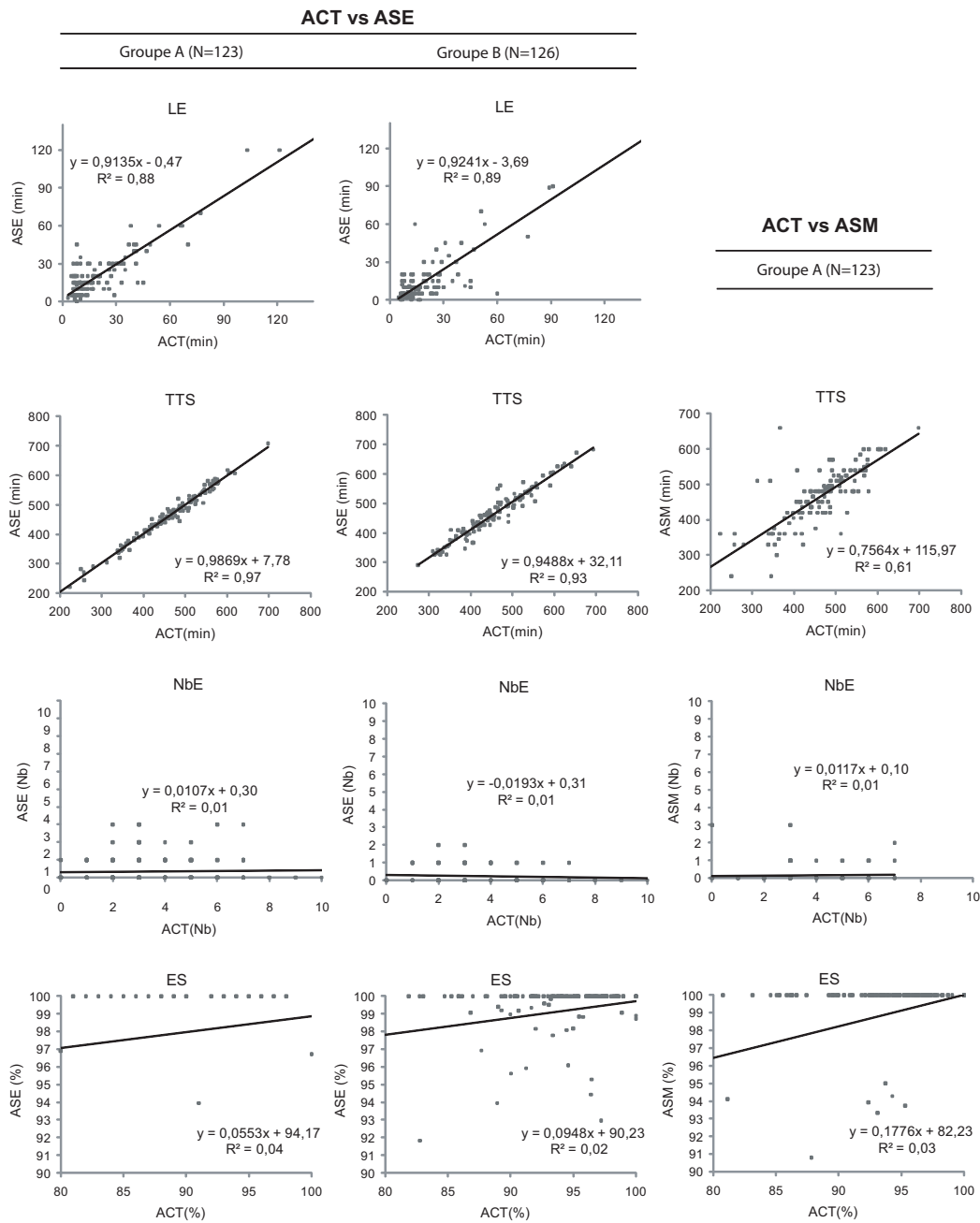


FIGURE 8.1: Représentations graphique des corrélations entre l'Actimètre (ACT) et les deux méthodes subjectives ASE et ASM pour les mesures des variables Latence d'Endormissement (LE), Temps Total de Sommeil (TTS), Nombre d'Eveils Nocturne (NbE) et Efficacité du Sommeil (ES), pour toutes les nuits enregistrées par les sujets.



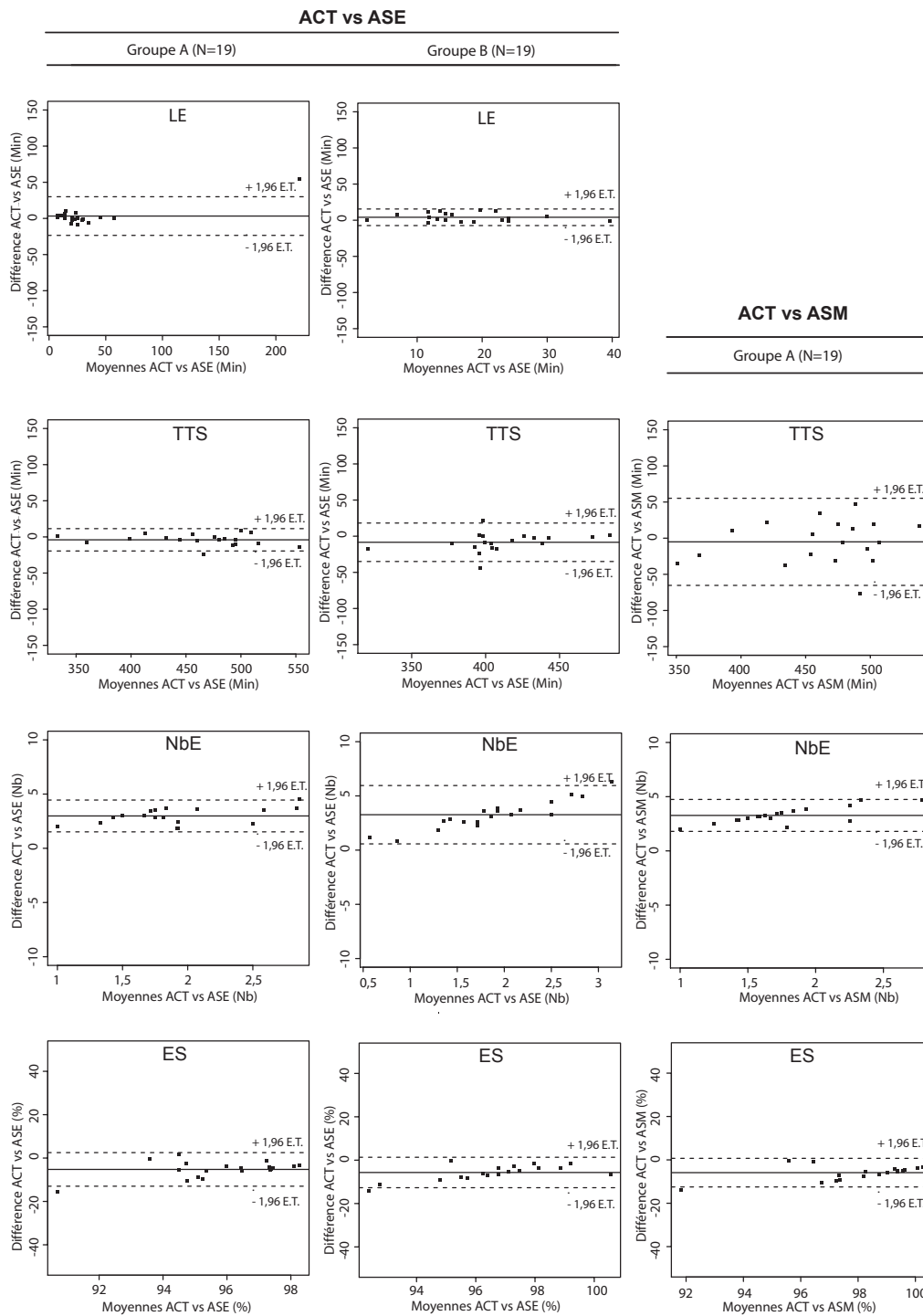


FIGURE 8.2: Représentation graphique de l'analyse par la technique de Bland et Altman pour le traitement des nuits moyennées pour la Latence d'Endormissement (LE), le Temps Total de Sommeil (TTS), le Nombre d'Eveils Nocturnes (NbE) et pour l'Efficacité du Sommeil (ES). On observe un meilleur agrément du TTS de l'Agenda de Sommeil Électronique que de l'Agenda de Sommeil manuscrit vis-à-vis de la mesure Actimétrique, quelque soit le groupe de mesure A ou B.

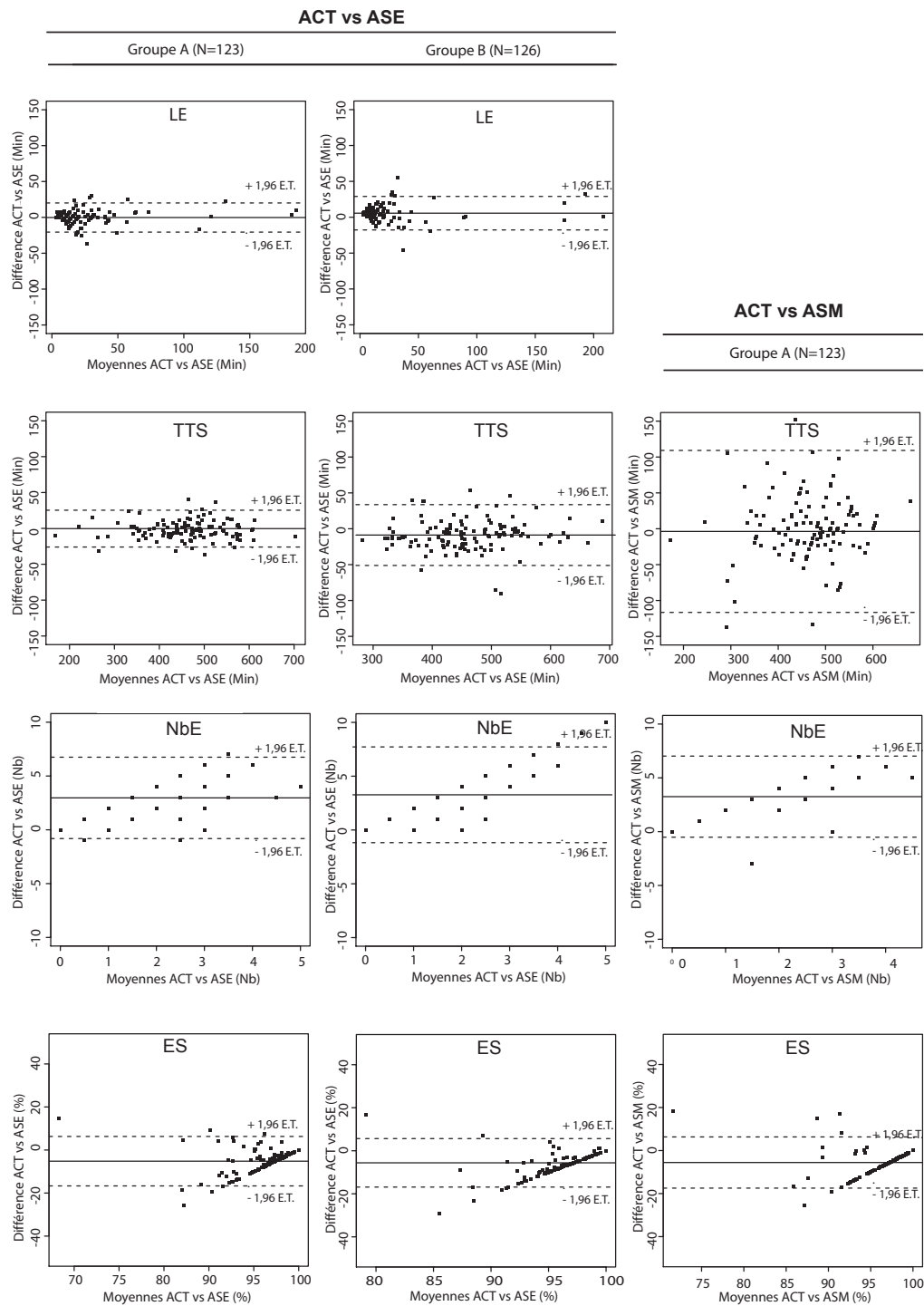


FIGURE 8.3: Représentation graphique de l'analyse par la technique de Bland et Altman pour le traitement de toutes les nuits enregistrées par les sujets pour la Latence d'Endormissement (LE), le Temps Total de Sommeil (TTS), le Nombre d'Eveils Nocturnes (NbE) et pour l'Efficacité du Sommeil (ES). On observe un meilleur agrément du TTS de l'Agenda de Sommeil Électronique que de l'Agenda de Sommeil manuscrit vis-à-vis de la mesure Actimétrique, quelque soit le groupe de mesure A ou B.

## 8.4 Discussion

Notre étude montre que Scextan® est plus précis que l'Agenda de Sommeil papier pour la mesure de l'alternance veille sommeil. Toutefois, l'actimètre révèle beaucoup mieux que ces deux outils les réveils nocturnes.

Nous avons choisi la méthode de scorage par l'algorithme de SADEH, SHARKEY et al. (1994) en sachant que celle de COLE et al. (1992) aurait sans doute offerte des résultats différents. Le développement technologique de l'actimètre utilisé ici a été basé, selon le fabricant, sur les caractéristiques techniques de celui utilisé par SADEH pour la détermination de son algorithme. D'autre part, l'âge moyen de notre population (environ 30 ans) nous a amené à choisir celui-ci (SADEH avait étudié des sujets de 23 ans en moyenne alors que COLE des sujets de 50 ans en moyenne). Toutefois, l'étude de DE SOUZA et al. (2003) qui avait comparé les algorithmes de COLE et de SADEH avec des mesures polysomnographique, montre pour les deux, une bonne concordance avec le "gold standard" des mesures du sommeil.

Par ailleurs, l'appareil Actisleep n'a pas été validé par la comparaison à d'autres techniques comme auraient pu l'être certains appareils (KUSHIDA et al., 2001). Toutefois, les appareils validés ne le sont que pour des populations présentant des troubles du sommeil (MORGENTHALER et al., 2007). Globalement, la littérature accrédite un bon agrément de l'Actimètre avec la polysomnographie aussi chez le sujet en bonne santé (ANCOLI-ISRAEL et al., 2003), ce qui permet de nous affranchir d'une validation préalable, même si elle pourrait être préférable notamment dans le cas d'études ultérieures de sujets ayant une pathologie.

Enfin, la méthode de détermination des variables de sommeil tels que l'heure d'endormissement et les éveils nocturnes, par un appareil actimétrique, ne fait pas consensus dans la littérature. Nous avons pour notre part, déterminé les paramètres de sommeil avec la technique que Sadeh a utilisé dans une étude récente (SADEH, KEINAN et al., 2004) menée auprès d'étudiants en bonne santé. D'autres auteurs ont utilisé des méthodes différentes notamment pour mesurer l'heure d'endormissement et les éveils nocturnes. Par exemple, LANDIS et al. (2003) ont défini l'endormissement des sujets après seulement 2 minutes d'inactivité alors que WOLFSON et al. (2003) et WERNER, MOLINARI, GUYER et JENNI (2008) ont utilisé 3 minutes consécutives d'inactivité pour définir l'endormissement. Enfin, VAN DEN BERG et al. (2008b) ont utilisé

10 minutes d'inactivités consécutives pour déterminer l'heure d'endormissement et chaque minutes d'éveil pour scorer la quantité d'éveils nocturnes.

Dans notre étude, l'analyse des valeurs moyennes des paramètres de sommeil chez des participants en bonne santé et jeunes, montre des différences significatives selon qu'elles sont mesurées par des méthodes objectives ou subjectives. Toutefois, lorsque la précisions nécessaire le permet, l'Agenda de Sommeil Électronique pourrait être interchangeable avec l'Actimètre (IWASAKI et al., 2010) pour certaines variables comme le TST, l'heure d'endormissement ainsi que pour l'heure de réveil, ces variables montrant de très fortes corrélations avec l'Actimètre. Pour le temps de sommeil total, l'agrément est satisfaisant compte tenu de la différence de mesure et les écarts types faibles (voir tableau 8.4 page 118) ce qui confirme ce qui avait été observé au préalable chez l'adulte (KRAHN, LIN, WISBEY, RUMMANS & O'CONNOR, 1997; LOCKLEY, SKENE et al., 1999). Les résultats de cette étude sont également en accord avec les résultats de LAUDERDALE et al. (2006) qui avaient montré que les temps de sommeil mesurés par Agenda de Sommeil étaient surestimés par rapport aux temps mesurés par actimètre.

Toutefois, toujours en ce qui concerne le Temps Total de Sommeil, l'Agenda de Sommeil Manuscrit, ne montrant qu'un agrément modéré avec la mesure actimétrique, est moins précis que l'application électronique Scextan®. L'analyse des deux différentes méthodes subjectives utilisées dans cette étude, nous permet de montrer qu'elles sont interchangeables, mais que grâce à l'enregistrement des paramètres à la minute près de l'Agenda de Sommeil Électronique, il existe une méthode alternative à l'agenda papier manuscrit. Néanmoins, que ce soit par n'importe quelle mesure subjective, les éveils nocturnes, leur nombre et leur durée sont mal mesurés en comparaison de la méthode actimétrique. Ceci confirme la difficulté de mesure objective de toutes les variables du sommeil (BAKER, MALONEY & DRIVER, 1999). Nous observons que les éveils intra nocturnes courts chez le sujet en bonne santé sont très mal évalués, mais il est envisageable que les éveils plus longs et donc plus facilement identifiables seront mieux mesurés par l'Agenda de Sommeil Électronique. D'autres mesures pourraient être envisagées auprès d'une population souffrant d'une pathologie pour observer de façon fiable cela.

Par contre, nous souhaitons comparer les analyses de la prise en compte de chaque enregistrement à celle des enregistrements moyennés pour chaque sujet comme il

est classique de le voir dans la littérature (BLACKWELL et al., 2008). Les résultats montrent une différence sensible entre ces deux types d'analyse en atténuant les différences de mesure entre les outils lorsque les nuits sont moyennées. Lorsqu'une seule valeur par sujet est prise en compte l'effet principal est la diminution des différences de mesures. Dans une analyse comparative entre plusieurs méthodes de mesure, la prise en compte de toutes les mesures est donc préférable pour rendre compte plus précisément des relations entre les outils.

Enfin, cette étude, pour la première fois, montre que les outils issus des nouvelles technologies dans lesquelles Scextan® pourrait être implanté (appareils portables ou smartphone) permettent de rendre plus ergonomiques les évaluations du sommeil, et, comme dans cette étude, plus précises, sans être significativement coûteuses. Des applications disponibles sur Internet existent (BLAKE & KERR, 2010), d'autres sur téléphone mobile, mais aucune n'avait jamais été testée à notre connaissance et n'avait jamais fait l'objet d'aucune comparaison avec un outil objectif. L'application Scextan® ayant des objectifs d'éducation à la santé et de recherche devait donc être comparée aux autres méthodes de mesure, et validée avant la poursuite de son développement. Cette étude montre que ce type d'application permet d'obtenir une bonne observation du rythme circadien. Les possibilités éducatives sont alors largement plus importantes avec ce type d'outil qu'avec n'importe quel autre, étant donné que les utilisateurs, comme les médecins, pourraient bénéficier de toute la puissance graphique, de la grande capacité de stockage et de restitution d'informations des outils informatiques, pour définir des objectifs comportementaux et en assurer le suivi régulier.

## 8.5 Conclusion

Notre étude montre que Scextan® peut être utilisé de façon valide et autonome pour la mesure du sommeil ou en complément de l'actimétrie (SADEH, 2011). Toutefois, il convient de rappeler que la mesure par actimètre n'est pas le gold-standard pour la mesure des variables du sommeil, et que les résultats sont donc à considérer de façon relative aux techniques utilisées, c'est-à-dire en les opposant les unes aux autres et notamment en observant que l'Agenda de Sommeil Électronique Scextan® est plus précis que l'Agenda de Sommeil papier.

# Comparaison des fatigues mesurée et calculée par modèle mathématique de prédiction.

## 9.1 Introduction

Les courses à la voile en solitaire de plusieurs jours, comme c'est le cas dans plusieurs activités professionnelles (opérations militaires, professions de la santé etc...), imposent aux marins de supporter un fort degré de stress ainsi qu'une forte demande cognitive et physique pour optimiser leur navigation 24 heures par jour. Nos études présentées précédemment ont montré que les marins en solitaire subissaient pendant leurs courses des restrictions extrêmes de sommeil (STAMPI, 1989b ; THEUNYNCK, HURDIEL, PEZÉ et al., 2010) et que le management de la fatigue était incontournable pour limiter les défaillances imputables au manque de sommeil. En effet, rappelons ici encore que le manque de sommeil affecte la vigilance (SCOTT et al., 2007), l'attention (THOMAS et al., 2000), la mémoire (GRAVES, HELLER, PACK & ABEL, 2003), l'humeur (ROSEN et al., 2006) , les fonctions exécutives (PACE-SCHOTT et al., 2009), mais aussi l'attention soutenue (BELENKY et al., 2003) et le risque accru d'accidents (PHILIP, 2005).

Un lien entre la durée du sommeil, les troubles et les faibles performances lors des courses de voile est connu (voir le premier chapitre de la contribution person-

nelle de cette thèse), mais n'a jamais été véritablement précisément mesuré, à notre connaissance, ni à partir des données de terrain objectives, ni en conditions naturelles d'exercice au décours d'une course à la voile.

D'autre part, depuis que la fatigue au travail est connue pour favoriser les accidents (FOLKARD & P. TUCKER, 2003; ÅKERSTEDT, PETERS, ANUND & KECKLUND, 2005), des actions ont été développées (PHILLIPS & SAGBERG, 2010), ayant pour but de prévenir les risques imputables à la privation de sommeil ou attribuables à la perturbation du rythme circadien en milieu professionnel. L'aménagement rationnel des horaires de travail peut être, depuis moins d'une décennie, rationalisé à l'aide d'outils de prédiction de performances basé sur des méthodes mathématiques (MALLIS et al., 2004). Ces modèles, en accord général avec le modèle à deux processus de régulation du sommeil de Borbély (1982) (résumés des principaux modèles disponibles au chapitre 4 page 59 de cette thèse) utilisent quasiment tous l'alternance veille-sommeil en entrée et permettent au moins une estimation de l'efficacité opérationnelle en sortie, après le traitement mathématique des composants homéostatique et circadiens de la régulation de la fatigue, voire en y associant l'inertie hypnique et le processus ultradien (HURSH, REDMOND et al., 2004). D'autre part, les variations inter individuelles de performance au seins de sujets subissant la même restriction de sommeil (WILKINSON, 1961; VAN DONGEN, BAYNARD et al., 2004; VAN DONGEN, VITELLARO et al., 2005; TURNER, DRUMMOND, SALAMAT & BROWN, 2007; A. TUCKER et al., 2007) suggèrent que les contremesures issues de ces modèles de prédiction doivent également être individuelles.

Dans le cadre du développement de notre outil de gestion du sommeil, nous pensons qu'un moyen efficace d'apprentissage du management individuel de la fatigue au cours d'une privation de sommeil induite par les obligations professionnelles et, ou, sociales, pourrait se faire par l'utilisation d'un modèle de prédiction de performance, l'individu pouvant « visualiser, se représenter » son niveau objectif de fatigue et la façon dont il risque d'évoluer en l'absence de contres mesures. Les objectifs de cette étude étaient donc :

- de mesurer les performances objectives des marins en solitaire lors de courses à la voile puisque c'est notre modèle expérimental ;
- de comparer ces mesures à un modèle mathématique récent de prédiction de fatigue (Modèle de "Spokane" ) ;

Nous souhaitons d'autre part observer l'effet de l'environnement sur la fatigue des marins afin éventuellement d'inclure cette variable dans le modèle prédictif.

Nous avons fait l'hypothèse que l'accumulation de fatigue endurée par les marins au cours d'une de leur course serait prédictible (et vérifiable à posteriori) grâce à la mesure de leur l'historique veille-sommeil et des variables environnementales subies durant la course. Le modèle mathématique devait permettre d'expliquer les variations de performances mesurées au décours d'une navigation, dans un premier temps, imposant une restriction aigüe de sommeil.

## 9.2 Matériel et méthodes

### 9.2.1 Design de l'étude

L'étude a été réalisée lors de deux courses à la voile en solitaire inscrites au calendrier de la Fédération Française de Voile. Il s'agit de la *Solo Massif Marine* se déroulant chaque année aux Sables d'Olonne et de la *Solo Ports de France* se déroulant à Concarneau. La première course a eu lieu à la fin du mois de mars 2010 et a duré 50 heures environ (départ jeudi midi, retour au port samedi en début d'après midi). La seconde course, début mai 2010, a duré environ 40 heures (départ jeudi à 15h, retour au port en milieu de nuit de vendredi à samedi). L'invitation des skippers à participer à l'étude s'est faite selon deux manières : lors d'une rencontre au centre d'entraînement de Port la Forêt (Pôle France) une semaine avant le début de la première course, ou durant les préparatifs de la course au port de départ (aux Sables d'Olonne comme à Concarneau), au moins trois jours avant le départ de la course. Tous les skippers doivent en effet, dans ce type de compétition, être présents sur le lieu de départ 5 jours avant le début de la compétition afin que la vérification des équipements de sécurité et de la jauge de chaque bateaux soit effectuée.

La période d'étude a débuté deux jours avant le départ et s'est poursuivie en incluant le jour de l'arrivée. Durant cette période, le sommeil de chaque marin a été relevé avec un actimètre et l'agenda électronique de sommeil Scextan® ; les performances neuro-comportementales ont été testées par mesure des temps de réaction (cf section mesure des performances 9.2.5 page 129).

Les variables environnementales ont été enregistrées par le dispositif embarqué



prévu à cet effet.

### 9.2.2 Participants

16 marins professionnels inscrits sur une liste de haut niveau du Ministère chargé des sports, ont initialement accepté de participer à l'étude. Toutefois, seulement onze d'entre eux (11 hommes ; âge :  $31,1 \pm 6,5$  ans) ont pu être inclus dans l'analyse. Les cinq autres marins n'ont pas été inclus car ils ont abandonné le protocole ou partiellement réalisé celui-ci.

### 9.2.3 Mesure du sommeil par Actimètre

Il a été demandé à chaque participant de porter, en continu durant la période d'étude, une montre actigraphique (Actisleep, TheActigraph®, Pensacola, Florida, USA) au poignet non dominant. Les appareils ont été protégés des projections d'eau pour s'assurer de leur bon fonctionnement. Les échantillons de données ont été enregistrés par époque d'une seconde, le logiciel Actilife5 version 5.5.5 (TheActigraph®) permettant de réintégrer les données par époques plus longue, dans le cas échéant en époques d'une minute.

### 9.2.4 Mesure du sommeil par Agenda de Sommeil Electronique

Les skippers disposant tous d'un ordinateur de bord, nous leur avons demandé d'utiliser conjointement à la mesure actimétrique, une mesure subjective des temps de sommeil à l'aide de l'Agenda Electronique de Sommeil Scextan® (ULCO, Dunkerque, France) dans sa version « mer ». Ce complément de mesure est préconisé pour compléter les données actimétriques (KUSHIDA et al., 2001 ; SADEH, 2011). L'application utilisée est programmée en langage JAVA®, permettant de façon sûre et non contraignante d'installer et de faire fonctionner Scextan® sans difficultés ni interférence avec les applications présentes dédiées à la gestion de la navigation et de la course par le navigateur. L'application comporte les mêmes évaluations qu'un agenda de sommeil manuscrit ; les heures de mise « au lit » et de lever « du lit » sont saisies en un simple click. Entre les deux, l'application peut être fermée et l'appareil mis hors tension si le skipper le souhaite. Au réveil, sont si possible saisies : la la-

tence d'endormissement, le temps écoulé depuis l'heure de réveil (en minutes). Enfin, toutes les données saisies par l'utilisateur, (date, heures et valeurs) sont archivées dans un répertoire codé.

### 9.2.5 Mesure de performances

De nombreux tests permettant d'évaluer la fatigue cognitive et motrice existent (MATHIS & HESS, 2009 ; BALKIN, BLIESE et al., 2004). Les plus simples à utiliser dans le cas de la course au large sont les temps de réaction simple. Ces tests sont largement utilisés dans la littérature pour observer les effets de privations ou de restrictions de sommeil. Les temps de réaction (en ms) ainsi que les « lapses » (réponse supérieures à 500ms) sont les paramètres les plus communément étudiés pour décrire la fatigue. D'autre part, ces tests sont très sensibles aux variations circadiennes de la somnolence ainsi qu'à la privation de sommeil chez le sujet sain (VAN DONGEN, MAISLIN et al., 2003). Enfin, sur support informatique, ils permettent l'autonomie du sujet étudié et donc des mesures in situ. Il peuvent être réalisés par périodes de tests de 10 min ou de 5 min (ROACH, DAWSON et al., 2006), ce qui s'adapte bien aux obligations d'un marin à la voile en situation de course.

La fatigue objective des marins a donc été mesurée avec un test de temps de réaction simple (TRS) de 5 minutes où les moyennes des temps de réaction et les «Lapses» ont été calculés.

L'application Wilkinson & Houghton's Psychomotor Vigilance Task (PPVT) du logiciel libre PEBL® a été installé sur le PC du bord. Cette application est lancée à partir de Scextan® par un lien dans sa fenêtre principale.

Des mesures de bases ont été réalisées durant les deux jours précédant le départ et des mesures ont été réalisées à l'arrivée. Il a été proposé aux marins de réaliser ces mêmes mesures aussi souvent que possible en course (compte tenu de la disponibilité que les marins pouvaient offrir à la réalisation des mesures). Toutefois il leur a été demandé de ne pas réaliser ces tests dans une période de trente minutes après le réveil d'une sieste pour limiter l'effet de l'inertie hypnique qui pourrait introduire un biais de mesure. Si cela était le cas, ces mesures n'ont pas fait l'objet d'analyse. Si les mesures ont duré moins de 5 minutes, elles n'ont pas été non plus analysées. Pour les mesures valables, seules les 5 premières minutes de test ont été prises en compte.

### 9.2.6 Mesure des variables environnementales

La direction et la vitesse du vent ainsi que la direction du bateau (cap vrai) ont été enregistrés avec le logiciel Adrena ®, (France), pour chaque seconde de course, sur l'ordinateur de bord. Les paramètres analysés ont été la force du vent en nœuds, la variabilité de sa direction en degrés et le gradient de changement de cap du bateau, permettant de révéler les manœuvres des skippers en fonction de l'environnement et de la forme du parcours.

### 9.2.7 Modèle de prédiction de fatigue

Comme nous l'évoquions dans le chapitre 4.11 page 67, le choix du modèle de prédiction doit se faire en fonction du scénario de validation qui représente le mieux le scénario d'application et qui fournit les meilleurs résultats pour ce scénario (LAWTON et al., 2005). Puisque les mêmes marins en solitaire alternent des périodes de privation de sommeil chronique et aigue, le modèle prédictif choisi est celui du Sleep and Performance Research Center (Spokane, WA, USA). Ce modèle de laboratoire prédit significativement la privation totale, la privation chronique et l'alternance de restrictions aiguës et chroniques de sommeil (MCCAULEY et al., 2009). L'objectif du modèle, outre la prédiction, est d'améliorer la compréhension des effets du manque de sommeil sur les fonctions exécutives et comportementales. Ce modèle est décrit en détail dans le chapitre 4.10 page 64 de cette thèse. Le modèle mathématique et les équations de ce modèle ont été adaptés pour des données provenant des tests de 5 minutes par la méthode de LAGARIAS, REEDS, WRIGHT et WRIGHT (1999) puis appliqué à l'historique veille sommeil de chaque marin.

### 9.2.8 Analyse statistique

Le test du signe a été utilisé pour observer l'effet de la restriction de sommeil sur les performances avant et après la course. Afin de mesurer le rythme du cycle veille-sommeil correspondant à la distribution de l'heure de la sieste sur le nycthémère, une analyse Cosinor ainsi que diverses analyses spectrales et périodogrammes (Reverse spectral elliptic, Lomb & Scargle, Rhythm pourcentage) ont été utilisés (GOUTHIERE, MAUVIEUX, DAVENNE & WATERHOUSE, 2005). Une analyse de régression entre les me-

sures de performance et le modèle de prédiction a été réalisée. Les paramètres environnementaux ont été entrés dans des régressions en effets mixtes comme covariables linéaire et quadratique des résidus de la prédiction. L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel SAS 9.2 (SAS Institute Inc, Cary, NC, USA).

### 9.3 Résultats

Les mesures de sommeil réalisées avec les actimètres n'ont pas été rentrées dans l'analyse car les données basées sur le mouvement des sujets n'ont pas permis de différencier l'éveil du repos (voir figure 9.1). L'agenda de sommeil électronique a donc été utilisé pour établir l'historique et la durée du sommeil.

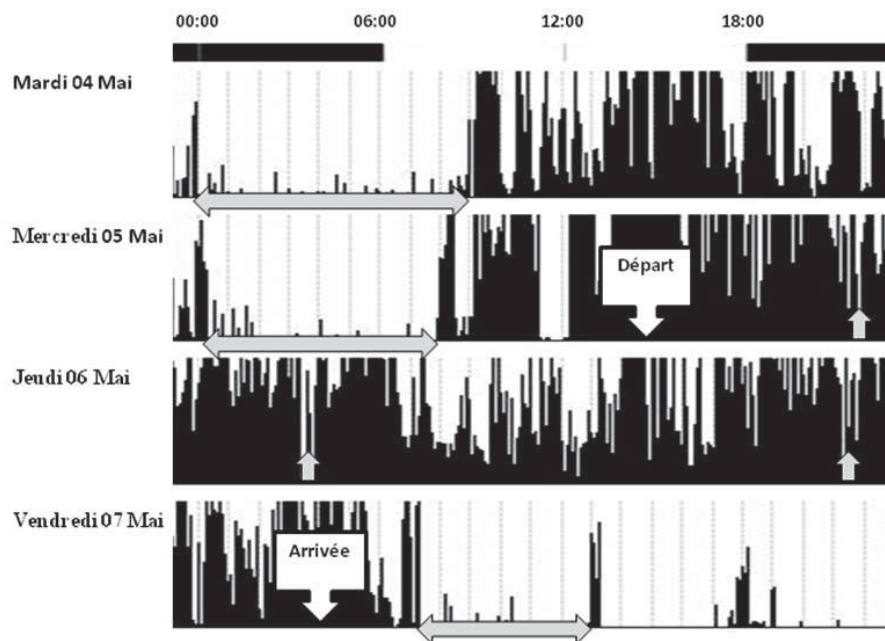


FIGURE 9.1: Mesure actigraphique d'un des participants de la Solo Port de France. Les flèches doubles grises illustrent le temps de sommeil à terre et les flèches grises pointant vers le haut illustrent la prise de sieste durant la course. La prise de sieste en mer n'est pas identifiable directement par la mesure actimétrique avec un seul appareil.

La moyenne du temps total de repos (TTR) pris pendant la course de 36 heures a été de  $79 \pm 36$  min. Les siestes ont duré en moyenne  $14 \pm 9$  minutes. La moyenne du temps total de repos (TTR) pris au cours de la totalité de la course de 50 heures a été de  $212 \pm 101$  min. Les siestes ont duré en moyenne  $15 \pm 13$  minutes. L'analyse par la méthode du Cosinor a révélé un rythme de 24,4 heures et une acrophase du sommeil aux alentours de 2h30 (voir figure 9.2).

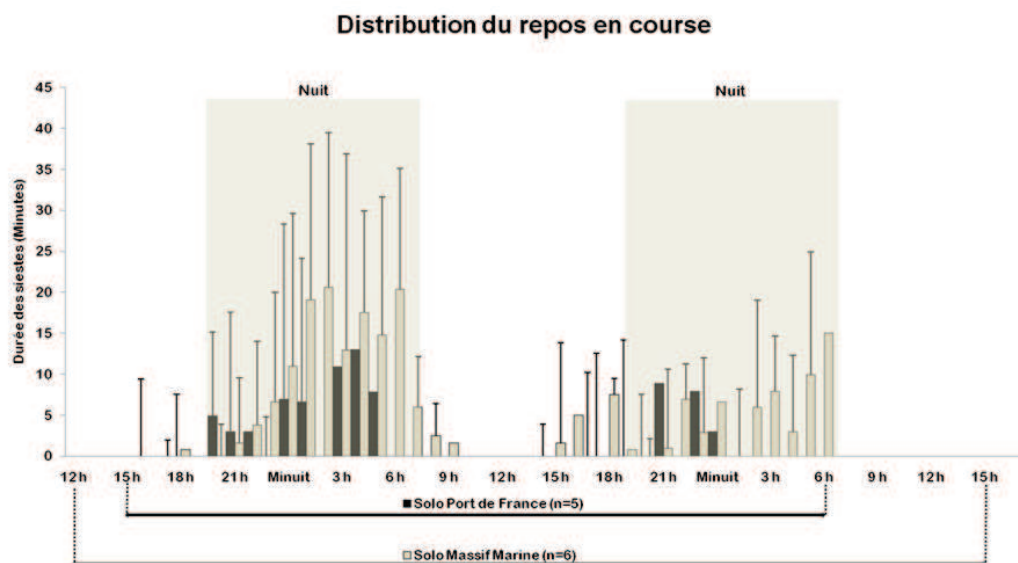


FIGURE 9.2: Présentation de la distribution et des valeurs moyennes des siestes par bloc d'une heure, au cours des courses étudiées. Les barres noires détaillent la durée des siestes prises par les skippers de la course de 36 heures (*Solo Port de France*) et les barres grises détaillent la durée des siestes (en fonction de l'heure) prises par les skippers de la course de 50 heures (*Solo Massif Marine*).

En moyenne, le nombre de lapses mesurés a été significativement augmenté entre les mesures de base « en forme à terre » ( $1,1 \pm 1$  lapse) et celles mesurées aux alentours de l'heure d'arrivée ( $4,5 \pm 3,4$  lapses), montrant un effet significatif de la restriction de sommeil sur les défaillances de l'attention soutenue ( $p = 0,02$ ). De même,

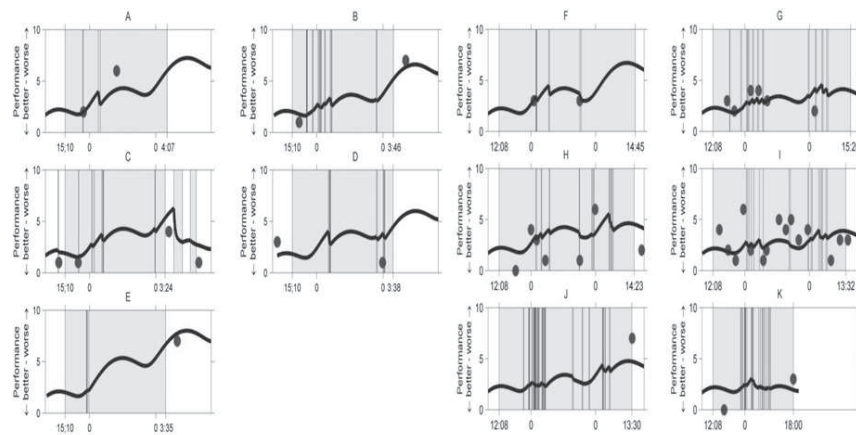


FIGURE 9.3: L'étude a été réalisée auprès de 11 skipper, au cours d'une course de 36 heures (participants A,B,C,D,E; à gauche) et une autre de 50 h (participants F,G,H,I,J,K; à droite). Le temps global de la course est défini par la zone grise. Les heures de sommeil et leur durée sont illustrées par les barres grises verticales. Les résultats des tests de temps de réaction de 5 minutes (en nombre de lapses; points noirs) sont comparés au modèle mathématique de prédiction de fatigue de MCCAULEY et al. (2009) adapté pour des mesures de 5 minutes (courbe noire).

l'analyse statistique montre un effet significatif de la restriction de sommeil sur la moyenne des temps de réaction entre les mesures « en forme » et à l'arrivée ( $p=0,03$ ).

L'analyse de régression révèle que le modèle de calcul mathématique de prédiction de fatigue a pu expliquer 67% de la variance des données de performance mesurées (voir figure 9.3). La vitesse du vent, la variabilité de sa direction et le gradient de changement de cap entré comme charge de travail, ne constituent pas une amélioration significative de la prédiction ( $p > 0,27$ ) et n'explique pas de cette manière la variance des résidus de la prédiction. Cependant, le temps en course en tant que covariable (linéaire et quadratique) explique significativement la variance des résidus de la prédiction ( $p = 0,025$ ). A la fin de la course la plus longue (*Solo Massif Marine*), les marins ont fait 2 « lapses » de moins en moyenne que celle prédite par le modèle (voir figure 3).

## 9.4 Discussion

Notre étude montre pour la première fois objectivement que les marins en course au large en solitaire naviguent avec des niveaux de performances cognitives et motrices diminués en raison de la quantité de sommeil réduite pendant la course. Ceci montre que les marins sont eux aussi, comme la littérature le suggère, sensibles aux effets du manque de sommeil (DINGES, F. PACK et al., 1997 ; BELENKY et al., 2003 ; VAN DONGEN, MAISLIN et al., 2003). Ceci implique que ces sportifs prennent aussi des risques corporels et matériels qu'ils doivent apprendre à gérer rationnellement, comme c'est le cas dans de nombreuses activités professionnelles (ÅKERSTEDT, FREDLUND, GILLBERG & JANSSON, 2002 ; GOODE, 2003 ; BARGER et al., 2005). Notre étude montre que, de façon encourageante, cette fatigue peut être prédite à court terme, malgré une dérive dans le temps de la prédiction.

Toutefois, comme nous l'avons déjà montré dans la première étude de la contribution personnelle de ce mémoire auprès de sujets en course transatlantique, les marins ayant participé à cette étude restent fortement régis par une propension circadienne « normale » du sommeil. Ceci signifie que, tout au moins pour les marins, l'enjeu du management de la fatigue se situe principalement (mais pas uniquement) au niveau du processus homéostatique (BORBÉLY, 1982).

Le modèle mathématique de MCCAULEY et al. (2009) qui n'avait, à notre connaissance, jamais été testé autrement qu'en condition de restriction de sommeil de laboratoire, est tout à fait encourageant pour prédire la fatigue en situation de vie réelle au cours de privation de sommeil très élevée et a été capable de prédire statistiquement 67% de la variance des résultats. Nous avons constaté que les marins obtenaient des résultats aux tests d'attention soutenue meilleurs que ce que ne prédit le modèle mathématique, principalement en fin de course. Le résidu de la prédiction, pourrait suggérer que des épisodes de sommeil se produisent pendant la course et qu'ils n'ont pas été enregistrés par le marin comme cela peut se produire dans le cas de mesures subjectives du sommeil (MELTZER & MINDELL, 2007). Il est connu que des micro-sommeils se produisent au cours des navigations en course de courtes durées alors que le skipper n'en a ni conscience ni le souvenir (TIBERGE, 1992). Notre étude montre que ces brèves périodes d'endormissement, si elles ont eu lieu, pourraient fournir une part de la récupération du marin mais que, bien évidemment, d'autres

études devront être envisagées pour affiner ces résultats.

Par ailleurs, comme nous l'avons montré en exemple dans la figure 9.1 page 131, la mesure objective des temps de sommeil par actimétrie ne permet pas de détecter les endormissements de quelques minutes et ne permet donc pas de récupérer la mesure de micros sommeils. Eventuellement, l'utilisation conjointe de deux actimètres, l'un pour mesurer le mouvement du bateau et l'autre pour mesurer l'activité du marin (STAMPI, 1989a; KERKHOFF, 2009) pourraient aider à la détection objective de sommeils de courtes durées. Un travail spécifique pour déterminer une méthodologie fiable de la mesure devra être entrepris dans une étude ultérieure. Nous pensons que ce sont plusieurs actimètres fixés à la coque du bateau qui seront nécessaires à la mesure, car le marin ne dort pas toujours au même endroit (dans le fond, dehors, dans la couchette tribord ou bâbord).

En outre, et cela pourrait également justifier la dérive de prédiction, il est envisageable que les tests de temps de réaction de 5 minutes ne soient pas suffisamment longs pour permettre efficacement de prédire la fatigue et d'en révéler la dynamique de façon optimale, même en ayant adapté le modèle de prédiction lui-même, comme l'ont expliqué VAN DONGEN et HURSH (2010). En effet, la durée de la tâche ainsi que le temps d'éveil semblent induire une variabilité des performances aléatoire au cours d'un test de temps de réaction de 10 minutes, la variabilité des performances pouvant être causée par l'instabilité de l'état d'éveil (DORAN et al., 2001). Il est probable que cette instabilité ne soit pas suffisamment révélée en l'espace des 5 minutes de tests réalisés par les marins. Toutefois, ROACH, DAWSON et al. (2006) et LAMOND, JAY et al. (2008) ont montré de fortes similitudes de mesures de temps de réaction lors d'éveils prolongés, entre des tests de 5 et de 10 minutes.

L'environnement, en tant que charge de travail fluctuante, peut également contribuer en partie à la variance des résultats (DAWSON & FLETCHER, 2001; MALLIS et al., 2004) et pourrait être incluse dans la formulation du modèle mathématique utilisé pour cette étude. Pour l'instant, l'effet de l'environnement a été entré dans l'analyse des résidus de la prédiction grâce aux mesures de vent (force et variabilité) et de changements de caps du bateau révélant objectivement le nombre de manœuvres accomplies. Une loi en U spéculative a été proposée en ce qui concerne l'influence de la vitesse du vent sur la fatigue des marins : la charge de travail peut être plus élevée dans du vent faible car il est nécessaire, pour le skipper, de sortir au plus vite de



cette zone. La problématique est proche dans du vent fort où il faut assurer la sécurité matérielle et physique. Cette hypothèse devra elle aussi être testée par de plus amples observations. Le facteur environnemental, par une augmentation de la charge de travail, qui a eu dans notre étude une influence non significative dans l'explication du résidu, pourrait donc être ultérieurement réintroduit de manière à améliorer les prédictions de performances.

Malgré cela, nous considérons que l'utilisation d'un outil utilisant un modèle de prédiction de performance pour manager individuellement sa fatigue (OLOFSEN et al., 2010) est donc envisageable compte tenu des résultats encourageants et prometteurs que nous avons obtenus dans cette étude. Même si des études complémentaires doivent être réalisées pour affiner la méthodologie et la compréhension des mécanismes favorisant le résidu de la prédiction de performance, l'exactitude et la précision de la prédiction ne sont pas discriminantes dans une démarche éducative puisque c'est bien de l'observation de la dynamique de la fatigue (fonction des temps d'éveil et de sommeil ainsi que de la position sur le nyctémère) que les utilisateurs d'un tel appareil pourraient tirer parti. Ceci implique que, pour l'instant, un outil tel que Scextan® visant à devenir éducatif et qui profitera d'une fonction prédictive mathématique ne pourrait se passer d'une ré-actualisation régulière, subjective ou objective, des niveaux de forme.

## 9.5 Conclusion

De façon encourageante, le modèle de prédiction de fatigue de MCCAULEY et al. (2009) pourrait être inclu dans un outil éducatif comme Scextan®. En dépit d'une dérive dans le temps de la prédiction vis à vis de la mesure de fatigue réelle, et même si nous devons réaliser des études complémentaires pour vérifier cela, la cinétique de l'évolution de la fatigue pourrait permettre aux utilisateurs de Scextan® de comparer plusieurs périodes de restrictions de sommeil afin d'en conserver des repères, même subjectifs, à la base de tout apprentissage. L'idée de la dernière étude de cette thèse était donc d'observer dans quelle mesure des sujets en restriction de sommeil chronique pouvaient tirer parti d'une démarche éducative à l'aide de Scextan®, malgré que le temps imparti ne nous ait pas permis d'y inclure la fonction prédictive.

# Chapitre 10

## Expérience d'accompagnement de la Route du Rhum 2010 : étude préliminaire et exploratoire

### 10.1 Introduction

Puisque la fatigue engendre de la somnolence, des défauts de l'attention, un allongement des temps de réactions et des phénomènes d'hypovigilance (CALDWELL, MALLIS et al., 2009), les implications pour la sécurité dans un contexte professionnel sont donc sérieuses. Il a été de nombreuses fois montré en mer, sur la route, ou dans le ciel que la fatigue pouvait être un facteur directement lié aux accidents et à la perte de vies humaines (HORNE & REYNER, 1995 ; PHILIP & ÅKERSTEDT, 2006 ; PHILIP, SAGASPE et al., 2003), les effets de la fatigue ayant même été placés au même niveau que les effets de l'alcool (DAWSON & REID, 1997).

De nombreux travaux se sont intéressés aux contre-mesures de la fatigue dans des contextes opérationnels, en proposant des Programmes de Management de la Fatigue (PMF) (GANDER, 2001, 2005 ; DAWSON & MCCULLOCH, 2005 ; PHILLIPS & SAGBERG, 2010). Ces programmes visent principalement l'organisation des ressources humaines au sein des entreprises elles mêmes, en les invitant à considérer la fatigue et la somnolence comme des facteurs centraux dans la planification des horaires de travail. Toutefois, le management de la fatigue n'est pas seulement à regarder sous

l'angle de l'aménagement des horaires de travail, mais doit être pris en compte de façon plus globale (SCHUTTE, 2009), en impliquant particulièrement et profondément dans la démarche, les hommes et les femmes qui seront touchés par les effets néfastes d'une éventuelle restriction de sommeil (ROSEKIND, SMITH et al., 1995).

Les outils utilisés dans les programmes de management de la fatigue permettant de révéler des comportements, d'évaluer le niveau de connaissances des répondants sur la fatigue et le sommeil ainsi que de mesurer le bénéfice de la démarche, sont principalement des questionnaires et sont accompagnés d'interventions de spécialistes du sommeil. Même minoritaires, des actions éducatives ont utilisé le feed-back pour encourager et motiver les changements de comportements ainsi que la prise en compte plus rationnelle de la fatigue chez les opérateurs, dirigeants et employés eux même (BELENKY, 1998 ; MOORE-EDE et al., 2004). Néanmoins, l'évaluation des effets individuels d'un PMF reste relativement peu claire dans la littérature.

Comme nous l'avons souligné plusieurs fois dans ce mémoire de thèse, les marins à la voile en solitaire vivent, durant leurs courses, dans un état de restriction de sommeil et de fatigue parfois très intense. Nous avons montré que la fatigue des marins se manifestait par les mêmes effets que dans d'autres contextes professionnels, c'est-à-dire par des accidents ainsi que des temps de réaction élevés traduisant un déficit de l'attention et de la vigilance.

Notre objectif principal était donc de tester l'effet d'un accompagnement andragogique individuel « sommeil et fatigue » dans un contexte opérationnel relativement clair, puisque la tâche à accomplir en course est la même pour tout le monde dans un environnement relativement commun.

Par ailleurs, en course au large en solitaire, l'inexistence d'un instrument d'évaluation de la gestion du sommeil rendait difficile l'analyse des comportements ainsi que la mise en place de démarches de progression individualisées. Nous avons donc dû créer notre propre système de mesure.

L'hypothèse de l'effet positif d'un Programme Individuel de Management de la Fatigue (PIMF) s'appuyant sur l'utilisation de Scextan® à l'occasion d'une course à la voile, imposant une restriction chronique de sommeil pendant plusieurs semaines, nous a amené à conduire cette étude.

## 10.2 Matériel et méthode

### 10.2.1 Procédure

Entre juin et octobre 2010, nous avons sollicité par téléphone ou par email la majeure partie des skippers participants à *La Route du Rhum - La Banque Postale 2010* (3542 miles nautiques sur la route orthodromique) afin qu'ils puissent bénéficier de la démarche de recherche et d'éducation que nous voulions mettre en place dans le cadre de leur projet sportif. Compte tenu des difficultés pour entrer en contact avec tous (filtre des agents de communication), nous avons poursuivi la démarche de recrutement de sujets 10 jours avant le départ directement sur les pontons.

Le protocole proposé à tous les participants consistait à :

- remplir un questionnaire sur la gestion théorique de la fatigue en course dans la semaine avant le départ ;
- bénéficier d'une séance individuelle d'éducation à la gestion de la fatigue et du risque en course ;
- Embarquer le logiciel de mesure et de gestion du sommeil Scextan® et l'utiliser autant que faire se peut durant la course ;
- accepter de se soumettre à un entretien d'explication individuel à l'arrivée ;
- répondre une nouvelle fois à un questionnaire identique à celui du départ ;

Deux groupes de sujets ont été identifiés selon leur degré d'acceptation du protocole. Un groupe test a été composé de tous les skippers acceptant la totalité du protocole et un groupe contrôle a été identifié en incluant tous les skippers acceptant seulement de remplir le questionnaire avant et après la course. Au total 32 skippers (soit un tiers des participants de la course) ont accepté de participer à l'étude. Au départ de la course, 21 sujets faisaient parti du groupe test et 11 du groupe contrôle. A l'arrivée, seulement 14 skippers du groupe test ont pu être conservés dans l'étude, et seulement 3 skippers du groupe contrôle. Pour des raisons évidentes de clarté de l'analyse, seuls les résultats des 14 skippers du groupe test ayant réalisé tout le protocole seront présentés.

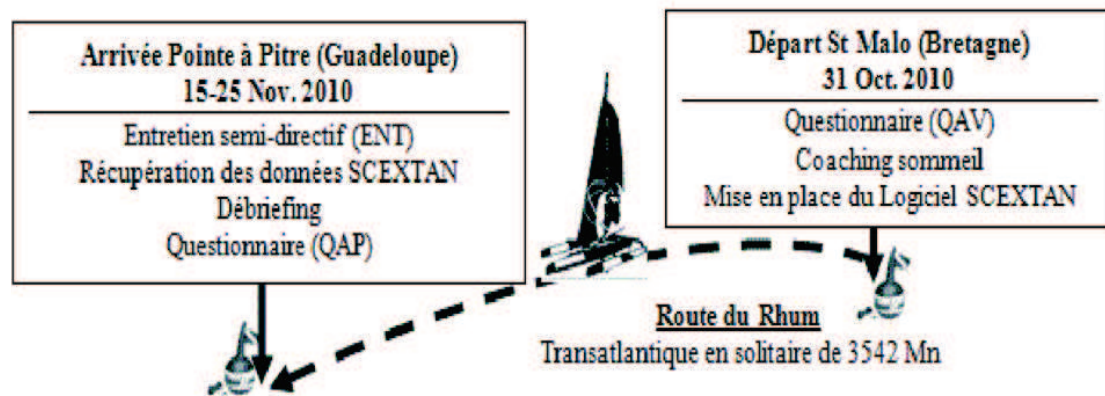


FIGURE 10.1: Protocole de l'étude lors de la *La Route du Rhum -La Banque Postale* 2010. Cette course de 3542 miles nautiques sur la route orthodromique dure entre 9 et 25 jours selon les catégories de bateaux.

### 10.2.2 Sujets

Seulement 14 skippers ont pu réaliser la totalité du protocole compte tenu des sollicitations auxquelles ils étaient soumis à l'arrivée de la course. Tous les sujets sont des hommes, âgés de  $39 \pm 9$  ans et ayant en moyenne 5 années d'expérience en course au large. 12 skippers faisaient parti de la catégorie des 40 pieds monocoque. Dans ce groupe, 1 skipper de 29 ans (catégorie 40 pieds) naviguant en solitaire en course depuis 4 ans, réalise depuis 2007 une préparation « sommeil » continue pour contribuer à l'amélioration de ses performances et de sa sécurité. Dans ce rapport d'étude, nous l'appellerons TR.

### 10.2.3 Cadre Théorique de gestion de la Fatigue

Inspiré des travaux de Bui-Xuan sur le curriculum conatif (BUI-XUÂN, 1993), des travaux sur le management du risque en conditions opérationnelles (VAN DONGEN, BELENKY & J. KRUEGER, 2010; VAN DONGEN & HURSH, 2010) et de nos connaissances générales sur le sommeil en course au large, quatre paliers de gestion théorique de la fatigue en course ont été imaginés. Chaque palier a été structuré autour des processus de la régulation du sommeil (Homéostatique, Circadien et Ultradien et Inertie Hypnique). Un Indice a été calculé sur la base des réponses au questionnaire et sur la base de l'entretien individuel de fin de course.

- **Etape 1** : Le skipper pense que naviguer se joue « au physique » dans la lutte contre les éléments particulièrement dans la lutte contre le sommeil et la fatigue. C'est un skipper qui pense que le marin le plus résistant gagnera. Ce skipper ne s'est jamais posé de question sur la gestion de la fatigue. Il se sent suffisamment fort pour vaincre les effets du manque de sommeil. (Exemple d'indices : Sommeil insuffisant et fatigue extrême, il trouve normal d'avoir des hallucinations et donc il se fait peur. Peu importe de dormir le jour ou la nuit, ce skipper cherche à faire des siestes très courtes pour être tout le temps « à fond »).
- **Etape 2** : Ici, le skipper a compris que s'il entre dans un rapport de force à long terme avec le sommeil, il va perdre. Il s'est déjà interrogé sur la manière d'économiser de l'énergie tout en dormant moins qu'à terre. Il raisonne spontanément, va essayer des choses mais il n'est pas sûr du résultat, il fonctionne sans routine. Il fait des essais et des erreurs, c'est une gestion au coup par coup. Toutefois lorsqu'il a repéré que d'autres skippers font différemment et qu'ils réussissent mieux que lui, il passe à l'étape 3. (Exemple d'indices : repère des signaux de fatigue anormaux, signalant la limite à ne pas dépasser. Il imagine un temps global de sommeil par 24h mais ne sais pas si cela va bien. Il a tendance à dormir plus la nuit que le jour. Il ne connaît pas la durée des siestes qui lui va bien et subit des endormissements involontaires ou n'entends pas le réveil)
- **Etape 3** : Ce skipper est forcément passé à l'étape 2 et en a retenu des leçons issues de ces essais et erreurs dont il en a formulé des règles. Il se pose des

questions au sujet des techniques utilisées par ceux qui semblent réussir mieux que lui. Il va à la recherche de connaissances. Il est simplement dans l'application des règles, physiologiques par exemple, et uniquement dans la mise en œuvre de ces règles pour réguler son sommeil. Cette mise en œuvre est réalisée quelque soient les conditions et les situations. Ce qui compte, c'est la règle, car il vaut mieux faire fonctionner la règle que de modifier le comportement si celui-ci venait à ne pas marcher. Il est persuadé que c'est en respectant les règles qu'il va être le meilleur. Il finit par conclure que d'autres fonctionnent différemment de lui car ils arrivent à contextualiser ces règles, et passe donc à l'étape 4. (Exemple d'Indices : le skipper a lu des choses, s'est renseigné sur des règles et les a comprises. Il dort beaucoup plus la nuit que le jour et se fixe des temps de sommeil suffisants. Il dort par siestes de durées exactement identiques quelque soit les conditions et ou le parcours. Il a des indicateurs (comme la vitesse du bateau sous pilote ou la vitesse des autres concurrents) pour décider d'aller se reposer.)

- **Etape 4** : C'est la phase de contextualisation où le skipper diversifie son comportement car il n'est pas un applicateur direct de la règle. Il ne suit pas exactement le « mode d'emploi » du bon dormeur physiologique mais il connaît les règles fondamentales. Il a des principes d'optimisation qui prennent en compte l'économie et l'efficacité. Le skipper à l'étape 4 est dans le principe de gestion optimale de l'énergie au regard de la récupération. Ce qui fait la différence, c'est sa capacité à avoir une tactique et une stratégie vis-à-vis des fondamentaux physiologiques, de cette manière, il peut anticiper en se disant : Il est fort probable que la situation soit « celle-ci », alors il vaut mieux faire « comme cela ». Il fait incessamment un calcul probabiliste, il est clairement dans l'anticipation. (Exemple d'indices : Le skipper change systématiquement la durée des siestes en fonction des sollicitations de l'environnement. Dès lors, il place systématiquement des informations sur le sommeil adaptées à la navigation dans un road book de manière à savoir si cela est suffisant pour gérer la course sans risque. Il conduit systématiquement une analyse rationnelle et pourquoi pas chiffrée.)

### 10.2.4 Questionnaire sur la gestion de la fatigue en course

La semaine avant le départ, lors du premier contact avec eux à St Malo, les participants ont répondu à un questionnaire (QAV) sur la gestion de leur fatigue en course. Ils ont fait de même en dernier lieu du protocole (QAP) à Pointe à Pitre. Pour une passation rapide, le questionnaire est composé de 27 items (voir annexes) auxquels les skippers doivent répondre par Oui ou par Non à des questions ou des affirmations, relatives à des situations de course. 8 questions concernent la gestion du processus homéostatique, 5 le processus Circadien et Ultradien et 7 concernent la gestion de l'Inertie hypnique. 7 questions sont d'ordre général sur l'ergonomie à bord et sur la prise en compte du facteur « sommeil » dans la préparation. 20 items permettent donc de situer les skippers dans une des 4 étapes.

### 10.2.5 La démarche éducative individuelle

L'accompagnement individuel « sommeil » s'est fait en trois temps. Avant, pendant et après la course. La première partie a été réalisée au port, dans les 10 jours précédant le départ, pour une séance éducative avec chacun des skippers, individuellement, dans leur bateau. D'une durée stricte de 45 minutes, cette séance éducative avait pour objectif d'expliquer au skipper comment la fatigue biologique était régulée. Un petit cahier de 8 pages a été conçu spécialement pour cette étude, contenant principalement des schémas et des figures expliquant le fonctionnement des processus de régulation ainsi que les effets délétères de la fatigue à terre et en mer. Dans le délai imparti, le skipper pouvait bien entendu poser des questions auxquelles nous avons tenté de répondre avec le plus de justesse possible.

### 10.2.6 Logiciel de gestion du sommeil SCEXTAN® pendant la traversée

Il s'agit du logiciel de mesure et de gestion du sommeil (comparable à un chronomètre de sommeil électronique) installé sur le PC de bord. Scextan® (agenda de sommeil électronique interactif, ULCO, France) conserve dans son propre système d'archive toutes les informations saisies par le skipper soit :

- date et heure de coucher ;



- date et heures de lever ;
- la forme subjective ;
- qualité du sommeil

Le skipper peut très simplement avoir accès pendant la course à l'historique de son sommeil et de sa fatigue subjective, grâce à une fonction lui offrant des statistiques comportementales graphiques et chiffrées. Scextan® a été installé sur les PC de bord de tous les volontaires mais l'utilisation a été laissée au libre choix du skipper.

### 10.2.7 L'entretien d'explication à l'arrivée

Dans les 48 heures suivant leur arrivée à Pointe-à-Pitre, les participants ont été interviewés individuellement à bord de leur bateau (ENT). Les entretiens de nature semi-directive portaient sur la gestion des trois processus en course, sur les conséquences de la fatigue et les incidents qu'ils ont vécus. Ces entretiens ont été menés à chaque fois par deux expérimentateurs et avaient pour but de fournir de l'information sur ce qui s'est déroulé pendant la course, mais aussi de faire progresser les skippers. La technique utilisée durant ces phases d'accompagnement a été inspiré des travaux de VERMERSCH (1994) et de « l'entretien d'explication ». La procédure d'entretien a été la même avec tous les skippers où :

- Nous avons cherché à ce que le skipper passe du tacite à l'explicite vis-à-vis de son comportement dont il n'a pas forcément conscience. La technique que nous avons utilisée est considérée selon VERMERSCH comme une prise de conscience provoquée.
- Pour guider la discussion, limiter les omissions d'informations, et favoriser la mise en mot du déroulement de la course, il a été demandé aux skippers de remplir une grille permettant de définir approximativement un cumul de sommeil quotidien (en heures) et un état de forme subjectif (en % du maximum). Cette grille n'a pas été analysée par la suite.
- Une fois la grille remplie, nous avons demandé aux skippers de nous raconter jour par jour le déroulement de la course, de la semaine avant le départ au jour d'arrivée.
- Cinq thèmes ont été abordés systématiquement pour chaque jour, soit la quantité de sommeil, la rythmicité du sommeil et de la vie à bord, l'inertie du som-

meil, la fatigue et les incidents.

Chaque entretien a duré environ 1h, a été enregistré, retranscrit et analysé par une technique de « double-aveugle » grâce à une grille d'analyse correspondant aux mêmes thèmes que ceux du questionnaire sur la gestion de la fatigue en course.

### 10.2.8 Analyse des données par le calcul d'un Indice de Gestion théorique de Fatigue (IGF)

Les réponses aux questionnaires et les unités de valeur des entretiens ont identiquement permis de déterminer pour chaque skipper un Indice de Gestion théorique de Fatigue allant de 0 à 40 (étapes 1 à 4) selon la formule suivante :

$$\frac{\sum C^2 \times I \cdot E}{\sum C \times I \cdot E} \times 10$$

*C* : Numéro de l'étape

*I · E* : Nombre d'Indices Evoqués situant le skipper dans l'étape.

Comme pour tout apprentissage, plus le niveau est faible, plus la progression est rapide. Pour ces raisons, nous avons considéré que :

- si un skipper obtient un score entre 1 et 15, on peut estimer sa gestion théorique de la fatigue à l'étape 1 ;
- si un skipper obtient un score entre 15 et 25, on peut estimer sa gestion théorique de la fatigue à l'étape 2 ;
- si un skipper obtient un score entre 25 et 35, on peut estimer sa gestion théorique de la fatigue à l'étape 3 ;
- si un skipper obtient un score entre 35 et 40, on peut estimer sa gestion théorique de la fatigue à l'étape 4 ;

### 10.2.9 Analyse statistique

Après avoir vérifié que les résultats suivaient une loi normale, des tests F de Fisher ont été appliqués aux IGF de chacun des skippers dans des deux conditions d'évaluations (questionnaire avant course (QAV) et questionnaire après course (QAP)). Un *t* de Student pour échantillons appariés a été appliqué pour comparer les moyennes

des résultats obtenus par questionnaire, avant et après, et les moyennes des résultats obtenus par entretien (ENT).

### 10.3 Résultats

L'analyse statistique par le test de Student ne révèle pas de différence significative entre les scores moyens des trois temps d'évaluations QAV, QAP et ENT. Toutefois, un faible effet de l'accompagnement est observé par la diminution de la variance des résultats des questionnaires entre avant et après la course (figure 10.2). Cette diminution n'est, par contre, pas significative, même si la probabilité d'observer un changement est grande ( $p=0,08$ ).

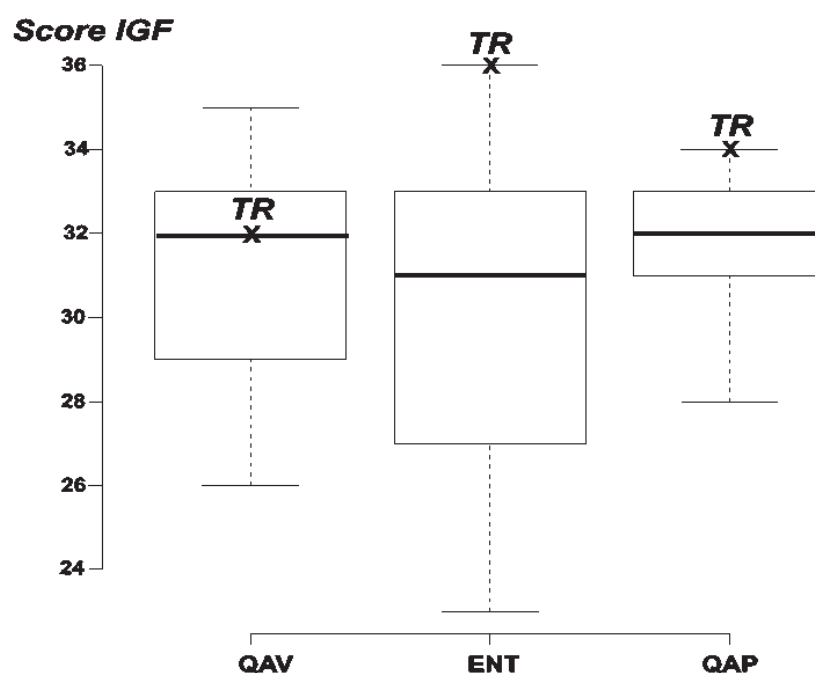


FIGURE 10.2: représentations des boîtes à moustaches des variables questionnaires avant course (QAV), questionnaires après course (QAP) et entretiens (ENT). En ordonnée, l'échelle de valeur des variables est exprimée par le score de l'Indice de Gestion de Fatigue (IGF). La croix noire indique le score du skipper TR pour chaque modalité d'évaluation.

L'analyse des entretiens et l'observation de la variance du score ENT rapportent que les skippers ont des difficultés à anticiper l'état de fatigue, notamment avant le départ (voir extrait 1 10.3), mais aussi lors de passages clés de la course où l'anticipation est tardive (voir extrait 2 10.3).

**Extrait 1 :**

Pour donner un exemple, voici un extrait d'entretien après l'arrivée de la course, entre un skipper (EL) et l'expérimentateur (RH). Extrait sur l'anticipation durant la semaine de départ :

*(EL) : [...] c'est dû à une mauvaise gestion de la semaine du départ*

*(RH) : à quel niveau ?*

*(EL) : euh, tout à tous les niveaux, sommeil, récupération, logement là où j'étais, euuuuh, tout absolument tout*

*(RH) : d'accord*

*(EL) : l'organisation générale [...], donc du coup, sous mes allures un peu serein en fait j'ai craqué vraiment à 12 heures du départ [...], à 12 heures du départ je me suis dit que, en fait, je n'avais pas bien fait toute la semaine.*

*(RH) : et euh pour quelle raison tu pensais ça ?*

*(EL) : ben euh parce que là je commençais vraiment à être fatigué [...], et puis j'arrivais de moins en moins à dormir [...], et puis avec toute la pression de mes partenaires, et compagnie et tout et voilà, là [...] je me suis dit j'avais partir, j'suis fatigué.*

**Extrait 2 :**

Pour exemple voici l'extrait d'un entretien après l'arrivée de la course, entre le skipper JEC et l'expérimentateur RH. Extrait sur l'anticipation d'un changement brutal de condition environnementale (identifiable plusieurs jours à l'avance) engendrant une privation de sommeil :

*(RH) : [...] quand tu reçois ton fichier météo, comment tu anticipes ce qui va t'arriver dessus ?*

*C'est à dire comment tu anticipes toi, ton état de forme pour dans quelques jours ?*

*(JEC) : ça je l'ai pas du tout anticipé, l'état de forme, pas du tout anticipé, j'avais dire suis capable de gérer ça plutôt à la journée en me disant bon ce soir c'est envoi de spi donc euuh ça veut dire qu'il faut que je sois en forme donc euh j'avais au check, puis j'avais me coucher dans la bascule et c'est là où moi c'est un peu pénible, t'attends la*

*rotation et la rotation si elle est à 20h bah tu l'attends quoi.*

D'autre part, le skipper TR a gagné la course en 18 jours. Il est le seul à avoir utilisé de façon quasi systématique le logiciel SCEXTAN (perte d'assiduité au 14<sup>ième</sup> jour de course) (voir figure 10.3). Il a dormi  $5,9 \pm 2,8$ h par 24h (bloc de 8h à 8h).

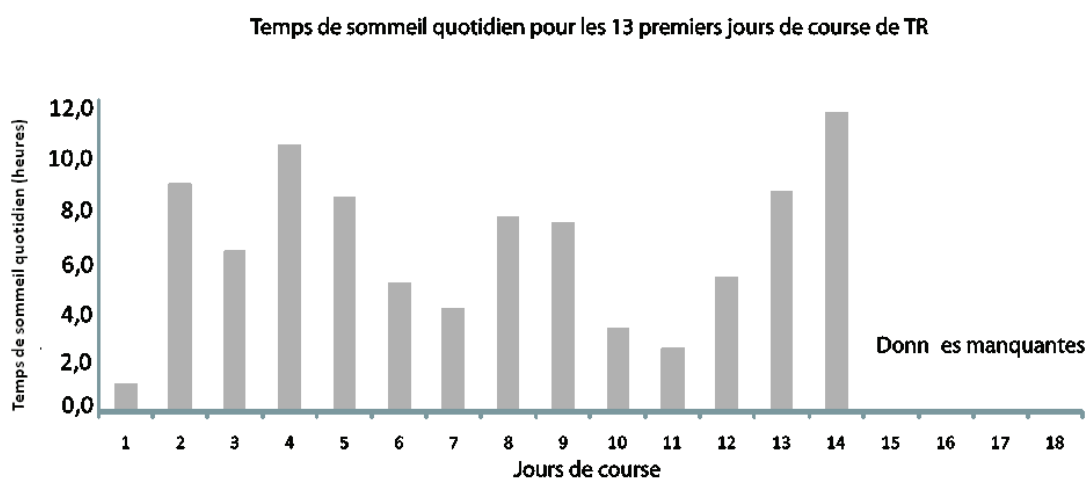


FIGURE 10.3: Temps de sommeil quotidien (enregistrés de 8h à 8h) du skipper TR, mesurés par Agenda de Sommeil Interactif, lui permettant de bénéficier du feed-back de l'historique veille sommeil. L'enregistrement des 4 derniers jours de course n'est pas complet selon le skipper et n'est, en conséquence, pas illustré sur cette figure

En comparaison de la population étudiée (voir figure 10.2 page 146), il est celui qui tend le plus à avoir eu un comportement d'anticipation et une vision stratégique de gestion de sa forme. (Voir également les extraits 3 10.3 page suivante et 4 10.3 page suivante au sujet du même phénomène météorologique que JEC 10.3 page précédente et extraits 5 10.3 page suivante et 6 10.3 page 150).

**Extrait 3 :**

(RH) : [...] comment tu anticipais les choses, comment, a quel moment, tu pourrais t'être dit, bah là, ça va être compliqué, j'avais passer 24 heures j'avais pas pouvoir garder ma rythmicité, celle que j'aime bien et compagnie, est ce que tu anticipais ?

(TR) : c'est la météo qui dictait ça, mais oui.

(RH) Oui et comment ?

(TR) bah ya eu plusieurs passage, pendant la course, ya eu plusieurs gros passages à niveau. Donc, le premier front le cinquième jour [même phénomène météo que dans l'extrait précédent], ya eu le passage de mole, passer à l'ouest d'une petite dépression tropicale là, qu'est ce qu'il y a eu, euh en tout cas pour moi dans ma tête c'était euh c'était bien identifié et du coup je savais aussi qu'il fallait que je dorme avant. Et je savais aussi quand est ce que je pourrai redormir, [...] tu sais exactement quand est-ce que les choses arrivent quand est-ce qu'il faut être bien, pas bien, quand est-ce que tu vas mettre ton spi pas ton spi, quand est-ce que tu dois manœuvrer, ou pas. Et euh, ça j'ai fait assez attention quand même, par exemple le premier front là [...] (10.3 page 147)

**Extrait 4 :**

(RH) Et dans ce front là, comment t'as géré ce front là ? C'est-à-dire comment t'as géré [...] avant pendant après ?

(TR) Avant, j'avais vachement dormi, j'étais bien

(RH) Exprès ?

(TR) Ouais, ouais avant j'avais vachement dormi pour être justement là, j'étais a la barre quand c'est arrivé, pour attaquer justement au portant [...]

Avant la course, TR avait un score de gestion de fatigue (évalué par questionnaire) sur la médiane des scores de la population étudiée. Après la course, son IGF était le plus fort du groupe (voir 10.2 page 146). Et l'analyse de l'entretien révèle qu'il a théoriquement mieux géré sa fatigue que le reste du groupe. En particulier, sa gestion a été plus rationnelle et anticipatrice en utilisant le logiciel Scextan® (Voir Extrait 5 et 6)

**Extrait 5 :**

(RH) : [...] par rapport a la quantité de sommeil, comment tu t'es sentis toi ?

*(TR) J'ai toujours été bien, j'ai toujours été en forme, j'ai jamais été dans le rouge, euh, le seul moment où je me suis mis dans le rouge, c'est vraiment, sur les deux derniers jours, les trente six dernières heures, quarante huit dernières heures, là, pas, pas tout de suite là, parce que du coup j'avais de la réserve, j'étais bien, mais c'est vrai que là, je me sentais fatigué, [...] c'était moins flagrant, que la veille de l'arrivée, parce que j'avais aussi l'adrénaline qui me tenait.*

**Extrait 6 :**

*(RH) [...] quelle cible, tu t'étais mise avec le compteur là ? (référence à l'utilisation de Scextan®)*

*(TR) J'étais assez surpris du temps de sommeil au final...mais j'en avais besoin, fin j'étais euh.*

*(RH) est ce que tu t'es dit bon bah voilà, tiens il y a cette valeur là elle me va, à peu près ou est ce que tu, ou est ce que ça t'as simplement, ça t'as mis en confiance sur certains.*

*(TR) Bah j'avais, au final j'ai dormi, les premiers jours là et j'étais vraiment bien, je pense que du coup euh, mes valeurs cibles en fait, elles étaient un peu, celles du début de course, [...] et je regardais quand même, mais je savais du coup et plusieurs fois, j'me suis trouvé ah ben tiens là j'ai déjà dormi tout ça, bon bah c'est bien quoi !*

## 10.4 Discussion

Il a été très décevant de perdre autant de sujets au cours de cette étude puisque seulement la moitié des sujets volontaires au départ ont pu finir le protocole. Nous avons particulièrement regretté la perte du groupe contrôle qui handicape l'analyse de l'effet de l'intervention. Nous reléguons donc cette étude de preuve de concept à une étude préliminaire. De ce fait, notre étude montre seulement un effet timide de l'intervention « sommeil » de courte durée, sur les connaissances évaluées par questionnaire. La présence du groupe contrôle aurait sans doute permis d'observer des différences plus importantes. Toutefois, même si la diminution de la variance des résultats entre les questionnaires avant et après n'atteint pas un seuil statistiquement significatif, une tendance forte se dégage pour montrer que les individus ayant obtenu un IGF faible à la première évaluation ont progressé d'un point de vue de leurs

connaissances théorique. Là encore, un échantillon plus conséquent de sujets aurait sans doute permis d'atteindre ce seuil de significativité.

Néanmoins, compte tenu des résultats d'IGF aux entretiens, l'intervention de départ ne semble pas avoir eu d'impact significatif sur la stratégie de gestion de fatigue en course, même si l'intervention a été individuelle. A court terme cet accompagnement n'est donc pas si efficace que nous pouvions l'imaginer et une progression n'est pas observé rapidement. Nous pouvons trouver une explication dans les travaux de BARBIER (1996) et ROBIN (1998) ayant étudié des sportifs de haut niveau. Ces auteurs ont identifié un «savoir théorique» ayant pour but de donner (sur le papier) une représentation du réel. BARBIER (1996) mentionne aussi trois savoirs différents : le *savoir détenu*, qui est du domaine de la capacité, de la connaissance, de la compétence ; le *savoir objectivé*, de l'ordre de la culture, des règles, des valeurs ils permettent de bien agir ; et enfin le *savoir d'action* résultant des deux types savoirs précédemment cités et qui permettent d'accéder à l'expertise .

A contrario des autres skippers, et à l'image du skipper TR, un travail préparatoire spécifique de longue durée et une démarche d'anticipation de la fatigue en course grâce à des outils spécifiques sont favorables à la construction de ce *savoir d'action*, ou autrement dit à la performance des marins comme cela avait déjà été montré par MOORE-EDE et al. (2004) avec une population de chauffeurs routiers professionnels. Ceci pourrait vouloir dire que lorsque des individus en restriction de sommeil doivent appliquer une stratégie de gestion de fatigue, l'intervention ponctuelle d'un spécialiste n'est peut être pas suffisante. Par contre, l'accompagnement répété d'expériences de restrictions de sommeil, basé sur l'explication, la compréhension de la physiologie, grâce à un modèle simple tel que celui de BORBÉLY (1982) et une analyse explicative a posteriori de la période de restriction (comme nous l'avons fait ici), pourrait avoir un effet à long terme (ROSEKIND, SMITH et al., 1995).

Cet accompagnement dont a bénéficié le skipper TR depuis 4 ans, lui a permis d'accéder progressivement à la prise de conscience du besoin et d'augmenter l'optimisation de sa gestion de fatigue, principalement en termes d'anticipation de l'état de forme (Etape 4). En effet, TR est le seul à avoir utilisé Scextan® au cours des trois quarts de sa course, et s'en est servi pour vérifier qu'il avait assez dormi (cf. extraits 10.3 page précédente). Ces résultats sont en concordance avec l'étude de THEUNYNCK, HURDIEL, PEZÉ et al. (2010) qui avaient eux aussi montré avec un cou-



reur autour du monde en solitaire sans escale qu'une démarche d'optimisation de la gestion de sommeil pouvait passer par un suivi de la « consommation de sommeil ».

Toutefois, nous restons bien entendu prudents avec les résultats de cette étude, particulièrement en ce qui concerne les indices de gestion de la fatigue. Car, d'une part, ceci est seulement applicable aux skippers, compte tenu de la nature des questions (cf. annexes) et d'autre part par le manque de finesse de l'analyse.

## 10.5 Conclusion

Le délai technique de mise en place de la fonction prédictive dans l'application scextan® ne nous ayant pas permis de tester son bénéfice lors de cette étude, nous avons mis en place une formation pédagogique explicative dans le cadre de l'accompagnement d'une expérience de restriction de sommeil. La difficulté de réalisation d'une telle étude n'a pas apporté de conclusion significative. Par contre, il semblerait qu'une démarche éducative de court terme soit moins bénéfique, au moins dans le cadre restreint de la course au large, mais aussi sans doute de façon plus élargie, qu'une démarche de long terme. Ce propos est appuyé par le fait le skipper TR, vainqueur de la course dans sa catégorie, semble avoir tiré partie d'une préparation de longue durée en s'appuyant rationnellement sur l'utilisation d'un feed-back pour anticiper les périodes fondamentales de sa course (ce qu'il appelle les "passages à niveaux").

# Conclusion Générale et Perspectives Scientifiques

## 11.1 Conclusion

Les fortes sensibilités individuelles au manque de sommeil nous obligent à penser que les contremesures doivent s'appuyer sur des méthodes dédiés au management individuel du sommeil et de la fatigue. Quelques outils existent déjà, mais la fiabilité de leurs mesures, leur efficacité éducative, leur prix ou leur facilité d'exploitation ne répondent pas pleinement au besoin exprimé par les chercheurs et spécialistes du sommeil qui considèrent que le sommeil d'une population revêt un enjeu de santé publique.

L'objectif de cette thèse était de présenter le processus scientifique que nous avons mis en place pour proposer un modèle éducatif de management de la santé et de la fatigue basé sur un outil dédié, imaginé et issu de l'observation de circumnavigations en solitaire.

Nous avons poursuivi l'observation des marins à la voile en solitaire compte tenu de l'importance qu'à le facteur "sommeil" pour eux lorsqu'ils sont restreint à dormir moins que ce dont ils ont biologiquement besoin.

La première partie, en deux études, a permis d'explorer avec plus de profondeur le comportement et les spécificités des courses à la voile et a permis de valider les solitaires comme une population d'étude de façon préliminaire au reste du travail

de cette thèse. Nous avons clairement observé que ces hommes et ces femmes répondaient eux aussi aux principes physiologiques qui sont largement décrits dans la littérature, en terme d'attraction au rythme circadien et de conséquences accidentelles et comportementales au manque de sommeil.

La seconde partie a permis de valider un nouveau système de mesure électronique de la rythmicité circadienne du sommeil plus souple et plus précise que les techniques subjectives dont sont équipés tous les médecins du sommeil et celles utilisées dans certaines recherches. Un investissement modeste de ce genre d'application permettrait sans doute de diagnostiquer avec plus d'aisance et surtout de proposer des contremesures plus interactives et donc efficaces en terme d'éducation à la santé. Ce nouvel outil pourrait être aussi appliqué à la recherche, soit en complément de mesures actimétriques soit de façon autonome lorsque la précision de mesure le permet.

Dans une troisième partie, nous avons observé dans quelle mesure, il était possible, sur le terrain, de se fier à un modèle récent de prédiction mathématique de fatigue, l'objectif étant d'évaluer la pertinence qu'aurait l'inclusion de ce modèle comme un élément central de l'outil électronique de management de la fatigue et d'éducation à la santé. Les résultats encourageants et originaux nous amènent à penser qu'avec une adaptation et une calibration régulière, un tel modèle mathématique permettrait aux utilisateurs de conserver des repères fiables et objectifs afin qu'ils puissent prendre plus en considération l'impact de leurs comportements de sommeil sur leur fatigue.

Enfin, de façon exploratoire, nous avons souhaité observer l'effet d'une action éducative basée sur l'utilisation de notre outil lors d'une restriction de sommeil de longue durée. Compte tenu des difficultés de réalisation d'une telle étude en course au large, et puisque le délai technique de développement final du prototype a dépassé celui imparti pour la réalisation de ce travail, l'efficacité d'un accompagnement éducatif a été testé seulement de façon préliminaire. Toutefois, les résultats de cette étude, qui demandent à être étayés par un plus grand nombre de sujets, ont montré qu'une démarche éducative de long terme sur la régulation du sommeil et la fatigue, s'appuyant sur Scextan®, augmentait la probabilité d'un comportement efficace et plus sain.

Par ailleurs, selon KOLB et al. (1984), l'apprentissage basé sur l'expérience per-

mettrait l'acquisition de connaissances grâce à la transformation de l'expérience. Basé sur les résultats de ces études, inspiré du modèle de l'apprentissage de KOLB et al. (1984) et de la revue de littérature que nous avons effectué dans la première partie de cette thèse, nous proposons donc le modèle d'intervention suivant :

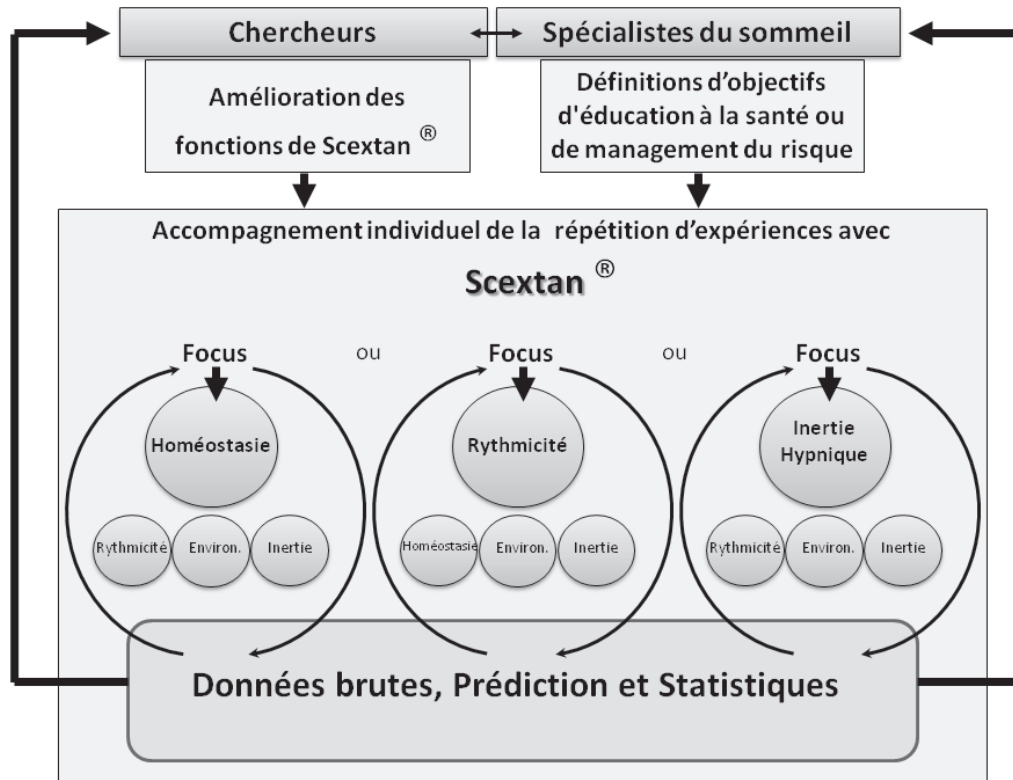


FIGURE 11.1: Ce schéma illustre le modèle d'intervention que nous proposons à la suite de nos travaux de thèse. De façon modulaire, des interventions individuelles proposées par les spécialistes du sommeil, pourraient s'établir autour des trois axes de la régulation du sommeil et de la fatigue. En parallèle, les chercheurs sont en charge de maintenir Scextan® scientifiquement à jour.

Les spécialistes du sommeil pourraient définir des objectifs de travail autour d'un des trois axes que sont la gestion du processus homéostatique, la gestion des processus rythmiques (circadien et ultradien) et la gestion de l'inertie hypnique. De façon "modulaire" selon ce qui avait été proposé par ROSEKIND, SMITH et al. (1995) pour la préparation des pilotes de la NASA, un seul axe à la fois pourrait être observé au cours d'une expérience en condition de vie réelle, ce qui signifie que (comme pour le marin

TR dans la dernière étude) plusieurs expériences sont préférables pour favoriser un comportement optimal pérenne de santé et/ou de sécurité.

Mais d'autre part, Scextan® en constante évolution grâce aux travail scientifique d'amélioration de ses fonctions (voir perspectives 11.2) permettrait aux utilisateurs d'obtenir un feed-back permanent entre deux visite avec le spécialiste du sommeil, qui par ailleurs, bénéficierait facilement et de façon relativement précise des mesures en conditions de vie réelle lui permettant de réévaluer et réguler les objectifs (de la même manière que les appareils de ventilation par pression positive continue dans le cas du syndrome d'apnée du sommeil).

Ce travail de thèse a donc construit les fondations d'un processus de recherche et développement qui doit être poursuivi selon les perspectives exposées dans la section suivante.

## 11.2 Perspectives

Venant à la suite de cette thèse, nous avons plusieurs perspectives de travail de manière à, envisager de projeter Scextan® en tant que dispositif médical.

La première condition, pour pouvoir continuer nos investigations et prouver l'efficacité de notre projet, se tient dans la réalisation d'un prototype de Scextan® plus portable, sur un téléphone cellulaire, et pour lequel une fonction de prédiction mathématique serait disponible. Une première version de Scextan® a été déposée auprès de l'Agence pour la Protection des Programmes et enregistrée. Une demande d'aide à la maturation de ce projet est en cours au moment de l'écriture de ce mémoire.

Lorsque cette première étape sera franchie, nous devons réaliser une étude de preuve de concept de grande échelle en milieu professionnel. Nous sommes actuellement en contact avec une organisation majeure du milieu aéronautique et avec laquelle nous devrions pouvoir, dans les 12 prochains mois, établir un protocole d'étude fiable et en collaboration avec une équipe de chercheurs de pointe.

Néanmoins, en accord avec le modèle que nous proposons, illustré sur la figure 11.1 page précédente, nous chercherons à reprendre l'étude de comparaison entre la prédiction mathématique et la fatigue mesurée chez les marins. L'objectif de cette nouvelle étude, devrait nous permettre d'identifier les principales interactions entre les

stimulations endogènes et exogènes (états psychologiques, charge de travail, environnement etc...) et la régulation de la fatigue (voir figure 11.2). Nous espérons, par ces futures études, avoir la possibilité de mieux prédire la fatigue.

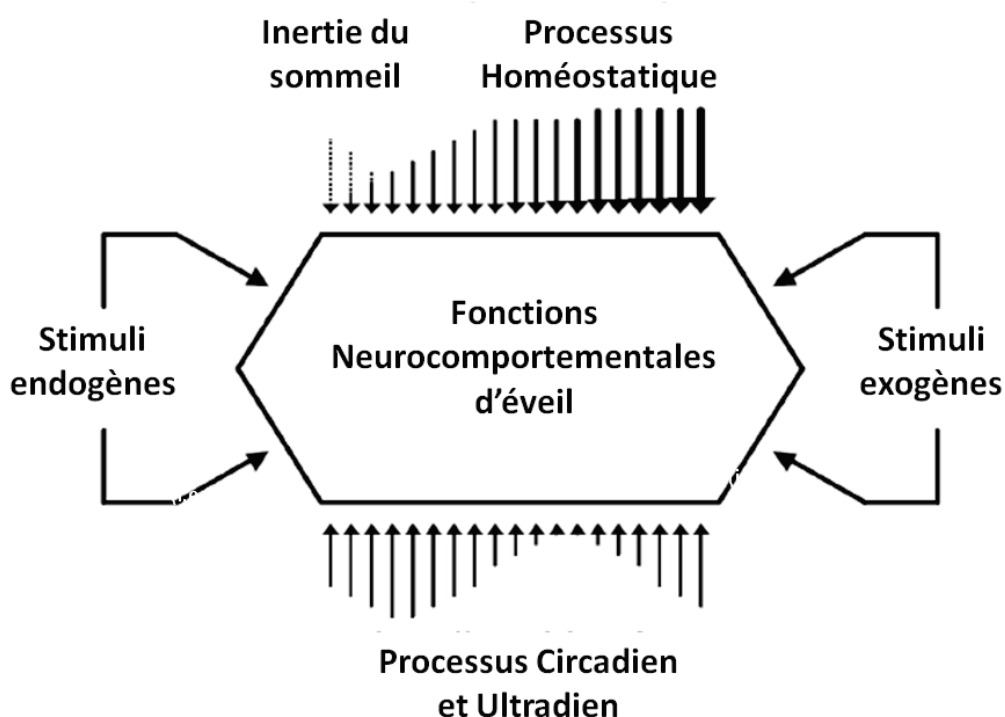


FIGURE 11.2: Cette figure est une représentation schématique de la régulation biologique des performances neurocomportementales. De part et d'autre de la représentation des processus de régulation (inertie hypnique, processus circadien et Homéostatique), VAN DONGEN et DINGES (2005) font état d'effets transitoires de stimuli endogènes (internes) et exogènes (externes). Une grande variété de facteurs internes et externes peuvent modifier positivement (la motivation ou la caféine, par exemple) ou augmenter la fatigue temporairement (l'anxiété ou la charge de travail).

Enfin, en amont, il devient indispensable d'établir de façon fiable une méthodologie pour la mesure du sommeil en mer par actimétrie ou par une autre mesure objective. Nous restons persuadé que la population des sportifs de l'extrême, comme celle des marins, lorsqu'ils se privent volontairement de sommeil pour répondre aux besoins de l'environnement ou de la compétition nous permettra de mieux com-

prendre comment la fatigue est régulée et pourquoi pas nous aiguiller dans la compréhension des fonctions du sommeil.

## **Troisième partie**

### **Bibliographie**



# Bibliographie

- Ahasan, R., Lewko, J., Campbell, D., & Salmoni, A. (2001). Adaptation to night shifts and synchronisation processes of night workers. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human science*, 20(4), 215–226.
- Ahonniska, J., Ahonen, T., & Aro, T. (2001). Practice effects on visuomotor and problem-solving tests by children. *Perceptual and Motor Skills*, 92(2), 479–494.
- Åkerstedt, T. (1998). Shift work and disturbed sleep/wakefulness. *Sleep Medicine Reviews*, 2(2), 117–128.
- Åkerstedt, T., Connor, J., Gray, A., & Kecklund, G. (2008). Predicting road crashes from a mathematical model of alertness regulation—the sleep/wake predictor. *Accident Analysis & Prevention*, 40(4), 1480–1485.
- Åkerstedt, T., & Folkard, S. (1995). Validation of the s and c components of the three-process model of alertness regulation. *Sleep*, 18(1), 1–6.
- Åkerstedt, T., Fredlund, P., Gillberg, M., & Jansson, B. (2002). A prospective study of fatal occupational accidents—relationship to sleeping difficulties and occupational factors. *Journal of Sleep Research*, 11(1), 69–71.
- Åkerstedt, T., & Gillberg, M. (1986). Sleep duration and the power spectral density of the eeg. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 64(2), 119–122.
- Åkerstedt, T., & Gillberg, M. (1990). Subjective and objective sleepiness in the active individual. *International Journal of Neuroscience*, 52(1), 29–37.

- Åkerstedt, T., Kecklund, G., Ingre, M., Lekander, M., & Axelsson, J. (2009). Sleep homeostasis during repeated sleep restriction and recovery: support from eeg dynamics. *Sleep*, *32*(2), 217–222.
- Åkerstedt, T., Peters, B., Anund, A., & Kecklund, G. (2005). Impaired alertness and performance driving home from the night shift: a driving simulator study. *Journal of Sleep Research*, *14*(1), 17–20.
- Åkerstedt, T., & Wright Jr, K. (2009). Sleep loss and fatigue in shift work and shift work disorder. *Sleep Medicine Clinics*, *4*(2), 257–271.
- Allen, P., Wadsworth, E., & Smith, A. (2007). The prevention and management of seafarers' fatigue: a review. *International Maritime Health*, *58*, 167–177.
- Ancoli-Israel, S., Cole, R., Alessi, C., Chambers, M., Moorcroft, W., & Pollak, C. (2003). The role of actigraphy in the study of sleep and circadian rhythms. american academy of sleep medicine review paper. *Sleep*, *26*(3), 342–392.
- Antunes, H., Andersen, M., Tufik, S., & De Mello, M. (2008). Sleep deprivation and exercise. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, *14*(1), 51–56.
- Asaad, G., & Shapiro, B. (1986). Hallucinations: theoretical and clinical overview. *American Journal of Psychiatry*, *143*(9), 1088–1097.
- Aserinsky, E., & Kleitman, N. (1953). Regularly occurring periods of eye motility, and concomitant phenomena, during sleep. *Science*.
- Avinash, D. (2005). *Modeling performance impairment due to chronic sleep restriction*. (PhD thesis, Drexel University).
- Axelsson, J., Kecklund, G., Åkerstedt, T., Donofrio, P., Lekander, M., & Ingre, M. (2008). Sleepiness and performance in response to repeated sleep restriction and subsequent recovery during semi-laboratory conditions. *Chronobiology International*, *25*(2-3), 297–308.
- Azboy, O., & Kaygisiz, Z. (2009). Effects of sleep deprivation on cardiorespiratory functions of the runners and volleyball players during rest and exercise. *Acta Physiologica Hungarica*, *96*(1), 29–36.
- Babkoff, H., Caspy, T., & Mikulincer, M. (1991). Subjective sleepiness ratings: the effects of sleep deprivation, circadian rhythmicity and cognitive performance. *Sleep*, *14*(6), 534–539.

- Babkoff, H., Sing, H., Thorne, D., Genser, S., & Hegge, F. (1989). Perceptual distortions and hallucinations reported during the course of sleep deprivation. *Perceptual and Motor Skills*, 68(3 Pt 1), 787.
- Baker, F., Maloney, S., & Driver, H. (1999). A comparison of subjective estimates of sleep with objective polysomnographic data in healthy men and women. *Journal of Psychosomatic Research*, 47(4), 335–341.
- Balkin, T., Bliese, P., Belenky, G., Sing, H., Thorne, D., Thomas, M., Redmond, D., Russo, M., & Wesensten, N. (2004). Comparative utility of instruments for monitoring sleepiness-related performance decrements in the operational environment. *Journal of Sleep Research*, 13(3), 219–227.
- Balkin, T., Thorne, D., Sing, H., Thomas, M., Redmond, D., Wesensten, N., Williams, J., Hall, S., & Belenky, G. (2000). Effects of sleep schedules on commercial driver performance. *Department of Transportation, Federal Motor Carrier Safety Administration, Washington DC, USA*.
- Banks, S., & Dinges, D. (2007). Behavioral and physiological consequences of sleep restriction. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 3(5), 519–528.
- Banks, S., Van Dongen, H., Maislin, G., & Dinges, D. (2010). Neurobehavioral dynamics following chronic sleep restriction: dose-response effects of one night for recovery. *Sleep*, 33(8), 1013–1026.
- Barbier, J. (1996). *Savoir théorique et savoir d'action*. Paris: PUF.
- Barger, L., Cade, B., Ayas, N., Cronin, J., Rosner, B., Speizer, F., Czeisler, C. (2005). Extended work shifts and the risk of motor vehicle crashes among interns. *Obstetrical & Gynecological Survey*, 60(6), 354–356.
- Basheer, R., Bauer, A., Elmenhorst, D., Ramesh, V., & McCarley, R. (2007). Sleep deprivation upregulates  $\alpha 1$  adenosine receptors in the rat basal forebrain. *Neuroreport*, 18(18), 1895.
- Basheer, R., Strecker, R., Thakkar, M., & McCarley, R. (2004). Adenosine and sleep-wake regulation. *Progress in Neurobiology*, 73(6), 379–396.
- Beersma, D., Dijk, D., Blok, C., & Everhardus, I. (1990). Rem sleep deprivation during 5 hours leads to an immediate rem sleep rebound and to suppression of non-rem sleep intensity. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 76(2), 114–122.

- Belenky, G. (1998). Sustaining performance during continuous operations: the us army's sleep management system. In *Managing fatigue in transportation*.
- Belenky, G., Wesensten, N., Thorne, D., Thomas, M., Sing, H., Redmond, D., Russo, M., & Balkin, T. (2003). Patterns of performance degradation and restoration during sleep restriction and subsequent recovery: a sleep dose-response study. *Journal of Sleep Research, 12*(1), 1–12.
- Belyavin, A., & Spencer, M. (2004). Modeling performance and alertness: the qinetiq approach. *Aviation, Space, and Environmental Medicine, 75*(Supplement 1), A93–A103.
- Bennet, G. (1973). Medical and psychological problems in the 1972 singlehanded transatlantic yacht race. *The Lancet, 302*(7832), 747–754.
- Benoit, O., Foret, J., & Bouard, G. (1983). The time course of slow wave sleep and rem sleep in habitual long and short sleepers: effect of prior wakefulness. *Human Neurobiology, 2*(2), 91–96.
- Billiard, M., & Kent, A. (2003). *Sleep: physiology, investigations, and medicine*. Springer.
- Blackwell, T., Redline, S., Ancoli-Israel, S., Schneider, J., Surovec, S., Johnson, N., Cauley, J., Stone, K., & for the Study of Osteoporotic Fractures Research Group. (2008). Comparison of sleep parameters from actigraphy and polysomnography in older women: the sof study. *Sleep, 31*(2), 283–291.
- Blake, J., & Kerr, D. (2010). Development of an online sleep diary for physician and patient use. *Knowledge Management & E-Learning: An International Journal, 2*(2), 188–202.
- Bland, M., & Altman, D. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet, 327*(8476), 307–310.
- Blatter, K., Graw, P., Munch, M., Knoblauch, V., Wirz-Justice, A., & Cajochen, C. (2006). Gender and age differences in psychomotor vigilance performance under differential sleep pressure conditions. *Behavioural Brain Research, 168*(2), 312–317.
- Bliese, P., Wesensten, N., & Balkin, T. (2006). Age and individual variability in performance during sleep restriction. *Journal of Sleep Research, 15*(4), 376–385.
- Bond, A., & Lader, M. (1974). The use of analogue scales in rating subjective feelings. *British Journal of Medical Psychology, 47*, 211–218.

- Bonnet, M., & Arand, D. (1999). Level of arousal and the ability to maintain wakefulness. *Journal of Sleep Research*, 8(4), 247–254.
- Bonnet, M., & Arand, D. (2003). Clinical effects of sleep fragmentation versus sleep deprivation. *Sleep Medicine Reviews*, 7(4), 297–310.
- Bonnet, M., Gomez, S., Wirth, O., & Arand, D. (1995). The use of caffeine versus prophylactic naps in sustained performance. *Sleep*, 18(2), 97–104.
- Borbély, A. (1982). A two process model of sleep regulation. *Human Neurobiology*, 1(3), 195–204.
- Borbély, A. (2001). Le sommeil. *Eurobrain*, 3(3), 1–4.
- Borbely, A., & Achermann, P. (1999). Sleep homeostasis and models of sleep regulation. *Journal of Biological Rhythms*, 14(6), 557–68.
- Borbély, A., Baumann, F., Brandeis, D., Strauch, I., & Lehmann, D. (1981). Sleep deprivation: effect on sleep stages and eeg power density in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 51(5), 483–493.
- Brunner, D., Dijk, D., & Borbély, A. (1993). Repeated partial sleep deprivation progressively changes in eeg during sleep and wakefulness. *Sleep*, 16(2), 100.
- Brunner, D., Dijk, D., Tobler, I., & Borbély, A. (1990). Effect of partial sleep deprivation on sleep stages and eeg power spectra: evidence for non-rem and rem sleep homeostasis. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 75(6), 492–499.
- Bui-Xuân, G. (1993). Une modélisation du procès pédagogique. In G. Bui-Xuân & J. Gleyse (Eds.), *Enseigner l'éducation physique et sportive* (pp. 77–90). Clermont-Ferrand, AFRAPS.
- Burke, A., Ellis, N., & Allen, P. (2003). The impact of work patterns on stress and fatigue among offshore worker populations. *Contemporary Ergonomics*, 131–136.
- Buysse, D., Reynolds III, C., Monk, T., Berman, S., & Kupfer, D. (1989). The pittsburgh sleep quality index: a new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Research*, 28(2), 193–213.
- Caldwell, J. (2005). Fatigue in aviation. *Travel Medicine and Infectious Disease*, 3(2), 85–96.
- Caldwell, J., Caldwell, J., & Schmidt, R. (2008). Alertness management strategies for operational contexts. *Sleep Medicine Reviews*, 12(4), 257–273.

- Caldwell, J., Mallis, M., Caldwell, J., Paul, M., Miller, J., & Neri, D. (2009). Aerospace medical association fatigue countermeasures subcommittee of the aerospace human factors committee. fatigue countermeasures in aviation. *Aviation Space and Environmental Medicine*, *80*, 29–59.
- Cappuccio, F., Taggart, E., Kandala, N., Currie, A. (2008). Meta-analysis of short sleep duration and obesity in children and adults. *Sleep*, *31* (5), 619–626.
- Carskadon, M. (1990). Patterns of sleep and sleepiness in adolescents. *Pediatrician*, *17*(1), 5–12.
- Carskadon, M., & Dement, W. (1981). Cumulative effects of sleep restriction on daytime sleepiness. *Psychophysiology*, *18*(2), 107–113.
- Carskadon, M., Dement, W., Mitler, M., Guilleminault, C., Zarcone, V., & Spiegel, R. (1976). Self-reports versus sleep laboratory findings in 122 drug-free subjects with complaints of chronic insomnia. *American Journal of Psychiatry*, *133*(12), 1382–1388.
- Carskadon, M., Dement, W., Mitler, M., Roth, T., Westbrook, P., & Keenan, S. (1986). Guidelines for the multiple sleep latency test (mslt): a standard measure of sleepiness. *Sleep*, *9*(4), 519–524.
- Chen, H. (1991). Effects of 30-h sleep loss on cardiorespiratory functions at rest and in exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *23*(2), 193–198.
- Cole, R., Kripke, D. F., Gruen, W., Mullaney, D. J., & Gillin, J. C. (1992, Oct.). Automatic sleep/wake identification from wrist activity. *Sleep*, *15*, 461–469.
- Connor, J., Norton, R., Ameratunga, S., Robinson, E., Civil, I., Dunn, R., Bailey, J., & Jackson, R. (2002). Driver sleepiness and risk of serious injury to car occupants: population based case control study. *British Medical Journal*, *324*(7346), 1125.
- Daan, S., Beersma, D., Borbély, A., Kronauer, R., & Gander, P. (1984). Timing of human sleep: recovery process gated by a circadian pacemaker. commentary and reply. *American journal of Physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, *15*(2), R161–R183.
- Dauvilliers, Y., & Billiard, M. (2004). Aspects du sommeil normal. *EMC-Neurologie*, *1* (4), 458–480.
- Dawson, D., & Fletcher, A. (2001). A quantitative model of work-related fatigue: background and definition. *Ergonomics*, *44*(2), 144–163.

- Dawson, D., & McCulloch, K. (2005). Managing fatigue: it's about sleep. *Sleep Medicine Reviews*, 9(5), 365–380.
- Dawson, D., & Reid, K. (1997). Fatigue, alcohol and performance impairment. *Nature*, 388(6639), 235.
- Dean, D., Fletcher, A., Hursh, S., & Klerman, E. (2007). Developing mathematical models of neurobehavioral performance for the “real world”. *Journal of Biological Rhythms*, 22(3), 246–258.
- Delafosse, J., Leger, D., Quera-Salva, M., Samson, O., & Adrien, J. (2000). Etude comparative de l'actimétrie et de la polysomnographie ambulatoire dans l'évaluation de l'adaptation au travail de nuit chez les infirmières. *Revue Neurologique*, 156(6-7), 641–645.
- De La Giclais, B. (1991). *Etude du sommeil fractionné d'un navigateur en solitaire en course transatlantique à la voile*. (PhD thesis, Thèse de médecine, Toulouse).
- De La Giclais, B., Léger, D., & Tiberge, M. (2001). Le sommeil et la mer. *Le Spécialiste de Médecine du Sport au Service des Praticiens*, (31), 13–15.
- De La Giclais, B., Tiberge, M., Arbus, L., & Léger, D. (2005). Le sommeil particulier des navigateurs solitaires à la voile en course transocéanique. *Sommeil et Vigilance*, (14), 13–14.
- Dement, W., & Wolpert, E. (1958). The relation of eye movements, body motility, and external stimuli to dream content. *Journal of Experimental Psychology*, 55(6), 543.
- De Souza, L., Benedito-Silva, A., Pires, M., Poyares, D., Tufik, S., & Calil, H. (2003). Further validation of actigraphy for sleep studies. *Sleep*, 26(1), 81–5.
- Dijk, D., Hayes, B., & Czeisler, C. (1993). Dynamics of electroencephalographic sleep spindles and slow wave activity in men: effect of sleep deprivation. *Brain Research*, 626(1-2), 190–199.
- Dinges, D. (1995). An overview of sleepiness and accidents. *Journal of Sleep Research*, 4, 4–14.
- Dinges, D., & Kribbs, N. (1991). Crew factors in flight operations: alertness management in flight operations. In T. H. Monk (Ed.), *Sleep, sleepiness and performance, human performance and cognition* (pp. 97–128). Oxford, England: John Wiley and Sons.

- Dinges, D., & Mallis, M. (1998). Managing fatigue by drowsiness detection: can technological promises be realized. In *Managing fatigue in transportation. proceedings of the third international conference on fatigue and transportation, fremantle, western australia*. (Vol. 81). Oxford UK: Elsevier Science Ltd.
- Dinges, D., Orne, M., Whitehouse, W., & Orne, E. (1987). Temporal placement of a nap for alertness: contributions of circadian phase and prior wakefulness. *Sleep*, *10*(4), 313–329.
- Dinges, D., Pack, F., Williams, K., Gillen, K., Powell, J., Ott, G., Aptowicz, C., & Pack, A. (1997). Cumulative sleepiness, mood disturbance, and psychomotor vigilance performance decrements during a week of sleep restricted to 4-5 hours per night. *Sleep*, *20*(4), 267–277.
- Dinges, D., & Powell, J. (1985). Microcomputer analyses of performance on a portable, simple visual rt task during sustained operations. *Behavior Research Methods*, *17*(6), 652–655.
- Dinges, D., Whitehouse, W., Orne, E., & Orne, M. (1988). The benefits of a nap during prolonged work and wakefulness. *Work & Stress*, *2*(2), 139–153.
- Donaldson, J., Rendle, J., & McIntyre, A. (1994). *Safer ships, cleaner seas, report of lord donaldson's enquiry into the prevention of pollution from merchant shipping*.
- Doran, S., Van Dongen, H., & Dinges, D. (2001). Sustained attention performance during sleep deprivation: evidence of state instability. *Archives Italiennes de Biologie*, *139*(3), 253–267.
- Dorrian, J., Rogers, N., & Dinges, D. (2005). Psychomotor vigilance performance: neurocognitive assay sensitive to sleep loss. In *Sleep deprivation: clinical issues, pharmacology and sleep loss effects*. new york: marcel dekker, inc (pp. 39–70).
- Douglass, A., Bornstein, R., Nino-Murcia, G., Keenan, S., Miles, L., Zarccone, V. J., Guilleminault, C., & Dement, W. (1994). The sleep disorders questionnaire. *Sleep*, *17*(2), 160–167.
- Drust, B., Waterhouse, J., Atkinson, G., Edwards, B., & Reilly, T. (2005). Circadian rhythms in sports performance-an update. *Chronobiology International*, *22*(1), 21–44.
- Durmer, J., & Dinges, D. (2005). Neurocognitive consequences of sleep deprivation. In *Seminars in neurology* (Vol. 25, 1, pp. 117–129).



- Elkin, A., & Murray, D. (1974). The effects of sleep loss on short-term recognition memory. *Canadian Journal of Psychology*, 28(2), 192–195.
- Ellis, B., Johns, M., Lancaster, R., Raptopoulos, P., Angelopoulos, N., & Priest, R. (1981). The St. Mary's hospital sleep questionnaire: a study of reliability. *Sleep*, 4(1), 93–7.
- Enright, J. (1980). The timing of sleep and wakefulness. studies of brain function, vol 3. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- Espie, C., Lindsay, W., & Espie, L. (1989). Use of the sleep assessment device (Kelley and Lichstein, 1980) to validate insomniacs' self-report of sleep pattern. *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, 11(1), 71–79.
- Finelli, L., Baumann, H., Borbély, A., & Achermann, P. (2000). Dual electroencephalogram markers of human sleep homeostasis: correlation between theta activity in waking and slow-wave activity in sleep. *Neuroscience*, 101(3), 523–529.
- Foissaud, V. (1986). *Stress en mer: incidence sur le comportement des solitaires en course*. (PhD thesis, Thèse de médecine générale).
- Folkard, S., & Tucker, P. (2003). Shift work, safety and productivity. *Occupational Medicine*, 53(2), 95.
- Frank, M. (2006). The mystery of sleep function: current perspectives and future directions. *Reviews in the Neurosciences*, 17(4), 375–392.
- Galliaud, E., Taillard, J., Sagaspe, P., Valtat, C., Bioulac, B., & Philip, P. (2008). Sharp and sleepy: evidence for dissociation between sleep pressure and nocturnal performance. *Journal of Sleep Research*, 17(1), 11–15.
- Gander, P. (2001). Fatigue management in air traffic control: the New Zealand approach. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 4(1), 49–62.
- Gander, P. (2005). A review of fatigue management in the maritime sector. *Wellington, New Zealand: Massey University, Wellington*.
- Gander, P., Marshall, N., Bolger, W., & Girling, I. (2005). An evaluation of driver training as a fatigue countermeasure. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8(1), 47–58.
- Gangwisch, J., Heymsfield, S., Boden-Albala, B., Buijs, R., Kreier, F., Pickering, T., Rundle, A., Zammit, G., & Malaspina, D. (2006). Short sleep duration as a risk factor

- for hypertension: analyses of the first national health and nutrition examination survey. *Hypertension*, 47(5), 833–839.
- Gauriau, C., Raffray, T., Choudat, D., Corman, B., & Leger, D. (2007). Les troubles du sommeil peuvent être objectivement améliorés chez les seniors par un programme personnalisé d'éducation à la santé. *La Presse Médicale*, 36(12), 1721–1731.
- Gertler, J. (2002). *Toolbox for transit operator fatigue*. Transportation Research Board.
- Giordanella, J. (2006). Rapport sur le thème du sommeil au ministre de la santé et des solidarités. Paris: Ministère de la Santé des Solidarités.
- Glenville, M., Broughton, R., Wing, A., & Wilkinson, R. (1978). Effects of sleep deprivation on short duration performance measures compared to the wilkinson auditory vigilance task. *Sleep*, 1(2), 169–176.
- Goel, N., Kim, H., & Lao, R. P. (2005). Gender differences in polysomnographic sleep in young healthy sleepers. *Chronobiology International*, 22, 905–915.
- Gold, D., Rogacz, S., Bock, N., Tosteson, T., Baum, T., Speizer, F., & Czeisler, C. (1992). Rotating shift work, sleep, and accidents related to sleepiness in hospital nurses. *American Journal of Public Health*, 82(7), 1011–1014.
- Goode, J. (2003). Are pilots at risk of accidents due to fatigue? *Journal of Safety Research*, 34(3), 309–313.
- Gouthiere, L., Mauvieux, B., Davenne, D., & Waterhouse, J. (2005). Complementary methodology in the analysis of rhythmic data, using examples from a complex situation, the rhythmicity of temperature in night shift workers. *Biological Rhythm Research*, 36(3), 177–193.
- Grace, R. (2001). Drowsy driver monitor and warning system. In *International driving symposium on human factors in driver assessment, training and vehicle design* (pp. 201–208). Citeseer.
- Graves, L., Heller, E., Pack, A., & Abel, T. (2003). Sleep deprivation selectively impairs memory consolidation for contextual fear conditioning. *Learning & Memory*, 10(3), 168.
- Groslambert, A., Candau, R., & Millet, G. (2008). Effect of sleep deprivation on anxiety and perceived fatigue during a one-man atlantic ocean crossing on a sport catamaran. *Environment and Behavior*, 40(1), 96–110.

- Guezennec, C., Satabin, P., Legrand, H., & Bigard, A. (1994). Physical performance and metabolic changes induced by combined prolonged exercise and different energy intakes in humans. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 68(6), 525–530.
- Guilleminault, C., & Dement, W. (1977). 235 cases of excessive daytime sleepiness:: diagnosis and tentative classification. *Journal of the Neurological Sciences*, 31(1), 13–27.
- Guilleminault, C., Tilkian, A., & Dement, W. (1976). The sleep apnea syndromes. *Annual Review of Medicine*, 27(1), 465–484.
- Gundel, A., Marsalek, K., & ten Thoren, C. (2007). A critical review of existing mathematical models for alertness. *Somnologie-Schlafforschung und Schlafmedizin*, 11(3), 148–156.
- Halvani, G., Zare, M., & Mirmohammadi, S. (2009). The relation between shift work, sleepiness, fatigue and accidents in iranian industrial mining group workers. *Industrial Health*, 47(2), 134–138.
- Hamazaki, Y., Morikawa, Y., Nakamura, K., Sakurai, M., Miura, K., Ishizaki, M., Kido, T., Naruse, Y., Suwazono, Y., & Nakagawa, H. (2011). The effects of sleep duration on the incidence of cardiovascular events among middle-aged male workers in japan. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 1–7.
- Harrison, Y., & Horne, J. (1997). Sleep deprivation affects speech. *Sleep*, 20(10), 871–877.
- Hasler, G., Buysse, D., Klaghofer, R., Gamma, A., Ajdacic, V., Eich, D., Rössler, W., & Angst, J. (2004). The association between short sleep duration and obesity in young adults: a 13-date prospective study. *Sleep*, 27(4), 661–666.
- Hayashi, M., Motoyoshi, N., & Hori, T. (2005). Recuperative power of a short daytime nap with or without stage 2 sleep. *Sleep*, 28(7), 829–836.
- Herscovitch, J., & Broughton, R. (1981). Sensitivity of the stanford sleepiness scale to the effects of cumulative partial sleep deprivation and recovery oversleeping. *Sleep*, 4(1), 83–91.
- Hoddes, E., Zarcone, V., Smythe, H., Phillips, R., & Dement, W. (1973). Quantification of sleepiness: a new approach. *Psychophysiology*, 10(4), 431–436.
- Horne, J. (2010). Sleepiness as a need for sleep: when is enough, enough? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(1), 108–118.

- Horne, J., & Östberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *International Journal of Chronobiology*, 4(2), 97–110.
- Horne, J., & Pettit, A. (1984). Sleep deprivation and the physiological response to exercise under steady-state conditions in untrained subjects. *Sleep*, 7(2), 168–179.
- Horne, J., & Reyner, L. (1995). Sleep related vehicle accidents. *British Medical Journal*, 310(6979), 565–567.
- Hursh, S., Redmond, D., Johnson, M., Thorne, D., Belenky, G., Balkin, T., Storm, W., Miller, J., & Eddy, D. (2004). Fatigue models for applied research in warfighting. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 75(Supplement 1), A44–A53.
- Hursh, S., & Van Dongen, H. (2010). Fatigue and performance modeling. In D. W. Kryger MH Roth T (Ed.), *Principles and practice of sleep medicine (5th ed.)* elsevier saunders, st. louis, missouri (pp. 745–752).
- Iber, C., Ancoli-Israel, S., Chesson, A., & Quan, S. (2007). The aasm manual for the scoring of sleep and associated events: rules. *Terminology and Technical Specifications*.
- INSV. (2005). *Institut national du sommeil et de la vigilance - le sommeil de l'adolescent*.
- INSV. (2006). *Institut national du sommeil et de la vigilance - sommeil et vie active*.
- INSV. (2010). *Institut national du sommeil et de la vigilance - quand le sommeil prend de l'âge*.
- Iwasaki, M., Iwata, S., Iemura, A., Yamashita, N., Tomino, Y., Anme, T., Yamagata, Z., Iwata, O., & Matsuishi, T. (2010). Utility of subjective sleep assessment tools for healthy preschool children: a comparative study between sleep logs, questionnaires, and actigraphy. *Journal of Epidemiology*, 1002030129.
- Jackson, M., & Van Dongen, H. (2011). Cognitive effects of sleepiness. In B. M. Thorpy MJ (Ed.), *Sleepiness: causes, consequences and treatment* (pp. 72–81). Cambridge University Press, Cambridge.
- Jasper, H. (1958). The ten twenty electrode system of the international federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10, 371–375.

- Jewett, M., & Kronauer, R. (1999). Interactive mathematical models of subjective alertness and cognitive throughput in humans. *Journal of Biological Rhythms*, 14(6), 588–599.
- Jewett, M., Wyatt, J., Ritz De Cecco, A., Khalsa, S., Dijk, D., & Czeisler, C. (1999). Time course of sleep inertia dissipation in human performance and alertness. *Journal of Sleep Research*, 8(1), 1–8.
- Jha, A., Duncan, B., & Bates, D. (2001). Fatigue, sleepiness, and medical errors. *Making health care safer: a critical analysis of patient safety practices*, 523–537.
- Johns, M. (1991). A new method for measuring daytime sleepiness: the epworth sleepiness scale. *Sleep*, 14(6), 540–545.
- Jouvet, M. (1992). *Le sommeil et le rêve*. Odile Jacob.
- Jouvet, M., & Michel, F. (1959). Corrélations électromyographiques du sommeil chez le chat décortiqué et mésencéphalique chronique. *CR Soc. Biol. (Paris)*, 153, 422–425.
- Kales, A., Tan, T., Kollar, E., Naitoh, P., Preston, T., & Malmstrom, E. (1970). Sleep patterns following 205 hours of sleep deprivation. *Psychosomatic Medicine*, 32(2), 189.
- Kawada, T. (2008). Agreement rates for sleep/wake judgments obtained via accelerometer and sleep diary: a comparison. *Behavior Research Methods*, 40(4), 1026–1029.
- Kerkhof, G. (2009). Transmeridian sailing. *Mind Open: Insights in Psychology*, (4), 4–5.
- Kleitman, N. (1963). *Sleep and wakefulness*. University of Chicago Press.
- Knutson, K., Spiegel, K., Penev, P., & Van Cauter, E. (2007). The metabolic consequences of sleep deprivation. *Sleep Medicine Reviews*, 11(3), 163–178.
- Kolb, D. (1984). *Experiential learning: experience as the source of learning and development*. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Krahn, L., Lin, S., Wisbey, J., Rummans, T., & O'Connor, M. (1997). Assessing sleep in psychiatric inpatients: nurse and patient reports versus wrist actigraphy. *Annals of Clinical Psychiatry*, 9(4), 203–210.
- Krishnan, V., & Collop, N. A. (2006). Gender differences in sleep disorders. *Current Opinion on Pulmonary Medicine*, 12, 383–389.

- Krueger, G., Belzer, M., Alvarez, A., Knippling, R., HUSTING, E., Brewster, R., & Siebert, J. (2007). Health and wellness of commercial drivers. *The Domain of Truck and Bus Safety Research*, 58–91.
- Krueger, J., Rector, D., Roy, S., Van Dongen, H., Belenky, G., & Panksepp, J. (2008). Sleep as a fundamental property of neuronal assemblies. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(12), 910–919.
- Kump, K., Whalen, C., Tishler, P., Browner, I., Ferrette, V., Strohl, K., Rosenberg, C., & Redline, S. (1994). Assessment of the validity and utility of a sleep-symptom questionnaire. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 150(3), 735–741.
- Kuriyama, K., Uchiyama, M., Suzuki, H., Tagaya, H., Ozaki, A., Aritake, S., Shibui, K., Xin, T., Lan, L., Kamei, Y., & T., T. (2005). Diurnal fluctuation of time perception under 30-h sustained wakefulness. *Neuroscience Research*, 53(2), 123–128.
- Kushida, C., Chang, A., Gadkary, C., Guilleminault, C., Carrillo, O., & Dement, W. (2001). Comparison of actigraphic, polysomnographic, and subjective assessment of sleep parameters in sleep-disordered patients. *Sleep Medicine*, 2(5), 389–396.
- Laboratoire d'Anthropologie Appliquée, (2006). *Rapport: analyse de la problématique scientifique et opérationnelle liée aux repos réduits et aux temps de service étendus pour les personnels navigant français*.
- Lagarias, J., Reeds, J., Wright, M., & Wright, P. (1999). Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on Optimization*, 9(1), 112–147.
- Lamminmäki, E., Saarinen, A., Lötjönen, J., Partinen, M., & Korhonen, I. (2005). Differences in light sleep and deep sleep measured with ist vivago® wristcare. In *Ifmbe proceedings* (Vol. 11, 1, pp. 1727–1983).
- Lamond, N., & Dawson, D. (1999). Quantifying the performance impairment associated with fatigue. *Journal of Sleep Research*, 8(4), 255–262.
- Lamond, N., Dawson, D., & Roach, G. (2005). Fatigue assessment in the field: validation of a hand-held electronic psychomotor vigilance task. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 76(5), 486–489.

- Lamond, N., JAY, S., Dorrian, J., Ferguson, S., Jones, C., & Dawson, D. (2007). The dynamics of neurobehavioural recovery following sleep loss. *Journal of Sleep Research*, 16(1), 33–41.
- Lamond, N., Jay, S., Dorrian, J., Ferguson, S., Roach, G., & Dawson, D. (2008). The sensitivity of a palm-based psychomotor vigilance task to severe sleep loss. *Behavior Research Methods*, 40(1), 347–352.
- Landis, C., Frey, C., Lentz, M., Rothermel, J., Buchwald, D., & Shaver, J. (2003). Self-reported sleep quality and fatigue correlates with actigraphy in midlife women with fibromyalgia. *Nursing Research*, 52(3), 140–147.
- Landolt, H., Dijk, D., Achermann, P., & Borbély, A. (1996). Effect of age on the sleep EEG: slow-wave activity and spindle frequency activity in young and middle-aged men. *Brain Research*, 738(2), 205–212.
- Landrigan, C., Rothschild, J., Cronin, J., Kaushal, R., Burdick, E., Katz, J., Lilly, C., Stone, P., Lockley, S., Bates, D. (2004). Effect of reducing interns' work hours on serious medical errors in intensive care units. *New England Journal of Medicine*, 351, 1838–48.
- Lavie, P. (1986). Ultrashort sleep-waking schedule. 'gates' and forbidden zones' for sleep. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 63(5), 414–425.
- Lavie, P. (1997). Melatonin: role in gating nocturnal rise in sleep propensity. *Journal of Biological Rhythms*, 12(6), 657–665.
- Lawton, C., Campbell, J., & Miller, D. (2005). *Human performance modeling for system of systems analytics: soldier fatigue*.
- Leger, D. (1994). The cost of sleep-related accidents: a report for the national commission on sleep disorders research. *Sleep*, 17(1), 84.
- Leger, D. (2008). Conséquences économiques du manque de sommeil et son impact sur la qualité de vie. *Médecine du Sommeil*, 5(18), 19–23.
- Léger, D. (2001). *Troubles du sommeil*. Editions Doin.
- Léger, D., & Ogrizek, P. (2009). Troubles du sommeil: pas seulement l'insomnie. *Médecine*, 5(1), 20–23.
- Leprout, R., Colecchia, E., Berardi, A., Stickgold, R., Kosslyn, S., & Van Cauter, E. (2003). Individual differences in subjective and objective alertness during sleep deprivation are stable and unrelated. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 284(2), R280–R290.

- Littner, M., Kushida, C., Anderson, W., Bailey, D., Berry, R., Davila, D., Hirshkowitz, M., Kapen, S., Kramer, M., & Loubé, D. (2003). Practice parameters for the role of actigraphy in the study of sleep and circadian rhythms: an update for 2002. *Sleep*, 26(3), 337–341.
- Lockley, S., Barger, L., Ayas, N., Rothschild, J., Czeisler, C., & Landrigan, C. (2007). Effects of health care provider work hours and sleep deprivation on safety and performance. *Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety*, 33(Supplement 1), 7–18.
- Lockley, S., Skene, D., & Arendt, J. (1999). Comparison between subjective and actigraphic measurement of sleep and sleep rhythms. *Journal of Sleep Research*, 8(3), 175–183.
- Loomis, A., Harvey, E., & Hobart, G. (1937). Cerebral states during sleep, as studied by human brain potentials. *Journal of Experimental Psychology*, 21(2), 127.
- Lorenzo, J., & Barbanoj, M. (2002). Variability of sleep parameters across multiple laboratory sessions in healthy young subjects: the “very first night effect”. *Psychophysiology*, 39(04), 409–413.
- Lötjönen, J., Korhonen, I., Hirvonen, K., Eskelinen, S., Myllymäki, M., & Partinen, M. (2003). Automatic sleep-wake and nap analysis with a new wrist worn online activity monitoring device vivago® wristcare. *Sleep*, 26(1), 86–90.
- Machin, M. (2003). Evaluating a fatigue management training program for coach drivers. *Driver Behaviour and Training*, 1, 75–83.
- Mallis, M., Mejdal, S., Nguyen, T., & Dinges, D. (2004). Summary of the key features of seven biomathematical models of human fatigue and performance. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 75(Supplement 1), A4–A14.
- Marcora, S., & Staiano, W. (2010). The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle? *European Journal of Applied Physiology*, 1–8.
- Marcus, C., & Loughlin, G. (1996). Effect of sleep deprivation on driving safety in housestaff. *Sleep*, 19(10), 763–766.
- Martin, B. (1981). Effect of sleep deprivation on tolerance of prolonged exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 47(4), 345–354.
- Mathis, J., & Hess, C. (2009). Sleepiness and vigilance tests. *Swiss Medical Weekly*, 139, 214–219.



- Maycock, G. (1997). Sleepiness and driving: the experience of uk car drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 29(4), 453–462.
- McCarthy, M., & Waters, W. (1997). Decreased attentional responsivity during sleep deprivation: orienting response latency, amplitude, and habituation. *Sleep*, 20(2), 115–123.
- McCauley, P., Kalachev, L., Smith, A., Belenky, G., Dinges, D., & Van Dongen, H. (2009). A new mathematical model for the homeostatic effects of sleep loss on neurobehavioral performance. *Journal of Theoretical Biology*, 256(2), 227–239.
- Meijer, G., Westerterp, K., Seyts, G., Janssen, G., Saris, W., & Ten Hoor, F. (1991). Body composition and sleeping metabolic rate in response to a 5-month endurance-training programme in adults. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 62(1), 18–21.
- Melamed, S., & Oksenberg, A. (2002). Excessive daytime sleepiness and risk of occupational injuries in non-shift daytime workers. *Sleep*, 25(3), 315–322.
- Meltzer, L., & Mindell, J. (2007). Relationship between child sleep disturbances and maternal sleep, mood, and parenting stress: a pilot study. *Journal of Family Psychology*, 21(1), 67.
- Meshkati, N. (2006). Safety and human factors considerations in control rooms of oil and gas pipeline systems: conceptual issues and practical observations. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, 12(1), 79–93.
- Mitler, M., Gujavarty, K., & Browman, C. (1982). Maintenance of wakefulness test: a polysomnographic technique for evaluating treatment efficacy in patients with excessive somnolence. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 53(6), 658–661.
- Mitler, M., Miller, J., Lipsitz, J., Walsh, J., & Wylie, C. (1997). The sleep of long-haul truck drivers. *The New England Journal of Medicine*, 337(11), 755–761.
- Mollard, R., Cabon, P., Debouck, F., Grau, J., Maille, N., & Deharvengt, S. (2009). Towards a fatigue risk management system to the french regional airlines: applications to the reduced rests and the split duties. In *International conference on fatigue management in transport operations. a framework for progress, boston ma, us department of transportation*.

- Monk, T. (1989). A visual analogue scale technique to measure global vigor and affect. *Psychiatry Research*, 27(1), 89–99.
- Moore-Ede, M., Heitmann, A., Guttkuhn, R., Trutschel, U., Aguirre, A., & Croke, D. (2004). Circadian alertness simulator for fatigue risk assessment in transportation: application to reduce frequency and severity of truck accidents. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 75(Supplement 1), A107–A118.
- Morgenthaler, T., Alessi, C., Friedman, L., Owens, J., Kapur, V., Boehlecke, B., Brown, T., Chesson Jr, A., Coleman, J., Lee-Chiong, T. (2007). Practice parameters for the use of actigraphy in the assessment of sleep and sleep disorders: an update for 2007. *Sleep*, 30(4), 519–529.
- Moses, J., Lubin, A., Naitoh, P., & Johnson, L. (1978). Circadian variation in performance, subjective sleepiness, sleep, and oral temperature during an altered sleep-wake schedule. *Biological Psychology*, 6(4), 301–308.
- Mougin, F., Simon-Rigaud, M., Davenne, D., Renaud, A., Garnier, A., Kantelip, J., & Magnin, P. (1991). Effects of sleep disturbances on subsequent physical performance. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 63(2), 77–82.
- Nagai, M., Hoshida, S., & Kario, K. (2010). Sleep duration as a risk factor for cardiovascular disease—a review of the recent literature. *Current Cardiology Reviews*, 6(1), 54.
- Naitoh, P. (1989). Minimal sleep to maintain performance: search for sleep quantum in sustained operations. Naval Health Research Center San Diego CA.
- Naitoh, P., Kelly, T., & Babkoff, H. (1993). Sleep inertia: best time not to wake up? *Chronobiology International*, 10(2), 109–118.
- Oliver, S., Costa, R., Laing, S., Bilzon, J., & Walsh, N. (2009). One night of sleep deprivation decreases treadmill endurance performance. *European Journal of Applied Physiology*, 107(2), 155–161.
- Olofsen, E., Van Dongen, H., Mott, C., Balkin, T., & Terman, D. (2010). Current approaches and challenges to development of an individualized sleep and performance prediction model. *The Open Sleep Journal*, 3, 24–43.
- Olson, E., Drage, L., & Auger, R. (2009). Sleep deprivation, physician performance, and patient safety. *Chest*, 136(5), 1389–1396.

- Pace-Schott, E., Hutcherson, C., Bemporad, B., Morgan, A., Kumar, A., Hobson, J., & Stickgold, R. (2009). Failure to find executive function deficits following one night's total sleep deprivation in university students under naturalistic conditions. *Behavioral Sleep Medicine*, 7(3), 136–163.
- Pack, A., Pack, A., Rodgman, E., Cucchiara, A., Dinges, D., & Schwab, C. (1995). Characteristics of crashes attributed to the driver having fallen asleep. *Accident Analysis & Prevention*, 27(6), 769–775.
- Parrott, A. (1991). Performance tests in human psychopharmacology (3): construct validity and test interpretation. *Human Psychopharmacology: Clinical and Experimental*, 6(3), 197–207.
- Patel, S., & Hu, F. (2008). Short sleep duration and weight gain: a systematic review. *Obesity*, 16(3), 643–653.
- Patrick, G., & Gilbert, J. (1896). Studies from the psychological laboratory of the university of iowa: on the effects of loss of sleep. *Psychological Review*, 3(5), 469–483.
- Philbrick, K., Sherry, P., of Transportation. Research, U. S. D., Administration, S. P., Administration, U. S. F. R., & for Intermodal Transportation (US), N. C. (2004). *The effects of individualized actigraph feedback and coaching on fatigue management in railroad dispatchers*. US Dept. of Transportation, Research and Special Programs Administration.
- Philip, P. (2005). Sleepiness of occupational drivers. *Industrial Health*, 43(1), 30–33.
- Philip, P., & Åkerstedt, T. (2006). Transport and industrial safety, how are they affected by sleepiness and sleep restriction? *Sleep Medicine Reviews*, 10(5), 347–356.
- Philip, P., Sagaspe, P., Taillard, J., Moore, N., Guilleminault, C., Sanchez-Ortuno, M., Akerstedt, T., & Bioulac, B. (2003). Fatigue, sleep restriction, and performance in automobile drivers: a controlled study in a natural environment. *Sleep*, 26(3), 277–280.
- Philip, P., Taillard, J., Sagaspe, P., Valtat, C., Sanchez-Ortuno, M., Moore, N., Charles, A., & Bioulac, B. (2004). Age, performance and sleep deprivation. *Journal of Sleep Research*, 13(2), 105–110.
- Phillips, R., & Sagberg, F. (2010). Managing driver fatigue in occupational settings.

- Plyley, M., Shephard, R., Davis, G., & Goode, R. (1987). Sleep deprivation and cardiorespiratory function. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 56(3), 338–344.
- Polzella, D. (1975). Effects of sleep deprivation on short-term recognition memory. *Journal of Experimental Psychology*, 1(2), 194–200.
- Rechtschaffen, A., Gilliland, M., Bergmann, B., & Winter, J. (1983). Physiological correlates of prolonged sleep deprivation in rats. *Science*, 221(4606), 182–184.
- Reilly, T., & Edwards, B. (2007). Altered sleep-wake cycles and physical performance in athletes. *Physiology & Behavior*, 90(2-3), 274–284.
- Reilly, T., & Piercy, M. (1994). The effect of partial sleep deprivation on weight-lifting performance. *Ergonomics*, 37(1), 107–115.
- Rétey, J., Adam, M., Gottselig, J., Khatami, R., Dürr, R., Achermann, P., & Landolt, H. (2006). Adenosinergic mechanisms contribute to individual differences in sleep deprivation-induced changes in neurobehavioral function and brain rhythmic activity. *The Journal of Neuroscience*, 26(41), 10472.
- Reynard, W. (1986). *The development of the nasa aviation safety reporting system*. National Aeronautics, Space Administration (Washington, DC, and Springfield, Va.)
- Reyner, L., Horne, J., & Reyner, A. (1995). Gender and age related differences in sleep determined by home-recorded sleep logs and actimetry from 400 adults. *Sleep*, 18, 127–134.
- Reyner, L., & Baulk, S. (1998). Fatigue in ferry crews: a pilot study. *Seafarers' International Research Centre, Cardiff University*.
- Roach, G., Dawson, D., & Lamond, N. (2006). Can a shorter psychomotor vigilance task be used as a reasonable substitute for the ten-minute psychomotor vigilance task? *Chronobiology International*, 23(6), 1379–1387.
- Roach, G., Fletcher, A., & Dawson, D. (2004). A model to predict work-related fatigue based on hours of work. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 75(Supplement 1), A61–A69.
- Robin, J. (1998). Transposition didactique en gymnastique: les savoirs de référence développés par quatre leaders de théories didactiques. *Recherches en EPS: bilan et perspectives*, 109–118.

- Rodgers, C., Paterson, D., Cunningham, D., Noble, E., Pettigrew, F., Myles, W., & Taylor, A. (1995). Sleep deprivation: effects on work capacity, self-paced walking, contractile properties and perceived exertion. *Sleep, 18*(1), 30–38.
- Rogers, A., Hwang, W., Scott, L., Aiken, L., & Dinges, D. (2004). The working hours of hospital staff nurses and patient safety. *Health Affairs, 23*(4), 202–212.
- Rogers, N., Dorrian, J., & Dinges, D. (2003). Sleep, waking and neurobehavioral performance. *Frontiers in Bioscience, 8*, s1056–1067.
- Rosekind, M., Gander, P., Gregory, K., Smith, R., Miller, D., Oyung, R., Webbon, L., & Johnson, J. (1997). Managing fatigue in operational settings 2: an integrated approach. *Hospital Topics, 75*, 31–35.
- Rosekind, M., Neri, D., Gregory, K., Mallis, M., Bowman, S., & Oyung, R. (1994). A nasa education and training module on alertness management: a survey of implementation and application. *Sleep Research, 523*.
- Rosekind, M., Smith, R., Miller, D., Co, E., Gregory, K., Webbon, L., Gander, P., & Lebacqz, J. (1995). Alertness management: strategic naps in operational settings. *Journal of Sleep Research, 4*(2), 62–66.
- Rosekind, M., Center, A. R., Aeronautics, U. S. N., Administration, S., & Administration, U. S. F. A. (1999). *Crew factors in flight operations: alertness management in flight operations*. National Aeronautics and Space Administration.
- Rosekind, M., Center, A. R., Aeronautics, U. S. N., Administration, S., & Administration, U. S. F. A. (2001). *Crew factors in flight operations: alertness management in flight operations education module*. National Aeronautics and Space Administration.
- Rosen, I., Gimotty, P., Shea, J., & Bellini, L. (2006). Evolution of sleep quantity, sleep deprivation, mood disturbances, empathy, and burnout among interns. *Academic Medicine, 81*(1), 82–86.
- Rupp, T., Wesensten, N., Bliese, P., & Balkin, T. (2009). Banking sleep: realization of benefits during subsequent sleep restriction and recovery. *Sleep, 32*(3), 311.
- Sadeh, A. (2011). The role and validity of actigraphy in sleep medicine: an update. *Sleep Medicine Reviews, 259–267*.
- Sadeh, A., & Acebo, C. (2002). The role of actigraphy in sleep medicine. *Sleep Medicine Reviews, 6*(2), 113–124.

- Sadeh, A., Keinan, G., & Daon, K. (2004). Effects of stress on sleep: the moderating role of coping style. *Health Psychology, 23*(5), 542.
- Sadeh, A., Sharkey, K., & Carskadon, M. (1994). Fundamental research activity-based sleep-wake identification: an empirical test of methodological issues. *Sleep, 17*(3), 201–207.
- Sagaspe, P., Taillard, J., & Philip, P. (2010). Vulnérabilités inter-individuelles à la privation de sommeil. existe t'il des facteurs prédictifs? *Sommeil et Vigilance, (19)*, 14–16.
- Schutte, P. (2009). *Wake up to fatigue risk management*. South African Institute of Occupational Hygiene.
- Scott, L., Hwang, W., Rogers, A., Nysse, T., Dean, G., & Dinges, D. (2007). The relationship between nurse work schedules, sleep duration, and drowsy driving. *Sleep, 30*(12), 1801–1807.
- Seugnet, L., Boero, J., Gottschalk, L., Duntley, S., & Shaw, P. (2006). Identification of a biomarker for sleep drive in flies and humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 103*(52), 19913–19918.
- Silber, M., Ancoli-Israel, S., Bonnet, M., Chokroverty, S., Grigg-Damberger, M., Hirshkowitz, M., Kapen, S., Keenan, S., Kryger, M., & Penzel, T. (2007). The visual scoring of sleep in adults. *Journal of Clinical Sleep Medicine, 3*(2), 121–131.
- Sivak, M. (2006). Sleeping more as a way to lose weight. *Obesity Reviews, 7*(3), 295–296.
- Smiley, A. (2002). Fatigue and driving. *Human Factors in Traffic Safety, 143–175*.
- Smiley, A., & Smahel, A. (2009). Effects of fatigue management program on the commercial motor vehicle drivers. In *International conference on fatigue management in transport operations. a framework for progress, boston ma, us department of transportation*.
- Souissi, N., & Davenne, D. (2004). Rythmicité biologique circadienne et performances anaérobies. *Science et Motricité, (3)*, 39–55.
- Souissi, N., Sesboüé, B., Gauthier, A., Larue, J., & Davenne, D. (2003). Effects of one night's sleep deprivation on anaerobic performance the following day. *European Journal of Applied Physiology, 89*(3), 359–366.

- Spiegel, K., Knutson, K., Leproult, R., Tasali, E., & Cauter, E. (2005). Sleep loss: a novel risk factor for insulin resistance and type 2 diabetes. *Journal of Applied Physiology*, 99(5), 2008.
- Spiegel, R. (1981). *Sleep and sleeplessness in advanced age* (W. ED, Ed.). Spectrum Publications.
- Stampi, C. (1989a). Application of actigraphs for detection of rest activity patterns in competitive solo-sailors. *Sleep Research*, (18), 379.
- Stampi, C. (1989b). Polyphasic sleep strategies improve prolonged sustained performance: a field study on 99 sailors. *Work & Stress*, 3(1), 41–55.
- Stampi, C., Mullington, J., Rivers, M., Campos, J., & Broughton, R. (1990). Ultrashort sleep schedules: sleep architecture and recuperative value of 80, 50 and 20 min naps. *Sleep*, 90, 71–4.
- Stewart, S., & Holmes, A. (2008). The easy jet fatigue management system. In *The faa fatigue management symposium:partnerships for solutions,vienna va*.
- Taheri, S., Lin, L., Austin, D., Young, T., & Mignot, E. (2004). Short sleep duration is associated with reduced leptin, elevated ghrelin, and increased body mass index. *PLoS Medicine*, 1(3), e62.
- Taillard, J., Philip, P., Chastang, J., & Bioulac, B. (2004). Validation of horne and ostberg morningness-eveningness questionnaire in a middle-aged population of french workers. *Journal of Biological Rhythms*, 19(1), 76–86.
- Takahashi, M., & Arito, H. (2000). Maintenance of alertness and performance by a brief nap after lunch under prior sleep deficit. *Sleep*, 23(6), 813–819.
- Theunynck, D., Hurdiel, R., Pezé, T., Estruch, X., & Bui-Xuân, G. (2010). Sommeil et course au large en solitaire: comportements des coureurs et étude de faisabilité d'un agenda interactif de sommeil. *PISTES-Perspectives Interdisciplinaires Sur le Travail Et la Santé*, 12(2).
- Theunynck, D., Hurdiel, R., Vanhelst, J., Zunquin, G., Peze, T., Bui-Xuan, G., Estruch, X., & Mikulovic, J. (2007). Analyse de la fatigue et du sommeil d'un coureur en course au large lors d'un tour du monde de 104 jours en solitaire et sans escale. *Congrès de l'ACAPS, Louvain*, 31, 574–75.
- Thomas, M., Sing, H., Belenky, G., Holcomb, H., Mayberg, H., Dannals, R., Wagner, J., Thorne, D., Popp, K., Rowland, L. (2000). Neural basis of alertness and cognitive performance impairments during sleepiness. i. effects of 24 h of sleep depriva-

- tion on waking human regional brain activity. *Journal of Sleep Research*, 9(4), 335–352.
- Tiberge, M. (1992). Sommeil et performances. In *Exploration du sommeil et de la vigilance chez l'adulte* (Editions Médicales Internationales, pp. 342–351). Benoit O. and Goldenberg F.
- Tietzel, A., & Lack, L. (2001). The short-term benefits of brief and long naps following nocturnal sleep restriction. *Sleep*, 24(3), 293–300.
- Tirilly, G. (2002). *Ajustement du rythme veille-sommeil et de la vigilance aux horaires fractionnés en mer: influence des facteurs circadiens et sociaux*. (PhD thesis).
- Tsuchiyama, K., Nagayama, H., Kudo, K., Kojima, K., & Yamada, K. (2003). Discrepancy between subjective and objective sleep in patients with depression. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 57(3), 259–264.
- Tucker, A., Dinges, D., & van Dongen, H. (2007). Trait interindividual differences in the sleep physiology of healthy young adults. *Journal of Sleep Research*, 16(2), 170–180.
- Turner, T., Drummond, S., Salamat, J., & Brown, G. (2007). Effects of 42 hr of total sleep deprivation on component processes of verbal working memory. *Neuropsychology*, 21(6), 787–795.
- Usui, A., Ishizuka, Y., Obinata, I., Okado, T., Fukuzawa, H., & Kanba, S. (1999). Validity of sleep log compared with actigraphic sleep-wake state ii. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 53(2), 183–184.
- Van Cauter, E., & Knutson, K. (2008). Sleep and the epidemic of obesity in children and adults. *European Journal of Endocrinology*, 159(suppl\_1), S59–S66.
- Van Den Berg, J., Neven, A., Tulen, J., Hofman, A., Witteman, J., Miedema, H., & Tiemeier, H. (2008a). Actigraphic sleep duration and fragmentation are related to obesity in the elderly: the rotterdam study. *International Journal of Obesity*, 32(7), 1083–1090.
- Van Den Berg, J., Neven, A., Tulen, J., Hofman, A., Witteman, J., Miedema, H., & Tiemeier, H. (2008b). Actigraphic sleep duration and fragmentation are related to obesity in the elderly: the rotterdam study. *International Journal of Obesity*, 32(7), 1083–1090.



- Van Dongen, H., Baynard, M., Maislin, G., & Dinges, D. (2004). Systematic interindividual differences in neurobehavioral impairment from sleep loss: evidence of trait-like differential vulnerability. *Sleep*, 27(3), 423–433.
- Van Dongen, H., & Belenky, G. (2011). Model-based fatigue risk management. In G. Matthews, P. Desmond, C. Neubauer & P. Hancock (Eds.), *Handbook of operator fatigue*. Aldershot: Ashgate Publishing (p. in press).
- Van Dongen, H., Belenky, G., & Krueger, J. (2010). Investigating the temporal dynamics and underlying mechanisms of cognitive fatigue. In P. Ackerman (Ed.), *Cognitive fatigue: multidisciplinary perspectives on current research and future applications*. (Pp. 127–147). American Psychological Association, Washington, DC.
- Van Dongen, H., Caldwell, J., & Caldwell, J. (2006). Investigating systematic individual differences in sleep-deprived performance on a high-fidelity flight simulator. *Behavior Research Methods*, 38(2), 333.
- Van Dongen, H., & Dinges, D. (2003). Sleep debt and cumulative excess wakefulness. *Sleep*, 26(3), 249–249.
- Van Dongen, H., & Dinges, D. (2005). Circadian rhythms in sleepiness, alertness, and performance. In M. H. Kryger, R. T. & W. C. Dement (Eds.), *Principles and practice of sleep medicine*. 4th ed. Philadelphia, PA: Elsevier/Saunders (pp. 435–43).
- Van Dongen, H., & Hursh, S. (2010). Fatigue, performance, errors and accidents. In T. Kryger M.H. and Roth & W. Dement (Eds.), *Principles and practice of sleep medicine*, 5th ed. Elsevier Saunders, Philadelphia (p. chapter 67).
- Van Dongen, H., Maislin, G., Mullington, J., & Dinges, D. (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(2), 117–126.
- Van Dongen, H., Olofsen, E., Dinges, D., & Maislin, G. (2004). Mixed-model regression analysis and dealing with interindividual differences. *Methods in Enzymology*, 384, 139–171.
- Van Dongen, H., Vitellaro, K., & Dinges, D. (2005). Individual differences in adult human sleep and wakefulness: leitmotif for a research agenda. *Sleep*, 28(4), 479–496.

- Vanhelst, J., Hurdiel, R., Mikulovic, J., Bui-Xuan, G., Fardy, P., Béghin, L., & Theunynck, D. (2010). Determination of thresholds for defining physical activity levels using the new vivago® accelerometer. In *International conference on ambulatory monitoring of physical activity and movement, icampam 2011. glasgow*.
- Vermersch, J. (1994). L'entretien d'explication, esf (ed.), coll. *Pédagogies*.
- Viola, A., Archer, S., James, L., Groeger, J., Lo, J., Skene, D., von Schantz, M., & Dijk, D. (2007). Per3 polymorphism predicts sleep structure and waking performance. *Current Biology, 17*(7), 613–618.
- Vioque, J., Torres, A., & Quiles, J. (2000). Time spent watching television, sleep duration and obesity in adults living in valencia, spain. *International Journal of Obesity, 24*(12), 1683–1688.
- Von Kries, R., Toschke, A., Wurmser, H., Sauerwald, T., & Koletzko, B. (2002). Reduced risk for overweight and obesity in 5- and 6-y-old children by duration of sleep—a cross-sectional study. *International Journal of Obesity and Related Metabolic Disorders, 26*(5), 710.
- Webb, W. (1995). The cost of sleep-related accidents: a reanalysis. *Sleep, 18*(4), 276–280.
- Webb, W., & Agnew, H. (1971). Stage 4 sleep: influence of time course variables. *Science, 174*, 1354–1356.
- Werner, H., Molinari, L., Guyer, C., & Jenni, O. (2008). Agreement rates between actigraphy, diary, and questionnaire for children's sleep patterns. *Archives of Pediatrics and Adolescent Medicine, 162*(4), 350–357.
- Wilkinson, R. (1961). Interaction of lack of sleep with knowledge of results, repeated testing, and individual differences. *Journal of Experimental Psychology, 62*(3), 263.
- Wilkinson, R., & Houghton, D. (1975). Portable four-choice reaction time test with magnetic tape memory. *Behavior Research Methods, 7*(5), 441–446.
- Williams, H., & Lubin, A. (1967). Speeded addition and sleep loss. *Journal of Experimental Psychology, 73*(2), 313–317.
- Wolfson, A., Carskadon, M., Acebo, C., Seifer, R., Fallone, G., Lubyak, S., & Martin, J. (2003). Evidence for the validity of a sleep habits survey for adolescents. *Sleep, 26*(2), 213–216.

- Wright, K., Johnstone, J., Fabregas, S., & Shambroom, J. (2008). Evaluation of a portable, dry sensor-based automatic sleep monitoring system. *Sleep*, 31 (Suppl.), A337.
- Zhong, X., Hilton, H., Gates, G., Jelic, S., Stern, Y., Bartels, M., DeMeersman, R., & Basner, R. (2005). Increased sympathetic and decreased parasympathetic cardiovascular modulation in normal humans with acute sleep deprivation. *Journal of Applied Physiology*, 98(6), 2024–2032.

# **Annexes**

## Scextan®

- A.1 Scextan® mode *Terre* - organigramme**
- A.2 Scextan® mode *Terre* - captures d'écran**
- A.3 Scextan® mode *Mer* - organigramme**
- A.4 Scextan® mode *Mer* - capture d'écran**
- A.5 Scextan® mode *Mer* - rapport PDF**
- A.6 Scextan® dans sa future version**

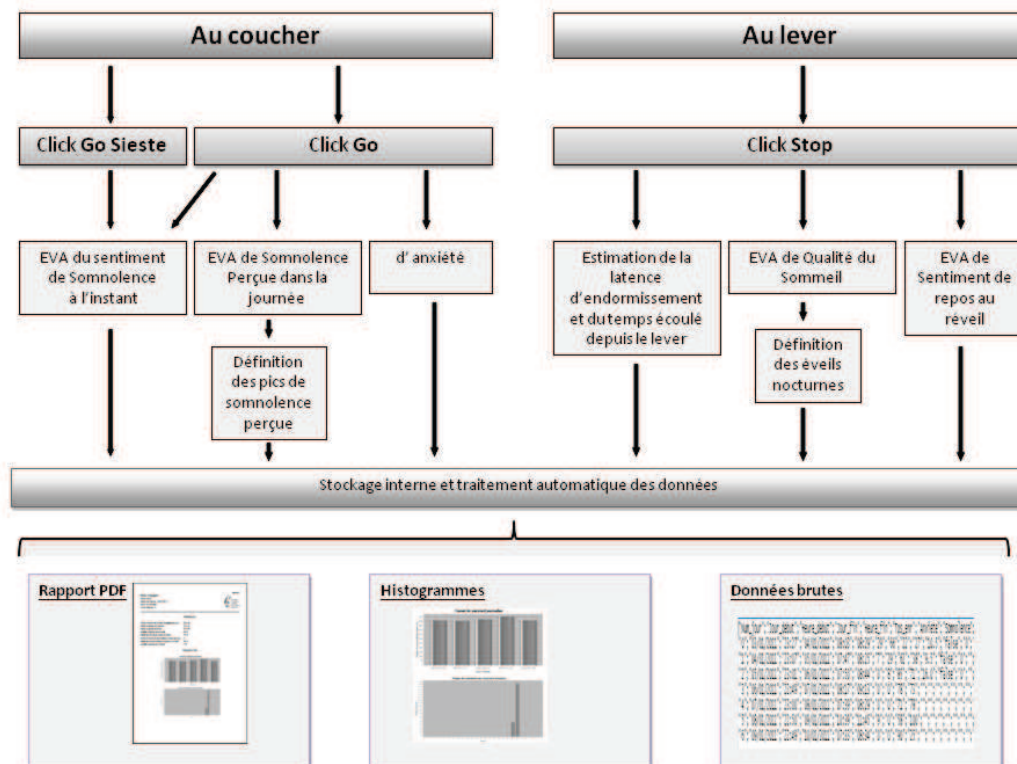


FIGURE A.1: Cet organigramme présente l'enchaînement des fonctions de Scextan® sur lesquels l'utilisateur agit pour l'évaluation de son sommeil et de sa somnolence à terre.

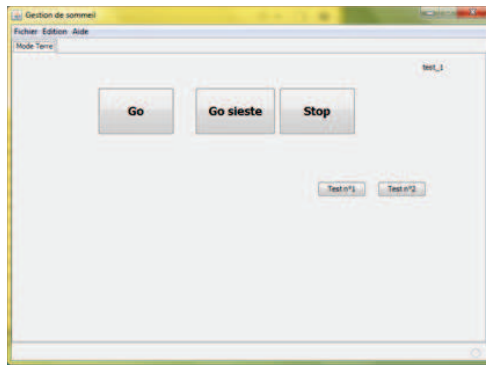


Image 1.

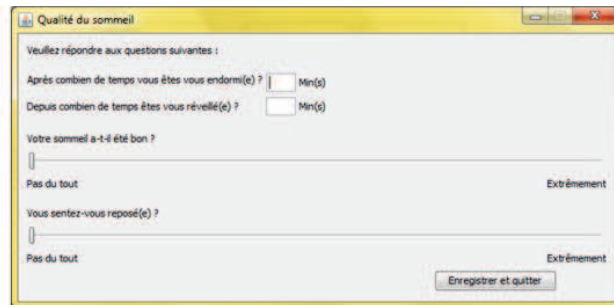


Image 3.

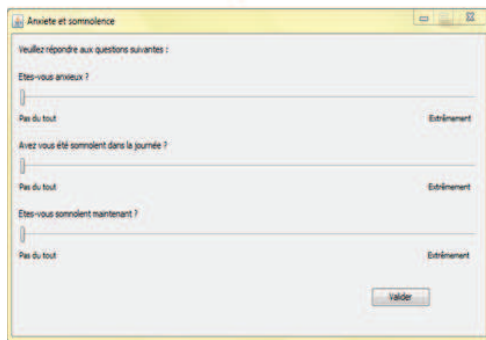


Image 2.

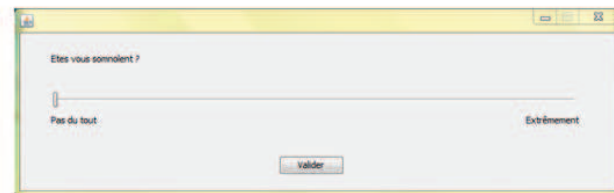


Image 4.

FIGURE A.2: L'Image 1 représente l'interface de base où le sujet signifie qu'il éteint la lumière (Go ou Go Sieste) ou qu'il se lève (Stop). L'Image 2 représente les Echelles Visuelles Analogiques permettant l'évaluation de (i) l'état d'anxiété, (ii) le niveau de somnolence perçue dans la journée, (iii) le niveau de somnolence à l'instant t. L'Image 3 illustre les moyens permettant d'évaluer la latence d'endormissement, le temps écoulé depuis l'éveil, mais également la qualité subjective du sommeil ainsi que l'état de forme au réveil. Enfin, une fenêtre qui n'est pas présentée ici permet d'évaluer le nombre et la durée des éveils nocturnes perçus.

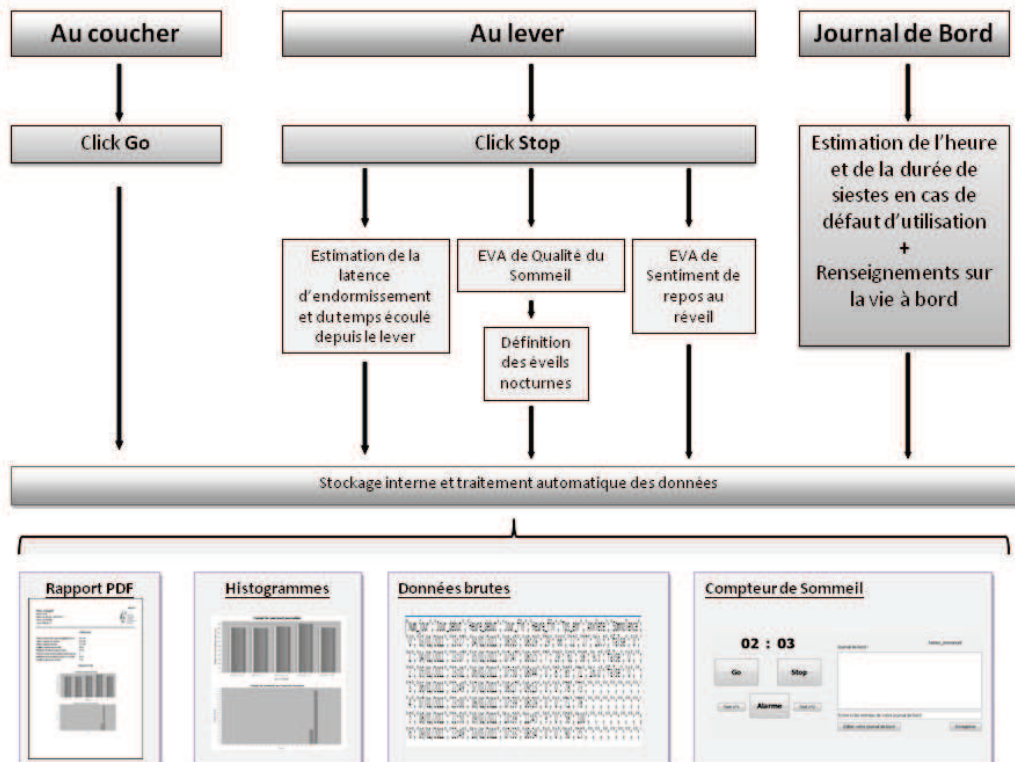


FIGURE A.3: Cet organigramme présente l'enchaînement des fonctions de Scextan® sur lesquels l'utilisateur agit pour l'évaluation de son sommeil et de sa somnolence et de la vie à bord, en mer.



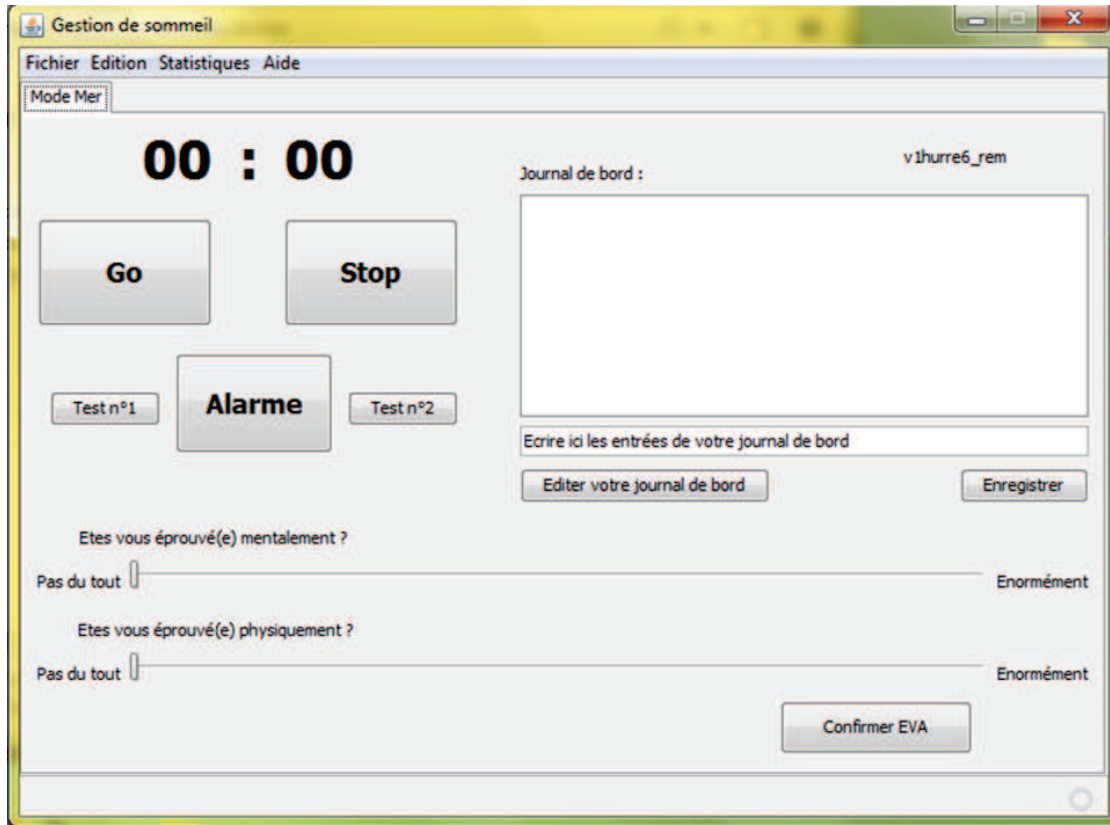


FIGURE A.4: Cette image représente l'interface de base en mode *mer* où le skipper signifie qu'il va se coucher (Go) ou qu'il se lève (Stop). Les deux Echelles Visuelles Analogiques de 100mm, permettant l'évaluation de l'état de forme. La même fenêtre que pour le mode terre ( image 3 A.2 page A-3) illustre les moyens permettant d'évaluer la latence d'endormissement, le temps écoulé depuis l'éveil, mais également la qualité subjective du sommeil ainsi que l'état de forme au réveil. De façon modulaire, un compteur informe le skipper du temps passé à la couchette depuis 6 heures du matin. Ce compteur se remet automatiquement à zéro à 6 heures du matin tout les jours et le skipper peut, à tout moment, suivre sa "consommation de sommeil" depuis le début de la course, en lisant le rapport généré à la demande (voir figure A.5 page A-6). Un journal de bord et une alarme sont également disponibles.

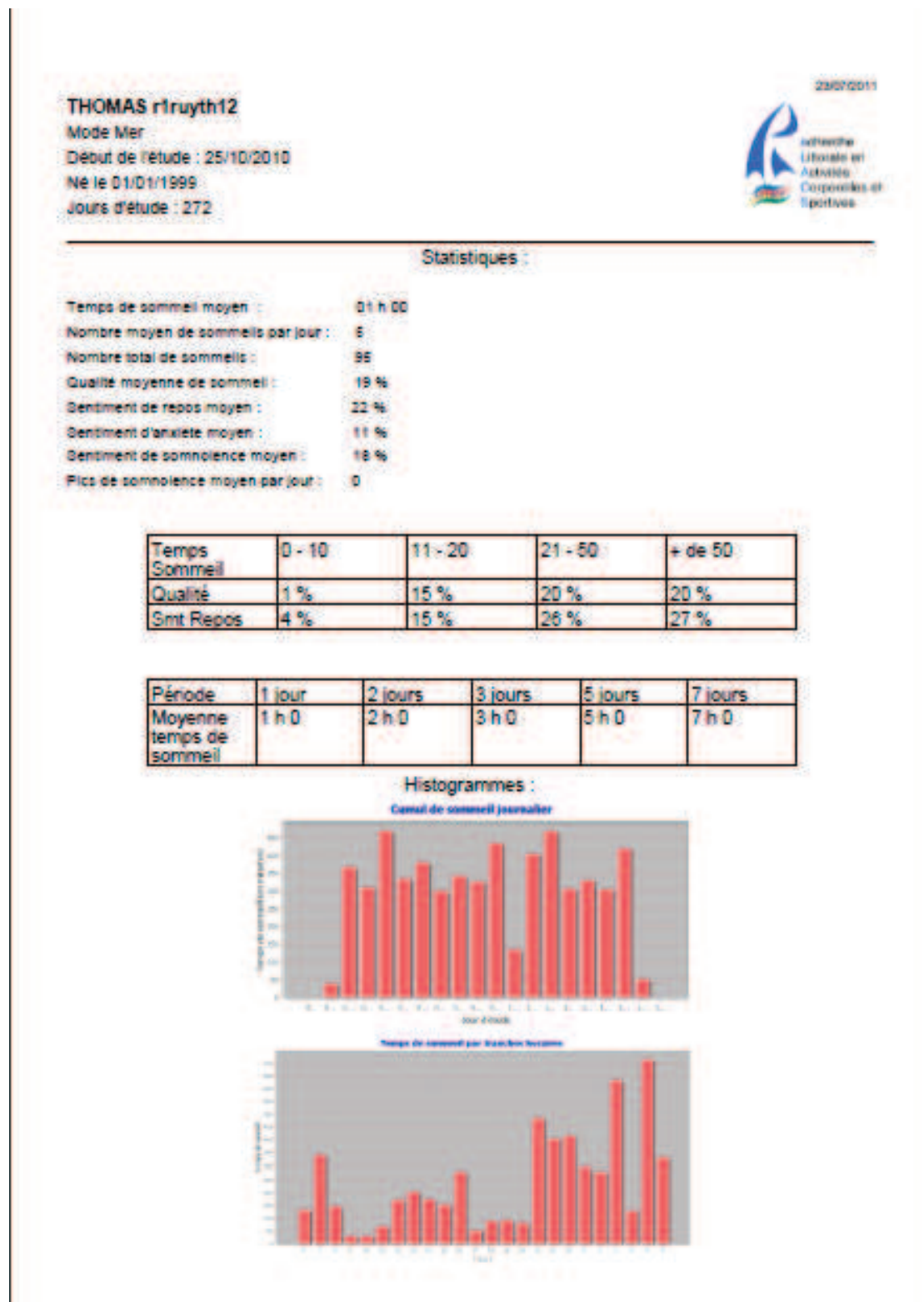


FIGURE A.5: Rapport généré à l'arrivée de la Route du Rhum par le skipper TR.

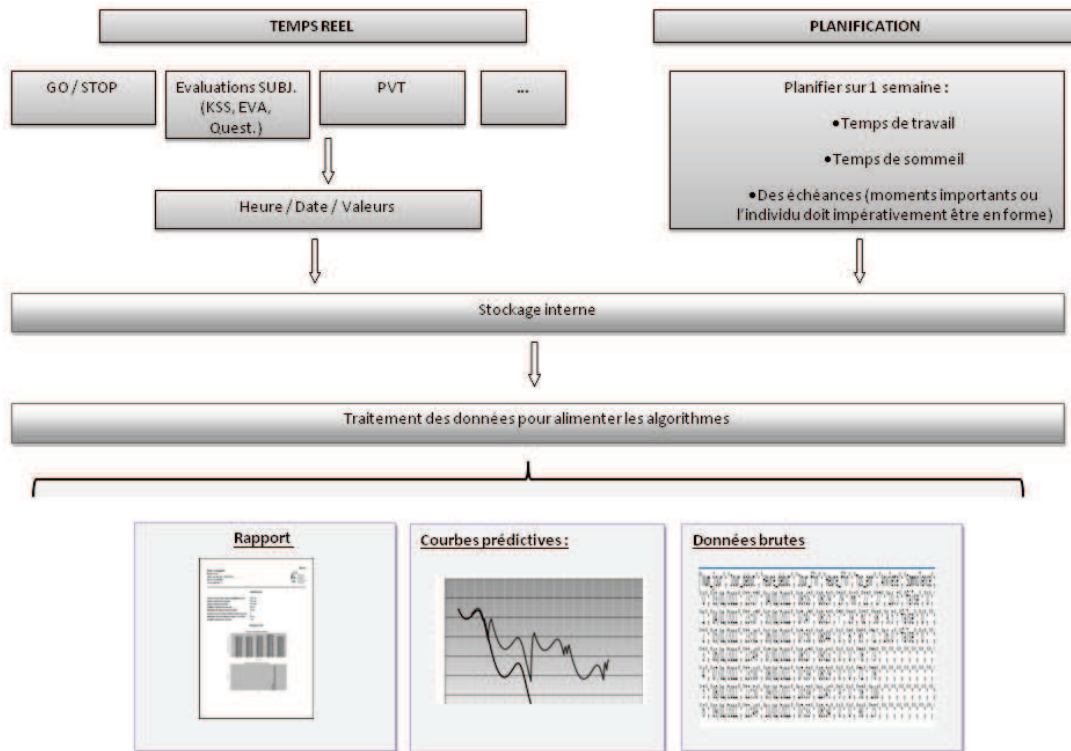


FIGURE A.6: Cet organigramme présente les fonctions de Scextan® telles qu'elles seront prochainement développées sur smartphone. La fonction de prédiction est centrale dans Scextan® afin de créer des repères objectifs à l'utilisateur. La conception de cette application doit permettre de compléter les analyses par l'inclusion de questionnaires, échelles etc.. de façon modulaire.



## Parcours de courses

- C.1 Parcours de la course Select 650**
- C.2 Parcours de la course Solo Ports de France**
- C.3 Parcours de la course Solo Massif Marine**
- C.4 Parcours de la course Transat 650**
- C.5 Parcours de la course Route du Rhum**

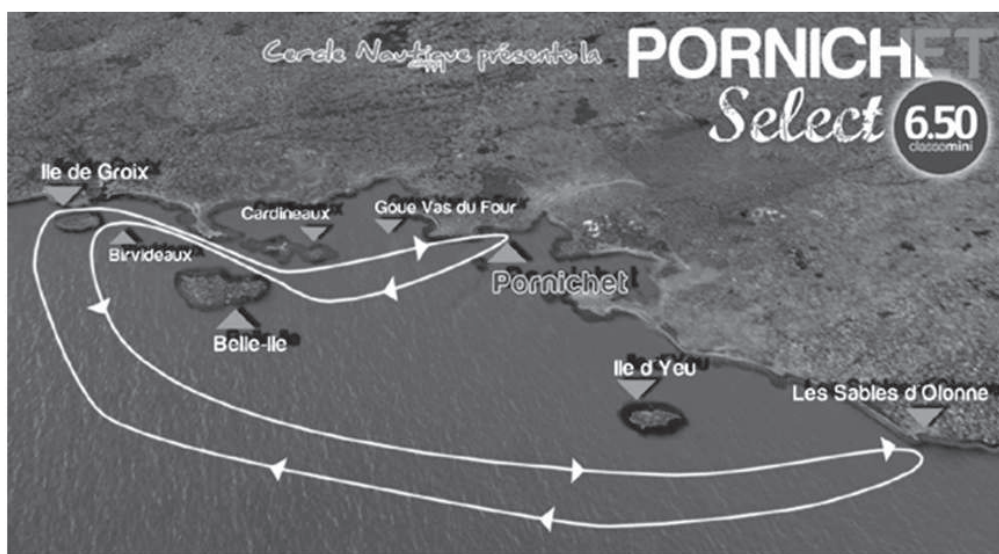


FIGURE C.1: Parcours de 300 miles nautiques de la course en solitaire sur mini 650, *Select 650*, dont le départ est donné à Pornichet, Loire Atlantique.

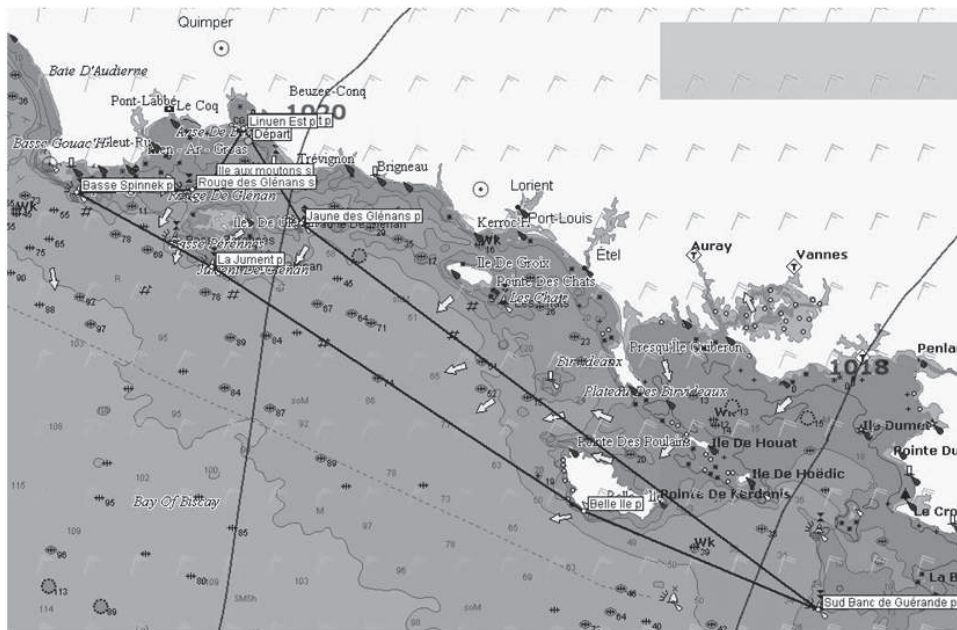


FIGURE C.2: Parcours de 280 miles nautiques de la course en solitaire sur Figaro bénéteau, solo Ports de France, à Concarneau, Finistère.

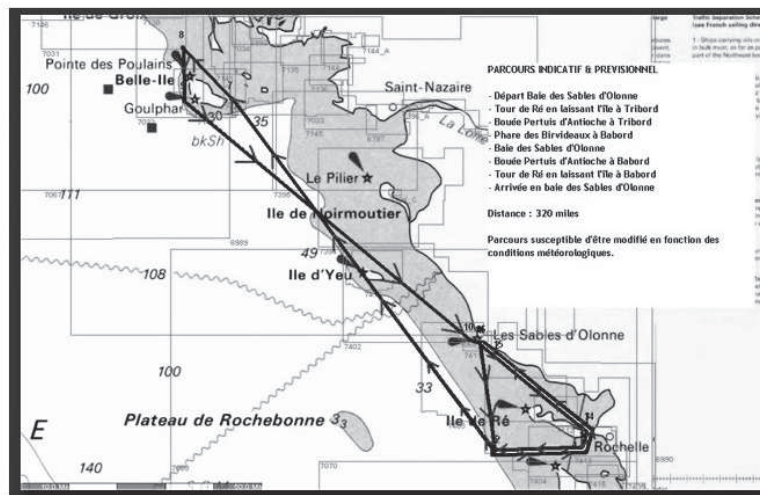


FIGURE C.3: Parcours de 300 miles nautiques de la course en solitaire sur Figaro bénéteau ; Solo Massif Marine aux Sables d'Olonnes (Vendée)





FIGURE C.4: Parcours de 4400 miles nautiques de la course transatlantique en solitaire Transat 650, dont le départ est donné à La Rochelle (Charente-Maritime) et dont l'arrivée est à Salvador de Bahia au Brésil. Cette course se coure en deux étapes dont la première amène les skippers à Funchal (1100 Mn) sur l'île de Madère au Portugal.

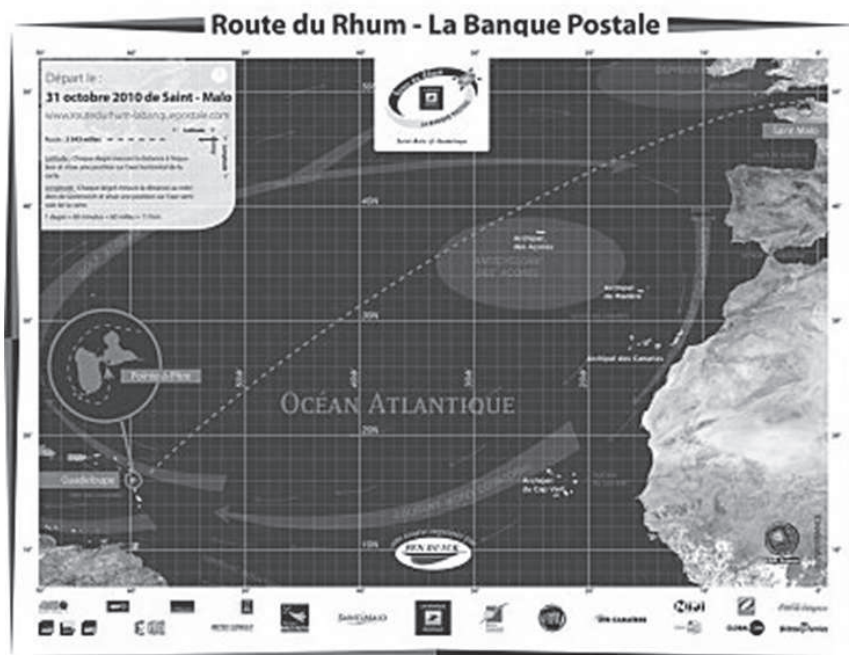


FIGURE C.5: Parcours de 3500 miles nautiques de la course transatlantique en solitaire Route du Rhum, dont le départ est donné à Saint Malo, (Ile et Vilaine) et dont l'arrivée est à Pointe à Pitre en Guadeloupe.

# Annexe **D**

## Les Bateaux

### **D.1 Le Figaro Bénéteau**

### **D.2 Le mini 650**

### **D.3 Monocoques et Multicoques**

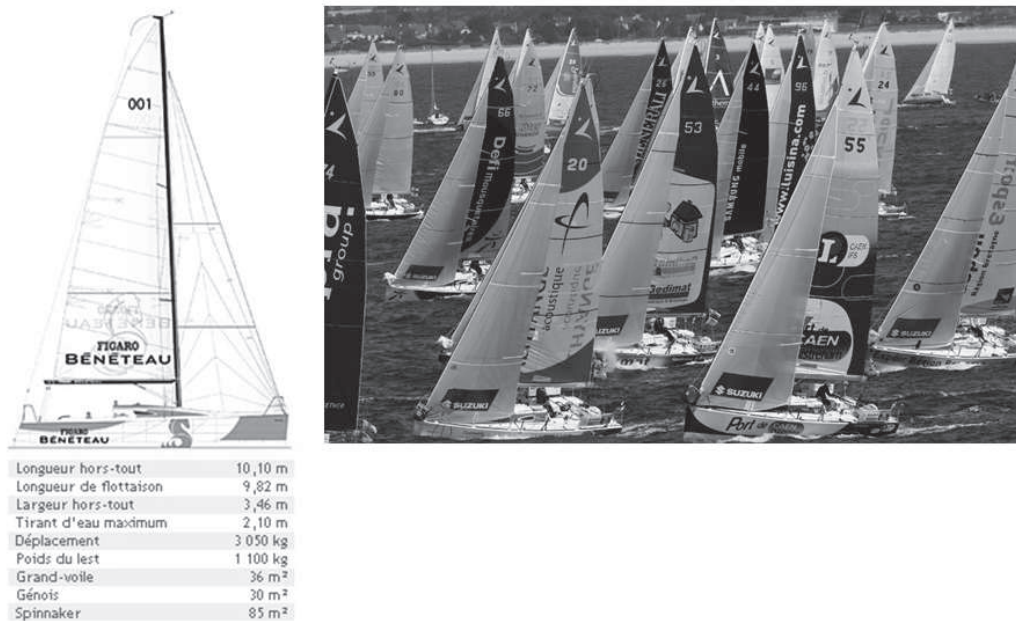


FIGURE D.1: Le figaro Bénéteau est le bateau utilisé pour les courses comme la Solo Massif Marine des Sables d'Olonne et la Solo Port de France de Concarneau. Chaque été 50 marins s'affrontent lors des 4 étapes (entre 300 et 600 miles nautiques chacune) de la "Solitaire du Figaro". Cette épreuve très renommée est aussi une des courses les plus dures à gérer en ce qui concerne le sommeil et la fatigue car la privation de sommeil est très élevée.

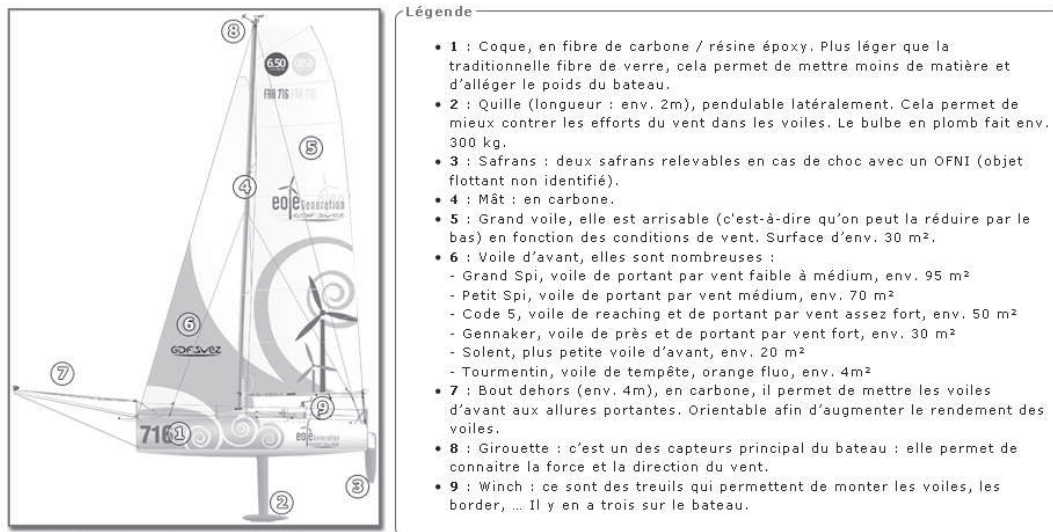


FIGURE D.2: Le Mini 650 est le bateau utilisé pour les courses comme la Select 650 ou la Transat 650. Ce bateau est petit (6,50 m de longueur) et très toilé, c'est un modèle réduit des bateau qui font le Vendée Globe (tour du monde en solitaire sans escale). Cette image vient du site du coureur Sébastien Rogues.



FIGURE D.3: Pour la course Transatlantique Route du Rhum, on trouve des bateaux monocoque entre 40 pieds (en haut) et 60 pieds et des multicoques allant de 50 pieds(en bas) à 100 pieds. Ces images proviennent des sites web des skippers Thomas Ruyant (monocoque) et Yves Le Blévec (Trimaran).

Annexe **E**

## Questionnaire Route du Rhum 2010

(voir page suivante)

FIGURE E.1 : Questionnaire de gestion de fatigue utilisé au cours de l'étude "Route du Rhum".

|  | oui | non | remarques |
|--|-----|-----|-----------|
| Durant ma prochaine course, je chercherai quelle est la durée de repos qui est la meilleure pour moi   |     |     |           |
| Utilisez-vous un temps de sommeil cumulé cible pour rester compétitif durant une épreuve ?   |     |     |           |
| Juste après le départ d'une course, en fin d'après midi ou en début de nuit, alors que vous êtes en route libre, envisageriez-vous d'aller vous reposer même pour un temps très court ?  |     |     |           |
| Utilisez vous souvent, en course, des substituts excitants (café, thé, guronzan, etc.) pour rester éveillé ?   |     |     |           |
| J'ai créé des aménagements spécifiques et ergonomiques à bord pour me ménager et mieux gérer ma forme  |     |     |           |
| Durant mes dernières courses, j'ai cherché quelle était la rythmicité de repos la meilleure  |     |     |           |
| Je reste obligatoirement éveillé en permanence durant la première nuit de course   |     |     |           |
| Avez-vous des indicateurs de fatigue sur les autres concurrents ?  |     |     |           |
| En général, en l'absence d'évènements fortuits (shift du vent par exemple), vous réveillez-vous spontanément ?   |     |     |           |
| Au large d'une manière générale (hors rails, cailloux, etc.) sachant qu'il y a des moments privilégiés pour faire des siestes par rapport au rythme jour/nuit, vous vous efforcez de les respecter   |     |     |           |
| Il est 11h30 du matin, arrivée prévue fin de nuit prochaine, je vois d'autres concurrents proches, tout est réglé correctement, j'en profite pour faire une pause ?  |     |     |           |
| J'utilise la plus part du temps avant, pendant ou après mes courses, des indicateurs de gestion de ma forme, rationnels et chiffrés me permettant de faire une analyse efficace.   |     |     |           |
| Pendant une navigation de plusieurs jours, je cherche à déterminer la quantité de sommeil qui me sera suffisante   |     |     |           |
| Aujourd'hui, votre road book contient-il des indications explicites pour savoir quand dormir ?   |     |     |           |
| Vous êtes-vous récemment endormi involontairement, même brièvement ?   |     |     |           |
| Avez-vous des temps de sommeil prédéfinis et inéluctables en navigation côtière ?  |     |     |           |
| Lors de ma dernière course, j'ai testé ma quantité idéale de sommeil   |     |     |           |
| Etes-vous sûr de vous réveiller la majeure partie du temps sans réveil ?   |     |     |           |
| Avez-vous recherché, lu des documents, ouvrages, sur la gestion du sommeil ?   |     |     |           |
| Je décide d'aller me reposer seulement lorsque je suis très fatigué  |     |     |           |
| Généralement, j'expérimente les effets de siestes de différentes durées  |     |     |           |
| Avez-vous consulté des spécialistes afin de recevoir des conseils dans la gestion de votre sommeil en course ?   |     |     |           |
| En course, dans la première journée, pouvez-vous choisir de vous reposer alors que vous ne ressentez pas de somnolence ?   |     |     |           |
| Avez-vous des temps de sommeil prédéfinis et inéluctables en navigations hauturières ?   |     |     |           |
| Êtes-vous régulièrement fatigué au réveil d'une sieste ?   |     |     |           |
| Vous est il arrivé, pendant une course, de volontairement chercher à fatiguer vos concurrents en imprimant un rythme plus élevé ?  |     |     |           |
| En course au large, vous avez choisi vos périodes de sommeil et rythmes jour/nuit. Un évènement modifie momentanément la rythmicité que vous vous imposiez. Reprenez-vous cette rythmicité des siestes immédiatement et exactement une fois l'évènement passé. |     |     |           |



# Annexe F

## Agenda de Sommeil Transat 650

Journal de bord

Date : 06/10/07

Je suis très fatigué 0% ————— 100% Je suis en pleine forme

TOUT OK, c'est calme  
je pris des les dorme mais ok  
→ je suis bord à bord avec  
Notre Dame

→ nuit de grand ptal  
à 0,5 nœ.!!

→ 6h de SW 10 km de bateau  
de retour à terre. 1h-30 →

Compteur de sommeil au départ + Temps de sommeil de la journée (déterminer ci-dessous) - Nb heures de sommeil optimal par jour / 4 = Compteur de sommeil à reporter sur la page suivante

0 + 4 - 6 = -2h

| Périodes de sommeil        | Heure de début | heure de fin | Durée |
|----------------------------|----------------|--------------|-------|
| Période 1                  | 21h10          | 22h30        | 20'   |
| Période 2                  | 23h45          | 02h10        | 25'   |
| Période 3                  | 02h15          | 12h15        | 1h    |
| Période 4                  | 12h45          | 2h30         | 65''  |
| Période 5                  | 4h20           | 6h20         | 1h30  |
| Période 6                  |                |              |       |
| Période 7                  |                |              |       |
| Période 8                  |                |              |       |
| Période 9                  |                |              |       |
| Période 10                 |                |              |       |
| Période 11                 |                |              |       |
| Période 12                 |                |              |       |
| Total à reporter ci-dessus |                |              | 4h    |

| Evènements marquants | A faire |
|----------------------|---------|
|                      |         |

FIGURE F.1: Exemple d'une journée décrite, en temps réel, par un skipper pendant sa transat. Cet agenda, composé d'un système simple d'addition-soustractions des temps de sommeil devait permettre aux skippers de suivre rationnellement leur temps de sommeil quotidien.

## Productions scientifiques

**Publications :** Hurdiel R, Le Sausse F, Zunquin G, Masson P, Mikulovic J, Bui-Xuan G, Peze T, Robin JF, Theunynck D. (2011) Sleep and fatigue management in extreme environment : case of solo sailors. *Sleep and Biological Rythms* (Publication en Novembre 2011)

Hurdiel R., Vanhelst J., Peze T., Theunynck, D. (2011). Can handheld device accurately measure sleep parameters? Comparison of actigraph, sleep diary and electronic sleep diary application. *Sleep and Biological Rythms* (Publication en Novembre 2011)

Hurdiel R. , McCauley P. , Van Dongen H.P.A. , Theunynck D. (2011). Comparaison de la fatigue psychomotrice mesurée chez des coureurs au large avec celle prédite par modèle mathématique. *Clinical Neurophysiology* 41(3), 137

Hurdiel R., Monaca C., Hedouis M., Coste O., Van Beers P, Larzul J.J., Theunynck D. (2010). Caractéristiques du sommeil de récupération des navigateurs après une course en solitaire de 42 heures. *Clinical Neurophysiology*, 40(4), 223

Theunynck D., Hurdiel R., Pezé T., Estruch X. , Bui-Xuân G. (2010). Sommeil et course au large en solitaire : comportements des coureurs et étude de faisabilité d'un "agenda interactif de sommeil" , *PISTES* 251 Vol-. 12 No.2.

Vanhelst J., Marchand F, Fardy P, Zunquin G., Loeuille G.A., Renaut H., Mikulovic J., Hurdiel R., Béghin L., Theunynck D. (2010). The CEMHaVi program : Control, Evaluation and Modification of lifestyles in obese youth. *J Cardiopulm Rehabil Prev.*, 30(3),181-5.

Hurdiel R., Vanhelst J., Fardy P., Marchand F., Zunquin G., Béghin L., Theunynck D. (2009) Evaluation of sleep habits among obese children and adolescents after a multidisciplinary program of exercise and health education. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(5), 178

Hurdiel R., Monaca C., Theunynck D. (2009). Privation de sommeil en conditions extrêmes : analyse des conséquences sur la performance et sur l'accidentologie en course au large en solitaire. *Clinical Neurophysiology*, 39(3), 159

**Brevets et Protections :** Agence pour la Protection des programmes en 2008 (Adhésion : n°08.59.12458 – agenda interactif de Sommeil ) Inventeurs : R. Hurdiel, M. Beddiaf, D. Theunynck (RELACS), T. Pezé (ULCO), J.B. Choquel (LASL)).

**Communications orales :** Hurdiel R, Le Sausse F, Zunquin G, Masson P, Mikulovic J, Bui-Xuan G, Peze T, Robin JF, Theunynck D. Sleep and fatigue management in extreme environment : case of solo sailors. World Sleep 2011. Kyoto, Japon du 16 au 20 Octobre 2011.

Hurdiel R., McCauley P., Pezé T., Theunynck D. Sleep deprivation, performance and mathematical prediction of fatigue in offshore sailing races. Congrès de l'ACAPS, Rennes, Octobre 2011.

Vanhelst J., Hurdiel R., Mikulovic J., Bui-Xuan G., Béghin L., Theunynck D. Validation de l'accéléromètre Vivago dans la mesure de l'activité physique. Congrès de la Société Francophone d'Analyse du Mouvement chez l'Enfant et l'Adulte, Saint Etienne, 20 et 21 Janvier 2011.

Hurdiel R., Monaca C., Theunynck D. Influence de la durée de course sur le temps de sommeil et sur la performance de navigateurs en solitaire transatlantique. 40e congrès de la Société Francophone de Chronobiologie. Caen, 04 au 06 Juin 2008

Hurdiel R., Monaca C., Theunynck D. Privation de sommeil en conditions extrêmes : analyse des conséquences sur la performance et sur l'accidentologie en course au large en solitaire. Le congrès du sommeil, Société Française de Recherche sur la Médecine du Sommeil, Lille, 20-22 novembre 2008

**Communications affichées :** Hurdiel R., Vanhelst J., Peze T., Theunynck, D. Can handheld device accurately measure sleep parameters? Comparison of actigraph,

sleep diary and electronic sleep diary application. World Sleep Congress, Kyoto, Japan, Octobre 2011.

Hurdiel R., Le Sausse E., Masson P., Zunquin G., Mikulovic J., Bui-Xuan G., Robin J.F., Theunynck D. Management de la fatigue des navigateurs en solitaire. Expérience d'accompagnement lors de la Route du Rhum 2010. Congrès de l'ACAPS, Rennes, Octobre 2011.

Vanhelst J, Hurdiel R, Mikulovic J, Bui-Xuan G, Fardy P, Béghin L, Theunynck D Determination of thresholds for defining physical activity levels using the new VI-VAGO® accelerometer. International Conference on Ambulatory Monitoring of Physical Activity and Movement, ICAMPAM 2011. Glasgow.

Hurdiel R., McCauley P., Van Dongen H.P.A., Theunynck D. (2011). Comparaison de la fatigue psychomotrice mesurée chez des coureurs au large avec celle prédite par modèle mathématique. Le congrès du sommeil, Société Française de Recherche sur la Médecine du Sommeil, Tours, 18-20 Novembre 2010.

Hurdiel R., Monaca C., Hedouis M., Coste O., Van Beers P., Larzul J.J., Theunynck D. Caractéristiques du sommeil de récupération des navigateurs après une course en solitaire de 42 heures. Le congrès du sommeil, Société Française de Recherche sur la Médecine du Sommeil, Marseille, 19-21 novembre 2009.

Theunynck D, Hurdiel R, Pezé T, Zunquin G, Vanhelst J, Mikulovic J, Bui-Xuan G. Etude des comportements et de la préparation aux stratégies de veille/travail/repos rythmant la vie à bord de l'élite de la course au large en solitaire. Congrès de l'ACAPS, Louvain, 31 Octobre- 2 Novembre 2007, pages 576-77.

Theunynck D, Hurdiel R, Pezé T, Zunquin G, Vanhelst J, Mikulovic J, Bui-Xuan G. Analyse de la fatigue et du sommeil d'un coureur en course au large lors d'un tour du monde de 104 jours en solitaire et sans escale. Congrès de l'ACAPS, Louvain, 31 Octobre- 2 Novembre 2007, pages 574-75.

**Articles soumis :** Hurdiel R., Monaca C., Mauvieux B., McCauley P., Van Dongen H.P.A., Theunynck D. Field Study of Sleep and Performance in Solo Sailing Races. (Article soumis à European Journal of Sport Sciences)

Hurdiel R., Vanhelst J., Peze T., Theunynck, D. Can handheld device accurately measure sleep parameters? Comparison of actigraph, sleep diary and electronic sleep diary application (Article soumis à Behavioral Research method)

Hurdiel R., McCauley P., Pezé T., Van Dongen H.P.A., Theunynck D. Comparaison de la fatigue psychomotrice mesurée chez des coureurs au large avec celle prédite par modèle mathématique. (Article soumis à Science et Sport)

Vanhelst J., Hurdiel R., Mikulovic J., Bui-Xuan G., Fardy P., Béghin L., Theunynck D. Determination of thresholds for defining physical activity levels using the new VI-VAGO® accelerometer (article soumis à Journal of Sport Sciences)

**Vulgarisation :** Journée Nationale du Sommeil 2011 (INSV), Le sommeil en condition extrême, Centre Hospitalier de Dunkerque.

Animation du café des sciences de la cité de la voile Eric TABARLY. Sommeil et course au large, Lorient, 23 Novembre 2009.

Conférence sur Le sommeil en condition extrême. Départ de la course transatlantique à la voile Route du Rhum. Saint Malo, 27 Octobre 2010.

**Prix, bourses et contrats de recherche :** Contrat avec la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC) pour la création d'outil pédagogique sur le sommeil et la vigilance (DVD) dans le cadre de la formation continue de tous les contrôleurs aériens français. (2011)

Bourse Jeune chercheur 2008 de la Société Française de Recherche sur la Médecine du Sommeil pour les travaux en course au large

Mémoire cité par l'Association Francophone de Recherche en Activités physique et Sportives (AFRAPS) dans le cadre du prix J.C. Lyleire. Privations de sommeil en conditions extrêmes : analyses des conséquences sur la performance et sur l'accidentologie en course au large en solitaire.

Thèse financée par le Syndicat Mixte de la Côte d'Opale (SMCO) (2008-2011)

## **L'agenda de sommeil interactif comme outil individuel de management de la fatigue**

L'objectif était de développer un outil individuel de management de la fatigue. Cet outil dénommé Scextan®, a été conçu sous la forme d'une application informatique. Pour cela, plusieurs étapes de développement et de validation ont été franchies. Dans un premier temps, nous avons choisi d'observer le sommeil des navigateurs à la voile en solitaire qui doivent gérer une forte privation de sommeil. Les résultats ont montré que ces marins sont soumis aux mêmes principes de régulation de sommeil que l'adulte sain. Nous avons retenu ces sujets comme population expérimentale. Dans un deuxième temps, nous avons validé le logiciel Scextan® pour la mesure du rythme veille-sommeil qui s'est révélée plus précise qu'avec un agenda de sommeil manuscrit. Puis, nous avons évalué la pertinence de l'implémentation d'un modèle de prédiction mathématique de performances dans Scextan®. Chez des marins en course, le modèle a su prédire 70% de la variance des mesures. Dans un dernier temps, Scextan® a été proposé aux skippers de l'édition 2010 de la course transatlantique « Route du Rhum ». Seul le vainqueur de la course a utilisé de façon quasi systématique le logiciel Scextan® pour gérer son état de forme. L'agenda de Sommeil Interactif Scextan® est toujours en cours de développement, mais a déjà démontré qu'il pouvait être un outil de recherche à part entière, et qu'il tendrait rapidement à devenir un outil pédagogique. **Mots clés :** Sommeil, fatigue, éducation, santé, conditions extrêmes

## **Development Of An Interactive Sleep Diary As An Individual Fatigue Management**

**Tool** The goal of the thesis was to develop an individual fatigue management tool called Scextan® and designed as a software application. The development of this system involved several research and validation steps. We first describe sleep patterns of single-handed sailors, who have to manage severe sleep deprivation. Results suggested that single-handed sailors are subject to the same principles of sleep regulation as healthy adults and we choose these subjects as our main test population. In a second step, we developed and validated the Scextan® software application. Results revealed that Scextan® is more accurate than a paper-based sleep diary. The third study was to measure fatigue in single-handed ocean race and compare the results with a mathematical prediction model of performances, which was able to predict 67% of the measured fatigue. Lastly, skippers of the 2010 "Route du Rhum" single-handed transatlantic race were offered use of Scextan®. The race winner was the only sailor to use it intensively to manage and rationally anticipate his state of alertness. Although Scextan® is still being improved, it has already proved itself to be a valuable research tool and is on the way to becoming an individual management tool. **Keywords :** Sleep, fatigue, education, health, extreme conditions