Etudes comparées des rythmes circadiens et reflet actimétrique du sommeil de sportifs et de sédentaires en poste régulier de nuit

Benoît Mauvieux[1], Laurent Gouthière[2], Bruno Sesboüe[3], et Damien Davenne[1]

Catalogue Data
Mauvieux, B.; Gouthière, L.; Sesboüe, B.; et Davenne, D. (2003). Etudes comparées des rythmes circadiens et reflet actimétrique du sommeil de sportifs et de sédentaires en poste régulier de nuit. **Can. J. Appl. Physiol.** 28(6): 831-887. © 2003 Société Canadienne de Physiologie de l'Exercice.

Mots clés: *rythme circadien de température, actimétrie, qualité du sommeil, entraînement sportif, travail de nuit, méthodologie d'analyse des rythmes*
Key words: *circadian rhythm of temperature, actimetry, sleep quality, exercise, night work, methodology of rhythms analysis*

Résumé/Abstract

Le but de cette étude est de mettre en évidence l'influence de la pratique sportive sur la résistance et la persistance du rythme circadien de la température (T°) ainsi que la qualité du sommeil chez des sportifs travaillant régulièrement de nuit. De toute évidence, la situation contradictoire qu'exerce le travail de nuit sur le fonctionnement biologique de l'homme va à l'encontre de sa spécificité diurne. Il semble que les effets de l'entraînement physique et sportif améliorent certains caractères du fonctionnement biologique de l'homme: les amplitudes de la plupart des fonctions sont accentuées et les périodes sont plus difficilement perturbées dans le cas de situations extrêmes (travail de nuit, jet-lag, privation de sommeil). Pour répondre à nos hypothèses, des sujets sédentaires et sportifs travaillant la nuit au sein du groupe PSA Peugeot Citroën Automobiles ont été retenus pour cette étude. Les caractéristiques du rythme de la T° pour ces deux groupes ont été étudiées à travers une

[1]Laboratoire du Centre de Recherches en Activités Physiques et Sportives–UPRES EA 2131, UFR STAPS de Caen, 2, Blvd. Maréchal Juin, F-14 032 Caen Cedex, France; [2]Laboratoire d'Informatique BioMédicale, Expert Soft Tech, Le Chemin de la Birotte, F-37320 Esvres sur Indre, France; [3]Institut Régional de Médecine du Sport, Centre Hospitalier Universitaire de Caen, F-14 033 Caen Cedex, France.

méthodologie définie. Diverses méthodes d'analyses spectrales ont été utilisées dans la recherche des périodes du rythme de la T° dont le Spectre Elliptique Inverse. Des modélisations du rythme de la T° dont on a étudié les composantes caractéristiques ont été définis. Une étude actimétrique complémentaire a permis d'évaluer l'action de l'entraînement physique et sa répercussion sur le sommeil. Nos résultats montrent une persistance de fluctuation de la T° pour les sportifs: l'amplitude reste importante alors que le rythme circadien de la T° a tendance à disparaître chez les sédentaires. Le caractère stable et persistant du rythme de T° des sportifs, observé dans d'autres conditions, semble se confirmer. On remarque aussi que le reflet actigraphique du sommeil est plus qualitatif chez les personnes pratiquant l'entraînement physique et sportif et ceci quel que soit le jour de la semaine. D'autre part, il semblerait que l'acrophase de T° des sportifs soit plus tardive durant la période nocturne de travail. Ainsi, alors que nos athlètes s'endorment sur une fluctuation descendante de T°, les sédentaires se couchent avec une fluctuation de T° qui remonte. Il semble donc que ces derniers restent davantage synchronisés sur un rythme diurne.

The aim of this study was to show the resistance and persistence of the circadian rhythm of temperature (T°) and the sleep quality of athletic subjects and sedentary subjects engaged in night work, and attempt to explain the mechanisms that influence these differences. The effects of night work on biological rhythms have been studied extensively in the past few years. The contradictory situations for the night workers irrefutably affect their biological systems. Individuals with high amplitudes in their circadian rhythms have been found to be more tolerant to shift work and this results in a greater stability of circadian rhythms. This seems beneficial in coping with frequent rhythm disturbances. The physical training program seems to improve several mechanisms of the human biological system: amplitudes of circadian rhythms were increased and the circadian rhythm period was more resistant to an environment extreme (night work, shift work, sleep deprivation, or jet lag). To test this hypothesis, athletes and sedentary subjects who were engaged in regular night work were selected in the PSA Peugeot Citroën Automobiles Group in French Normandy country. The circadian rhythm of the T° for both groups was studied with a specific methodology and with extensive spectral analysis, especially the spectral elliptic inverse method. Study models of the rhythm of the T° were determined and the characteristic parameters were exposed. A complementary actigraphic study showed the physical training program's effects on the sleep quality. The results revealed a large stability in the rhythm of circadian variation of T° for the athletes: the amplitude was still large but for the sedentary subjects the amplitude of the T° decreased and it was difficult to adjust a period on the rhythm of T°. The stability and persistent quality of the athletes' circadian rhythm was confirmed. We observed that the actigraphic sleep was greater for athletes than for sedentary subjects, and the acrophase time for the athletes was later than for the sedentary subjects during the night shift.

Introduction

Les effets du travail de nuit sur les rythmes biologiques ont été souvent étudiés durant ces dernières années. La situation contradictoire dans laquelle sont placés les travailleurs de nuit affecte et modifie d'une manière irréfutable leur système biologique homéostasique (Foret, 1988; Moog et Hildebrandt, 1989; Weibel et al.,

1999). L'horloge interne n'a plus d'agent entraînant ni de synchroniseur externe (appelé "Zeitgebers" en allemand) suffisamment contrasté (jour/nuit) pour maintenir une structure circadienne stable. Ainsi, on assiste souvent à une désynchronisation interne de la plupart des rythmes biologiques les uns par rapport aux autres (Aschoff et al., 1967; Motohashi, 1990; Reinberg et Smolensky, 1983; Reinberg et al., 1980; 1983; 1984a; 1984b). Le résultat se traduit par une période du rythme circadien qui s'étend en deçà et au-delà de 24 heures (Benoit, 1988; Reinberg et al., 1984a) et l'amplitude tend à décroître (Motohashi, 1991, 1992; Reinberg et al., 1988).

De plus, des travaux ont permis de mettre en évidence que l'inversion de phase des rythmes circadiens en situation de travail de nuit n'est que partielle et peu nocturne (Benoit et Foret, 1988; Colquhoun et al., 1968a, 1968b; Folkard et al., 1978; Knauth et al., 1978). Les principales modifications conduisent alors à des troubles du sommeil et de la vigilance (Akerstedt et Gillberg, 1982; Andlauer et Fourre, 1965; Carpentier et Cazamian, 1977; Foret et al., 1980; Frese et Okonek, 1984; Ottmann et al., 1989; Reid et Dawson, 1999).

D'autre part, des études ont montré que la qualité du sommeil dépendrait principalement du rythme de la T° (Akerstedt et Gillberg, 1980; Lille et Andlauer, 1981). Il serait en effet difficile de s'endormir dans un stade de sommeil lent profond, généralement produit dans les premiers cycles de sommeil et dans la première partie de la nuit, quand la T° centrale augmente après sa batyphase.

Par ailleurs, il est aussi montré que les individus aux rythmes circadiens dont les amplitudes sont grandes, seraient dans de meilleures prédispositions face au décalage horaire dans le travail posté (Atkinson et al., 1993; Reinberg et al., 1980; 1988). Des rythmes biologiques aux amplitudes importantes se manifestent par une plus grande stabilité et ceux-ci supporteraient mieux de fréquentes modifications de l'environnement externe.

Or, il se trouve que des personnes pratiquant régulièrement une activité sportive ont des rythmes circadiens de plus grandes amplitudes que des sédentaires et que l'activité physique améliore qualitativement et quantitativement le sommeil, notamment en augmentant la durée du stade de sommeil lent profond, considéré comme le plus réparateur (Bunnell et al., 1983; Helen et Taylor, 1996; Reilly et al., 1997).

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Le but de cette étude est d'examiner les différences entre sujets sportifs et sédentaires dans toutes les caractéristiques (MESOR, amplitude, phase et période) du rythme circadien de T°. Nous examinerons aussi le rythme veille / sommeil et sa qualité actimétrique et tenterons d'expliquer les mécanismes qui interviennent dans ces différences.

Par ailleurs, nous avons été confrontés à un problème d'analyse des rythmes circadiens dans ces conditions très particulières. Une approche utilisant un panel le plus complet possible des outils d'analyse des rythmes se justifie pour caractériser les phénomènes observés. La plupart des études en chronobiologie n'utilisent pas toujours les outils adéquats et la méthodologie n'est que rarement exposée. De ce fait, les conclusions seraient trop souvent biaisées par une modélisation inappropriée des rythmes (Cugini, 1993).

Ainsi, cette étude doit amener à une solution et une réflexion méthodologique (Gaudeau et Gouthière, 1992; Gouthière, 2003) dans le domaine de la chronobiométrie où la démarche scientifique ne semble pas encore tout à fait normalisée.

Matériels et Méthodes

MODÈLE D'ÉTUDE ET CHOIX DES SUJETS

Cette étude générale, vise à mettre en évidence l'amélioration de la qualité de vie par l'entraînement physique et sportif. Cette étude a été approuvée par le comité d'éthique du Centre Hospitalier Universitaire de Caen (Basse Normandie, France). Elle s'est déroulée au sein du groupe PSA Peugeot Citroën Automobiles de Cormelles le Royal (Normandie, France), entre octobre 2001 et avril 2002.

Quinze sujets (13 hommes et 2 femmes), dont l'âge se répartit de 32 à 45 ans (tableau 1), volontaires et informés sur l'ensemble du protocole expérimental, ont été sélectionnés sur les critères suivants: un minimum de 5 années d'ancienneté de nuit, 5 années de pratique d'activité physique pour les sujets sportifs avec un minimum de 3 séances d'entraînement d'une heure par semaine. Chez les sédentaires, l'absence d'activité physique et sportive est indispensable. De plus, aucun sujet ne devait suivre de traitement médical qui pouvait éventuellement influencer les rythmes du sommeil et d'activité, et dans le cas contraire, ces sujets ont été exclus du groupe d'étude.

Deux groupes ont alors été constitués: un groupe actif, composé de sujets sportifs et entraînés (n = 7) et un groupe de sédentaires (n = 8), sélectionnés sur la base du questionnaire sur l'activité physique pendant le temps libre (Lamb et Brodie, 1991). Un test d'effort normalisé ($\dot{V}O_2$max) a aussi permis de différencier le niveau

Tableau 1 Caractéristiques de la population de l'étude

Paramètres	Sujet sportifs (n = 7)	Sujets sédentaires (n = 8)	test-t Student
Âge (années)	41,2 ± 8,1	46,0 ± 4,5	n.s. (p = 0,175)
Taille (cm)	172,6 ± 9,1	168,0 ± 11,8	n.s. (p = 0,402)
Masse grasse corporelle (%)	19,1 ± 3,5	30,8 ± 8,1	*
$\dot{V}O_2$max ($ml^{-1}\cdot min^{-1}\cdot kg^{-1}$)	60,4 ± 5,6	43,9 ± 7,2	**
$\dot{V}O_2$max ($L^{-1}\cdot min^{-1}$)	4,6 ± 1,13	3,4 ± 0,82	*
VMA ($km\cdot h^{-1}$)	15,75 ± 1	10,1 ± 1,5	**
Ancienneté en poste de nuit (année)	10,1 ± 2,9	10,5 ± 3,1	n.s. (p = 0,705)

Note: Moyenne ± E-Type des caractéristiques des 2 groupes de sujets sportifs et sédentaires.
*$p < 0.05$; **$p < 0.01$; n.s. = non significatif à $p > 0.05$

d'aptitude physique des sujets des deux groupes. Ces derniers ont été appariés en fonction des critères d'âge, de sexe, d'années de travail de nuit, de situation familiale, d'environnement ou encore du type d'habitation. Leur chronotype (Horne et Östberg, 1976) a aussi était retenu pour la constitution et la répartition de nos deux groupes.

L'activité physique et sportive étant un effet masquant de la T° (Waterhouse et al., 1999a, 1999b), les sujets du groupe sportif ont suspendu leur programme d'entraînement physique pendant la semaine d'évaluation. Ainsi, si d'éventuelles différences sont observées entre sujets sportifs et sédentaires concernant la structure du rythme biologique de T°, les processus d'adaptation à long terme à l'effort pourront en être éventuellement et en partie responsables. De ce fait, la composante exogène de l'activité supplémentaire due à l'entraînement sportif, responsable d'une augmentation de la T° corporelle, sera donc exclue. Le tableau 1 compare les variabilités suivant les critères définis des deux groupes.

ORGANISATION DU TRAVAIL DE NUIT

Dans cette étude, les sujets travaillent régulièrement la nuit, en poste fixe sans rotation, de 22h30 jusqu'à 05h30, pendant 5 nuits (du dimanche soir 22h30 au vendredi matin 05h30). Le temps de repos commence donc le vendredi matin à 05h30 et s'étend jusqu'au dimanche, 22h30, à la reprise du travail.

Puisqu'un brusque changement d'environnement se produit pendant les journées de repos (à partir du vendredi matin 05h30 heures jusqu'au dimanche 22h30 heures) sous l'effet d'un retour à une organisation sociale diurne, il est indispensable de distinguer deux situations, la première correspondant au travail pendant la semaine de nuit, la deuxième, au repos pendant le week-end.

SYSTÈME DE MESURE DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

Le test d'effort pour déterminer le niveau d'aptitude physique, s'est déroulé à l'Institut Régional de la Médecine du Sport (IRMS), centre agréé par le comité d'éthique de Basse Normandie (France), pour l'exploration humaine. Ce test d'effort était précédé d'un entretien médical, d'un examen clinique et d'un EEG de repos. Il s'agissait d'un test d'effort normalisé de type triangulaire de $\dot{V}O_2$max par mesures directes, sous control médical, effectué sur un exercice de course à pied sur tapis roulant (Wood Way®) avec une pente à 1,5%. Toutes les 2 minutes, un incrément de puissance est augmenté de 1,5 $km \cdot h^{-1}$, sans arrêt de l'épreuve avec un début de test fixé à 6 $km \cdot h^{-1}$. Avant le début de l'épreuve (valeurs de repos), à chaque palier (valeurs relatives), à la fin de l'épreuve (valeurs maximales) et enfin, après 3 minutes de récupération passive sur le tapis roulant (valeurs de récupération), la puissance développée (en $km \cdot h^{-1}$), le $\dot{V}O_2$ et le $\dot{V}CO_2$ ont été enregistrés. L'ECG et la pression artérielle étaient enregistrés en continu à la fin de chaque palier. La composition de l'air expulsé, mesurée par l'intermédiaire d'un masque avec une turbine en embout était également étudiée par l'unité de réception (chaîne Métamax®).

La fin du test d'effort triangulaire était appréciée par le médecin qui considérait à la fois, l'apparition d'un plateau sur l'enregistrement en continu de la

fréquence cardiaque ou éventuellement le dépassement de la FCmax. Théorique FMT (avec FMT = 220 – âge), l'apparition d'anomalies électrocardiographiques, la diminution de la FCmax et du $\dot{V}O_2$max généralement observés en fin de test d'effort et enfin, l'incapacité à suivre la puissance imposée.

CYCLE VEILLE / SOMMEIL ET L'ACTIMÉTRIE

L'actimétrie mesurée au niveau du poignet est une technique fréquemment utilisée pour évaluer la qualité du sommeil et le rythme veille/ sommeil (Brown et al., 1990; Dawson et al., 1995; Mormont et al., 1996; Reid et Dawson, 1999).

Les actimètres (Gaehwiler Electronic®) qui ont été utilisés pour évaluer le rythme d'activité, rendent compte du nombre de mouvements par minute produit par un individu. Par traitement, l'index d'activité tenant compte de la durée de l'enregistrement et du nombre de mouvements a été définit. Il s'agit d'accéléromètres portables, qui se posent au poignet non dominant du sujet, afin d'éviter certains artefacts dus à des mouvements volontaires spécifiques comme ceux relatifs à l'écriture. L'actimétrie est enregistrée pendant 7 jours continus: pendant les 5 nuits de travail (du dimanche 22h30 au vendredi matin 05h30) et pendant la période de repos (du vendredi matin au dimanche soir suivant), 24/24 heures, à l'exception des activités en contact avec l'eau (bain, douche, piscine, vaisselle, etc.).

Pour le traitement des données, tous les niveaux d'activités supérieurs à deux mouvements par minute ont été considérés comme phases d'éveil, ceux inférieurs ou égaux à ce seuil ont été considérées comme des phases de repos ou de sommeil. Sur cette base, plusieurs études ont montré qu'il existe une corrélation positive (de 0.78 à 0.96) entre l'enregistrement de l'EEG et l'actimétrie pendant la nuit et une corrélation positive (de 0.63 à 0.98) entre la qualité du sommeil enregistré par actimétrie et l'EEG (Middelkoop et al., 1993; Reid et Dawson, 1999).

RYTHME DE LA T° ORALE

La mise en évidence du rythme circadien de la T° orale a été réalisée grâce à un relevé manuel toutes 30 minutes, sur une durée de 7 jours, du dimanche matin au réveil jusqu'au dimanche suivant à la reprise du poste. Pour cela, des thermomètres digitaux (Modèle Hartmann-Larochette®, précision: 0,01 °C) ont été utilisés en les plaçant au frein de la langue. Cette opération devait se faire de préférence avant les repas, au repos, assis ou couché et pendant les éveils.

Les fluctuations de T° seraient le reflet pertinent du niveau métabolique et l'étude du rythme de la T° reste fondamentale (Reilly et Brooks, 1986). Les fluctuations de T° seraient sous la dépendance d'une horloge biologique spécifique et d'autres variables biologiques seraient synchronisées sur le rythme de la T° (Ilmarinen et al., 1980). Dans le cas de situations conflictuelles des synchroniseurs externes, l'intérêt de son étude reste donc évident.

MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE DES RYTHMES DE T°

L'étude du rythme par une méthodologie statistique conduit aux hypothèses suivantes:

- L'absence de distribution aléatoire des données. Les techniques de graphiques d'autocorrélation (Box et Jenkins, 1976) et le graphique de décalage (lag plot) permettent de le vérifier.
- La distribution normale des données est souhaitable. On peut utiliser pour cela différentes méthodes et plus particulièrement le graphique de probabilité normale (Chambers et al., 1983).
- L'absence de distribution des données conduisant à un phénomène stationnaire est d'autre part à vérifier (calcul de fonctions autorégressives et PACF).

La chronobiométrie est encore une science où il existe différentes méthodes d'investigations dans la recherche de périodes. La modélisation et plus particulièrement la définition du modèle périodique a suscité de nombreuses remarques, en particulier sur le choix de ce modèle cosinusoïdal (DePrins, 1996). Celui-ci est le plus souvent adopté du fait de l'absence d'autres fonctions simples possédant une période. La méthodologie conduit donc à vérifier si le phénomène périodique est le plus proche possible de ce modèle. Dans ce cas un phénomène périodique peut comporter plusieurs périodes et peut être la combinaison de plusieurs phénomènes périodiques (Van Cauter et Huyberechts, 1973).

Pour vérifier que le modèle est proche de la fonction sinusoïdale simple ($a \cos(\omega + \phi) + b$), on dispose des méthodes de spectre de démodulation qui permettent de vérifier si l'amplitude et phase sont des fonctions complexes du temps. On emploie pour cela les spectres de démodulation complexe (Granger et Hatanaka, 1964) entre autres, qui permettent de vérifier l'hypothèse que la valeur de l'amplitude reste constante au cours du temps. D'autre part, de la même manière on vérifie que la valeur de la phase reste constante.

Reste maintenant à choisir la méthode qui permette de trouver la période. Pour cela on dispose de trois types de techniques principales :

- La première, relative à la régression comme la méthodologie Cosinor (Spectres de Percent Rhythm, Spectres Elliptique Inverse [SEI], Gouthière, 2003) où les avantages, rappelons-le, sont que le modèle calculé est indépendant du bruit introduit dans les données et que d'autre part, cette méthode ne nécessite pas obligatoirement des données équi-réparties dans le temps.
- Le deuxième choix se reporte sur l'analyse de Fourier. Comme l'analyse spectrale, les transformées discrètes de Fourier sont sensibles au bruit mais présentent le désavantage de nécessiter des données équi-réparties dans le temps. Dans ce type de méthodes spectrales on choisira l'autopériodogramme (Jenkins et Watts, 1986) qui reste de loin le plus fiable. Les transformées discrètes de Fourier ne seront pas employées, leur intérêt restant vraisemblablement historique.
- La dernière qui semble être un compromis entre les deux premières est le périodogramme de Lomb et Scargle (Scargle, 1982) qui ne nécessite pas des données équi-réparties dans le temps.

Il est à noter que la méthodologie Cosinor peut, contrairement à ce qui est communément supposé, détecter plusieurs périodes à travers les données. On peut le vérifier sur les spectres cités précédemment, relatifs à cette méthodologie et plus particulièrement avec les SEI (Gouthière, 2003).

D'autre part, pour le recueil des données, il est souhaitable de choisir des intervalles de temps réguliers qui permettent de pouvoir comparer les différents résultats obtenus avec les méthodes citées précédemment.

Notons aussi, que les résultats en chronobiologie (contrairement à ceux de la physique générale) concernant les valeurs des amplitudes rythmiques, restent souvent ambigus. Un langage commun scientifique devrait être clairement et définitivement établit pour que les valeurs exprimant l'amplitude d'un rythme correspondent, soit à la différence entre la valeur la plus grande (Acrophase) et le niveau moyen (MESOR), ou à la différence crête à crête.

Choix dans l'organisation des données. Nous allons utiliser ces différentes méthodes pour déterminer la période des fluctuations de T° de chacun de nos groupes. Nous allons donc traiter de deux façons distinctes nos données, avec une organisation des données mettant en avant le caractère individuel, et une autre mettant en avant les fluctuations journalières. On étudiera donc d'une part:

1. Les fluctuations individuelles comparées pendant la période de travail puis les fluctuations individuelles comparées pendant la période de repos.
2. Les fluctuations journalières comparées pendant la période de travail puis les fluctuations journalières pendant la période de repos.

ETUDES COMPLÉMENTAIRES

Des tests-*t* de Student sont employés pour comparer les caractéristiques (âge, poids, $\dot{V}O_2$max, VMA, etc.) entre les sujets sportifs et sédentaires. Afin de mettre des différences en évidence entre les groupes pour les données relatives à l'actimétrie, nous utiliserons une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA), avec les facteurs *jours*, facteurs *groupes*, et interrelations entre *facteurs jours / groupes*. Le test PLSD (protected least significant difference) de Fisher a été choisi comme analyse post-hoc de comparaison intra-groupe.

Résultats

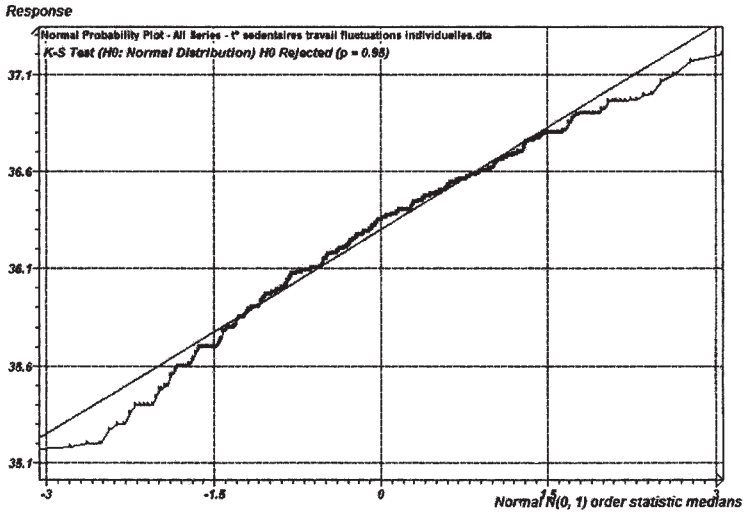
FLUCTUATIONS INDIVIDUELLES DES DONNÉES RELATIVES À LA T°

Etude de Normalité. Un étude de Normalité préalable (normal probability plot, selon Chambers et al., 1983, et test de Kolmogorov-Smirnov à la probabilité de 0,95) permet de tester la distribution des données. Une distribution normale est fortement souhaitable et est le reflet de la qualité des données (voir figures 1 et 2).

On observe ici une qualité de données sensiblement correcte (sauf pour les sédentaires pendant la période de travail de nuit) pour mener à bien cette étude.

Indépendance des donnees de T°. Pour évaluer l'indépendance des données, la fonction autorégressive d'ordre 1 dans un diagramme dit de décalage est utilisée (lag plot, Box et Jenkins, 1976). Le diagramme de décalage permet de donner une idée du caractère aléatoire de la répartition des données. Il permet aussi de pouvoir visualiser distinctement et de présumer si un signal à un caractère périodique ou non. Si les données se répartissent suivant une figure géométrique (droite, carré, etc.), ceci met en évidence le caractère non aléatoire de la distribution (dépendance marquée) sinon, le caractère est celui d'une répartition plutôt aléatoire. Des lignes verticales régulières indiquent par exemple une périodicité (voir figures 3 et 4).

a)



b)

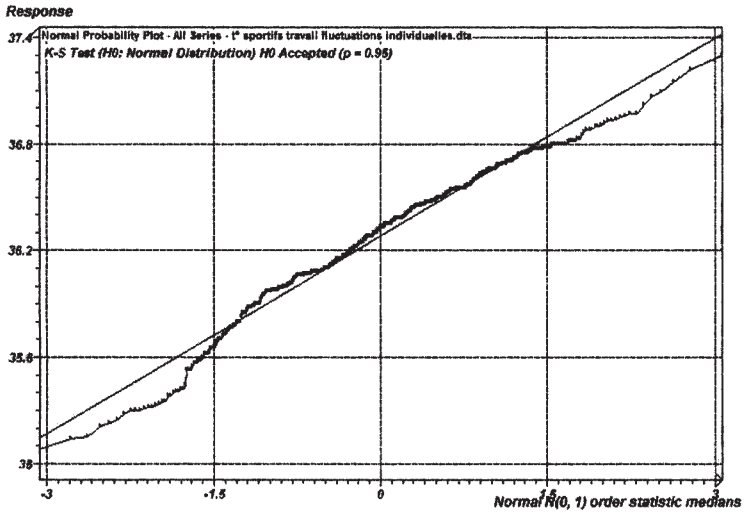
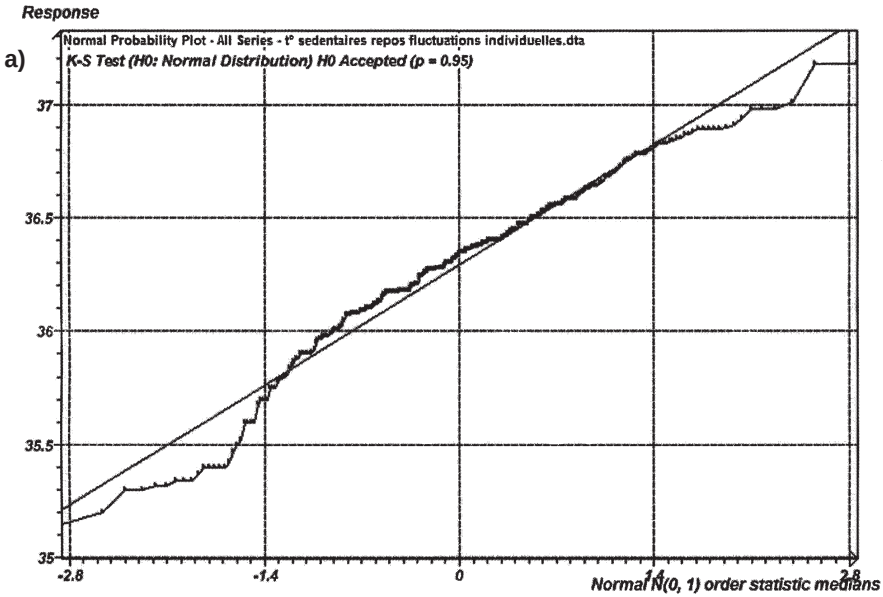


Figure 1. Etude de normalité des données de T° chez les sujets sédentaires (graphique a) et sportifs (graphique b) pendant la période de travail nuit. Le graphique de probabilité Normale permet de visualiser la distribution Normale des données. Dans ce cas les données se répartissent suivant une ligne droite (les données sont distribuées autour d'une ligne droite calculée par régression linéaire). La distribution des données est aussi testée par un test de Kolmogorov et Smirnov (K-W test) pour une probabilité donnée.

L'hypothèse $H_{(0)}$ est rejetée pour les données de T° relatives au groupe des sédentaires (graphique a) à une probabilité fixée à 0.95 par le K-W test. Pour ce groupe, la répartition des données de T° ne suit donc pas une distribution normale.

L'hypothèse $H_{(0)}$ est acceptée pour le groupe des sportifs (graphique b), les données de T° suivent donc une distribution Normale.



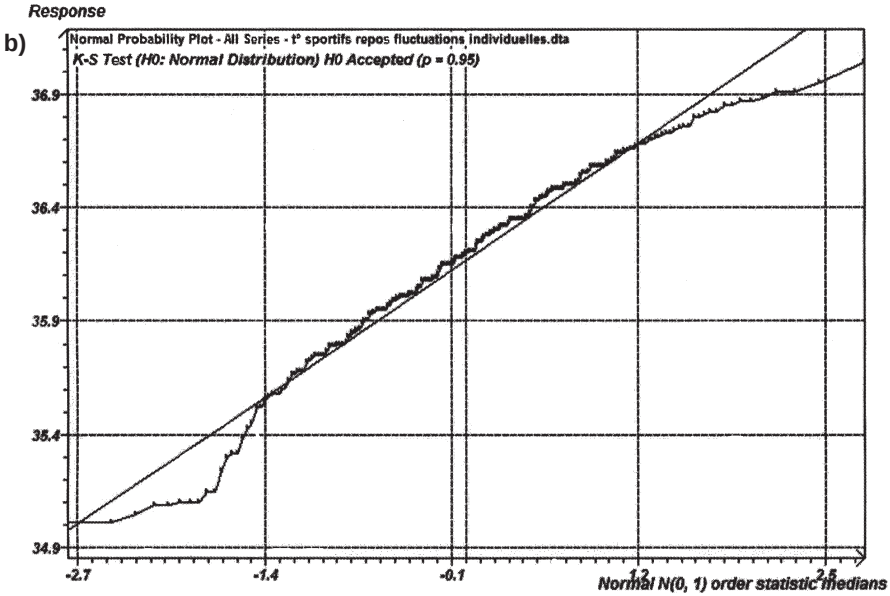
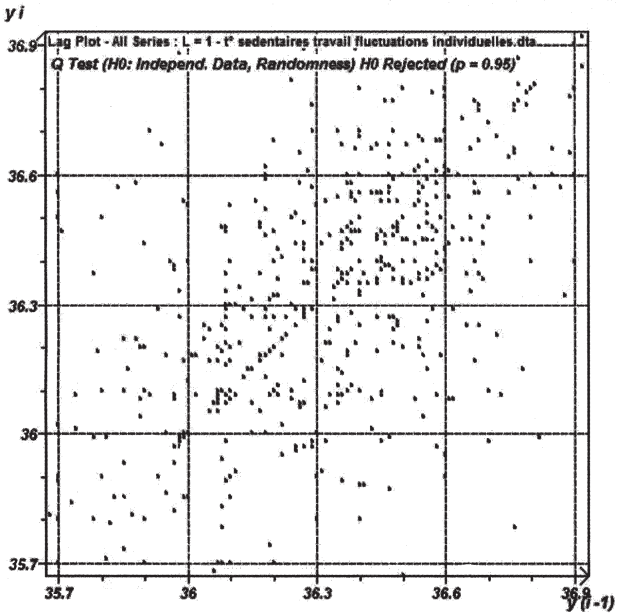


Figure 2. Etude de Normalité (suivant le K-S test). Les données de T° se répartissent suivant une distribution Normale chez les sujets sédentaires (graphique a) et sportifs (graphique b) pendant la période de repos de fin de semaine.

a)



b)

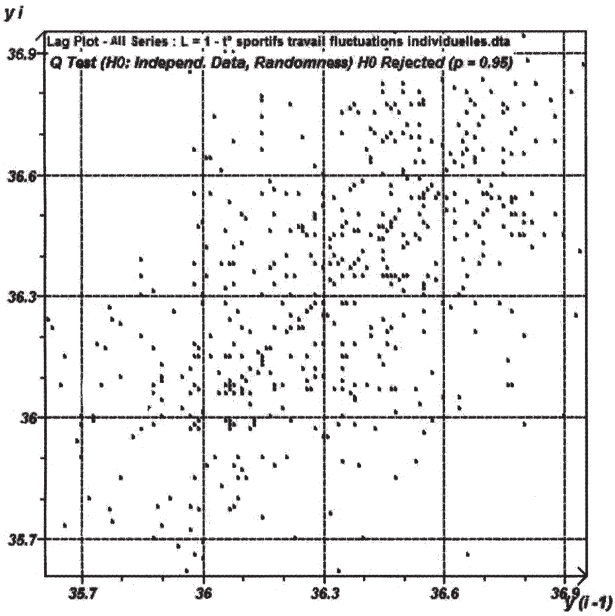


Figure 3. Etude de corrélation (diagramme de décalage, lag plot) pour les données de T° des sujets sédentaires (graphique a) et sportifs (graphique b) pendant la période de travail de nuit. Le caractère de dépendance des données de T° est faiblement marqué car la répartition des données ne forme pas figure géométrique.

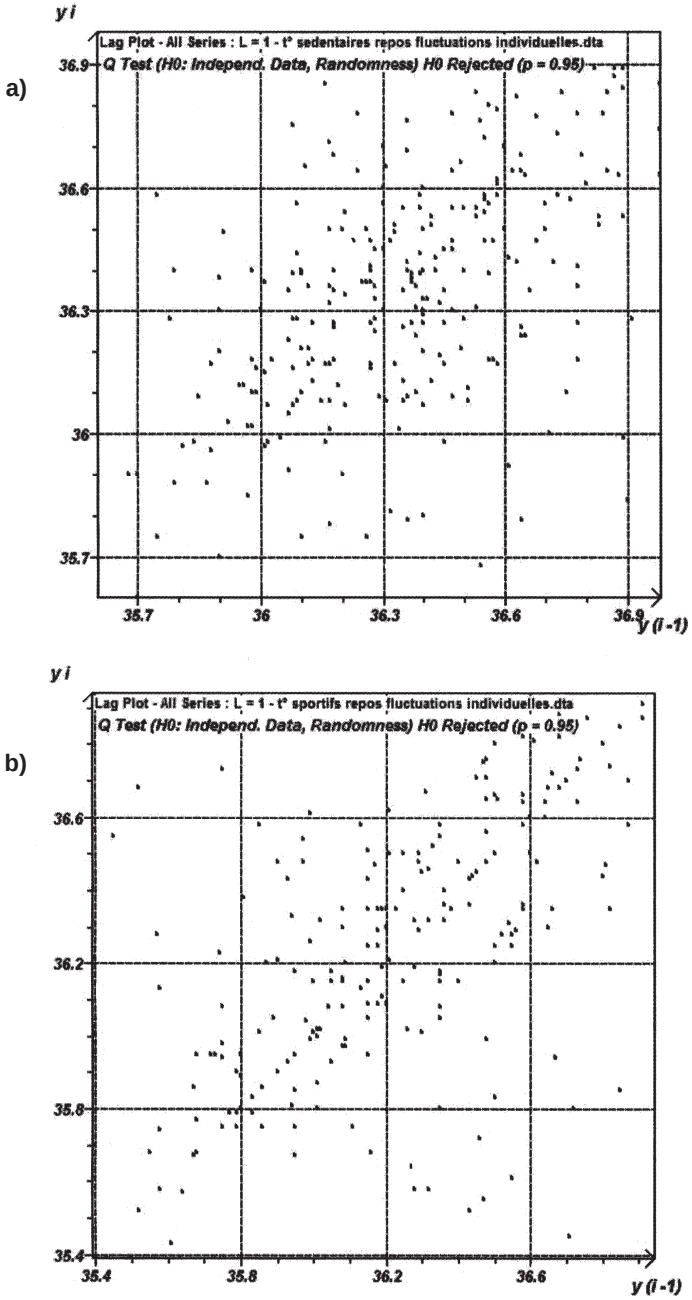


Figure 4. Etude de corrélation (diagramme de décalage, lag plot) pour les données de T° des sujets sédentaires (graphique a) et sportifs (graphique b) pendant la période de repos de fin de semaine. Le caractère de dépendance des données de T° est faiblement marqué.

Dans les deux situations, travail de nuit et période de repos, l'étude de corrélation (diagramme de décalage, lag plot) pour les données de T° des sujets sédentaires (figures 3a et 4a) et sportifs (figures 3b et 4b) montre un caractère de dépendance faiblement marqué car les répartitions des données de T° ne forment pas de figure géométrique.

Caractère aléatoire de la distribution des données de T°. L'autocorrélation selon Box et Jenkins (1976), permet de mettre en évidence le coté aléatoire de la répartition des données ou non. Plus les données ont une répartition aléatoire, plus la courbe de l'autocorrélation se situe près de zéro pour n'importe quel décalage de temps choisi (lag). Dans le cas contraire, la courbe se répartie entre 1 et 0. A noter que les valeurs se situant en dessous de zéro ne sont pas à considérer. D'autre part le caractère concave ou convexe de la courbe permet d'indiquer s'il s'agit d'un phénomène stationnaire. Selon que la courbe se situe prés de 0, le caractère aléatoire est fortement marqué (voir figures 5 et 6).

Les données ne présentent pas de caractère aléatoire marqué sauf dans le cas de l'ensemble des données recueillies pour les sujets sédentaires pendant la période de travail (figure 5, graphique a). Cette qualité des données peut avoir une influence sur le traitement des données dans la suite de cette étude.

Modélisation et recherche de périodicité. La recherche de périodicité va s'effectuer par l'analyse spectrale selon la méthodologie du Single Cosinor et du Cosinor Sériel (Spectres du Percent Rhythm [PR], SEI, selon Gouthière, 2003), l'analyse spectrale dérivée de l'analyse de Fourier (autopériodogramme selon Jenkins et Watts, 1986), et l'analyse spectrale (périodogramme de Lomb et Scargle selon Scargle, 1982). La modélisation s'effectuera à l'aide de la méthodologie Cosinor (Single et Population Mean Cosinor, Time Series Analysis Seriel Cosinor. http://www. euroestech.net) avec une recherche de période (fenêtrage) comprise entre 15 et 35 h.

Recherche de périodicité par l'analyse spectral dérivée de la méthodologie Cosinor. On distinguera la recherche de période du rythme de la T° pour les deux groupes, sédentaires et sportifs, en fonction de la semaine (les 5 postes de nuit et la période de repos de fin de semaine) par le PR appliqué au Single Cosinor et au Cosinor Sériel puis par la méthode du SEI appliquée au Single Cosinor et au Cosinor Sériel (voir figures 7–11).

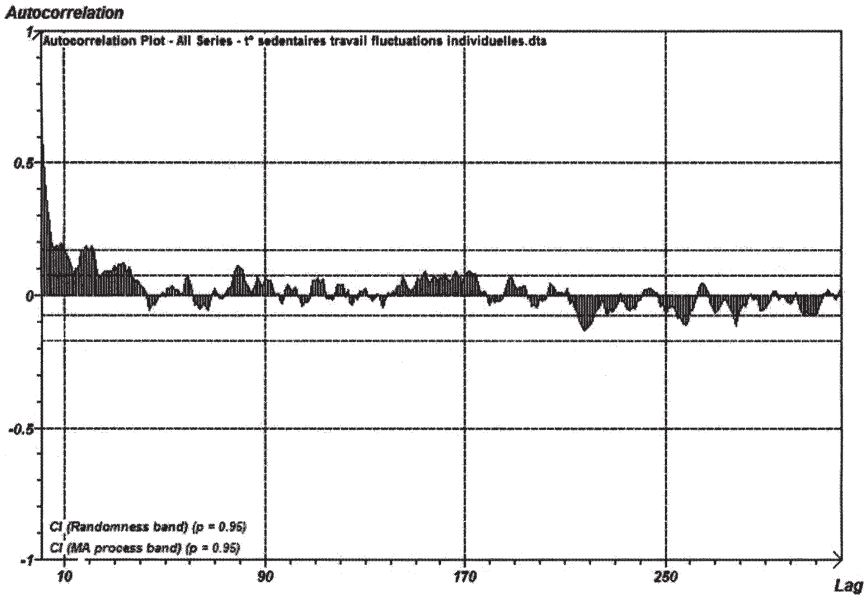
Recherche de périodicité par les analyse spectrales dérivées de l'analyse de Fourier. On distingue l'autopériodogramme selon Jenkins et Watts, 1986 (figure 12) et le périodogramme de Fisher (beaucoup moins fiable) (figure 13).

Autre analyse spectral—Périodogramme de Lomb et Scargle. Le périodogramme de Lomb et Scargle (Scargle, 1982) est une analyse spectrale beaucoup plus fiable et les résultats obtenus sont proches de ceux obtenus par le spectre du PR selon le Single Cosinor (voir figures 14 et 15).

Tableau récapitulatif et fiabilité des périodes détectées. Les valeurs de période du rythme de la T° pour les deux groupes sont évaluées suivant les résultats obtenus en tenant compte d'un classement de fiabilité de chacune des méthodes (voir tableau 2).

La détermination de la période par la méthode de l'autopériodogramme de Jenkins et Watts indique des périodes, dans toutes les conditions, qui se rapprochent

a)



b)

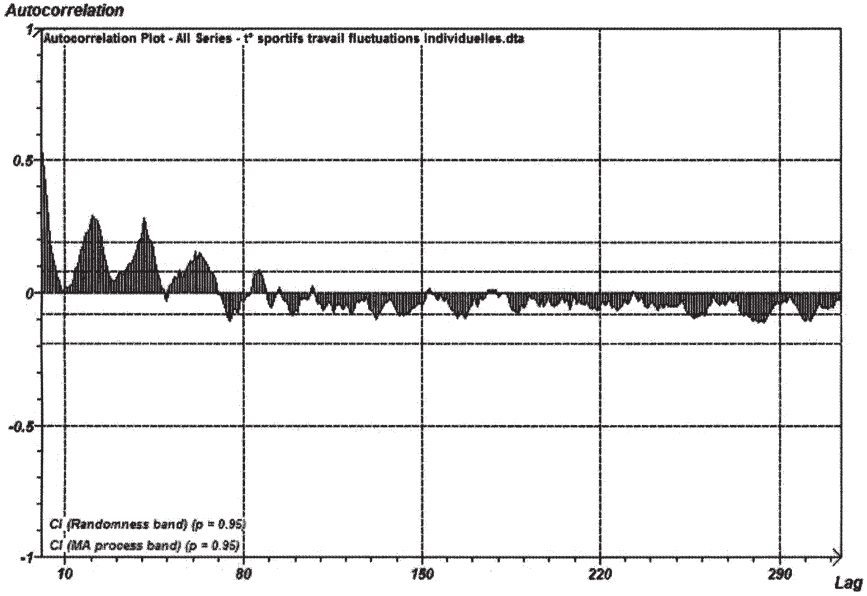
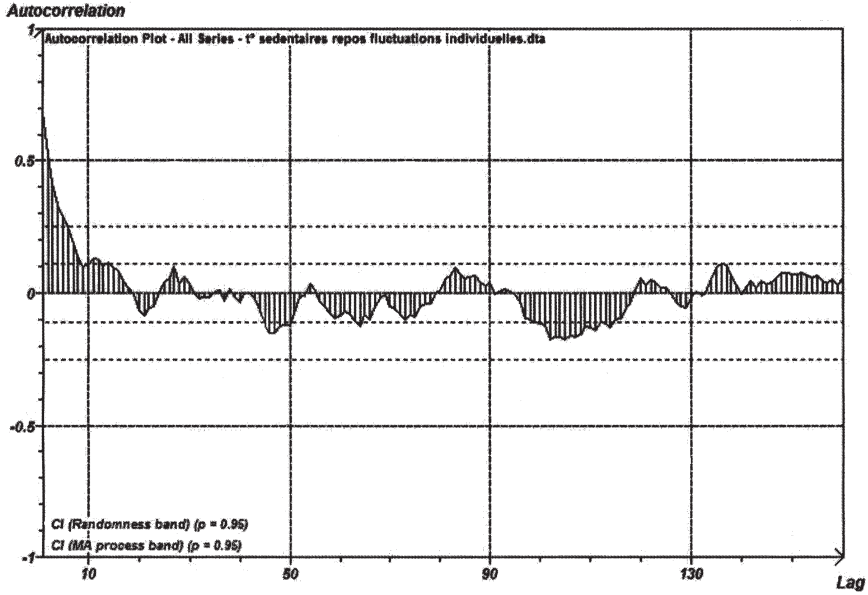


Figure 5. Etude de l'autocorrélation dans les données de T° chez les sujets sédentaires (graphique a) et sportifs (graphique b) pendant la période de travail de nuit. Le caractère aléatoire de la distribution des données semble plus marqué chez les sujets sédentaires.

a)



b)

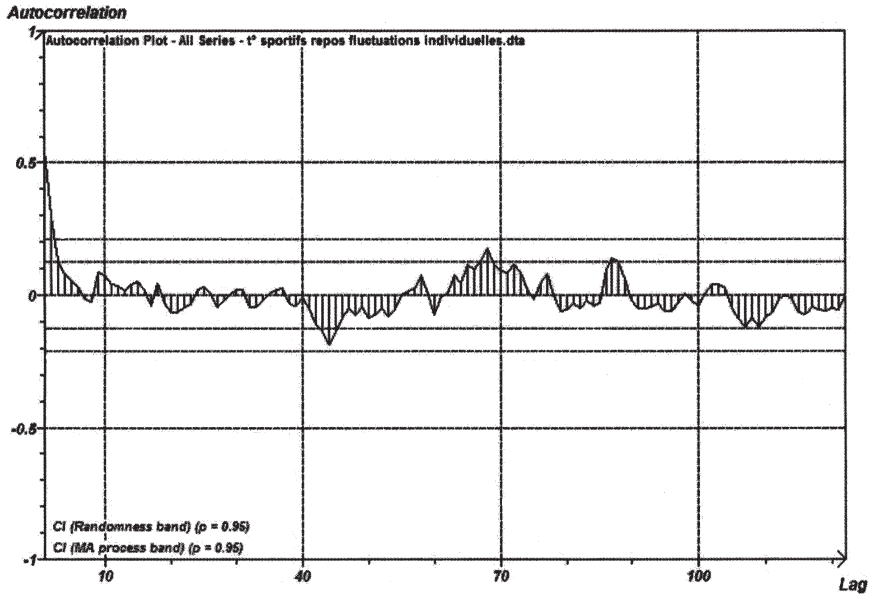


Figure 6. Etude de l'autocorrélation dans les données de T° chez les sujets sédentaires (graphique a) et sportifs (graphique b) pendant la période de repos de fin de semaine. Le caractère aléatoire de la distribution des données ne semble pas marqué.

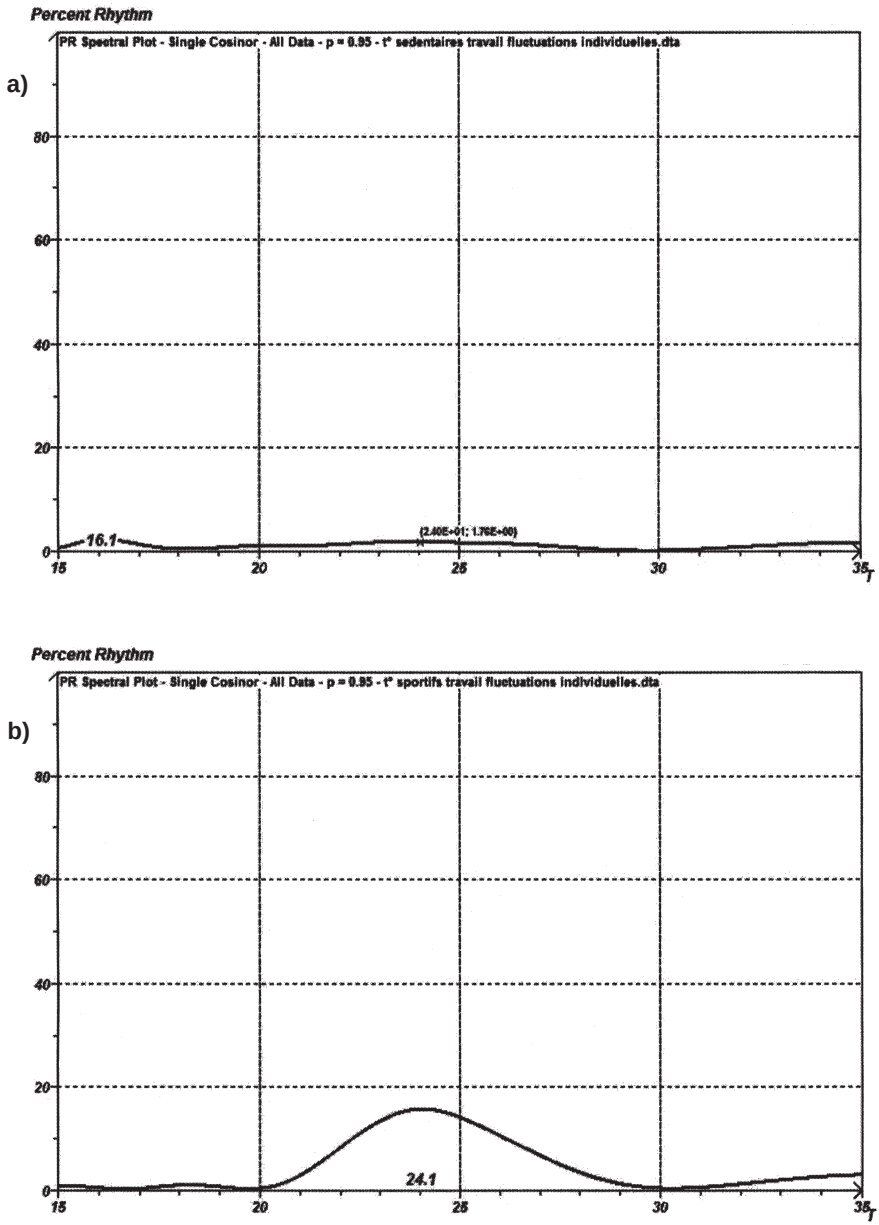


Figure 7. Recherche de période entre 15 et 35 h par le Spectre du Percent Rhythm selon le Single Cosinor. La période remarquable du rythme de la T° pendant la période de travail de nuit chez les sujets sédentaires (graphique a) est détectée à 16,1 et aux alentours 24 h. Chez les sujets sportifs (graphique b), la période remarquable du rythme de la T° est de 24,1 h.

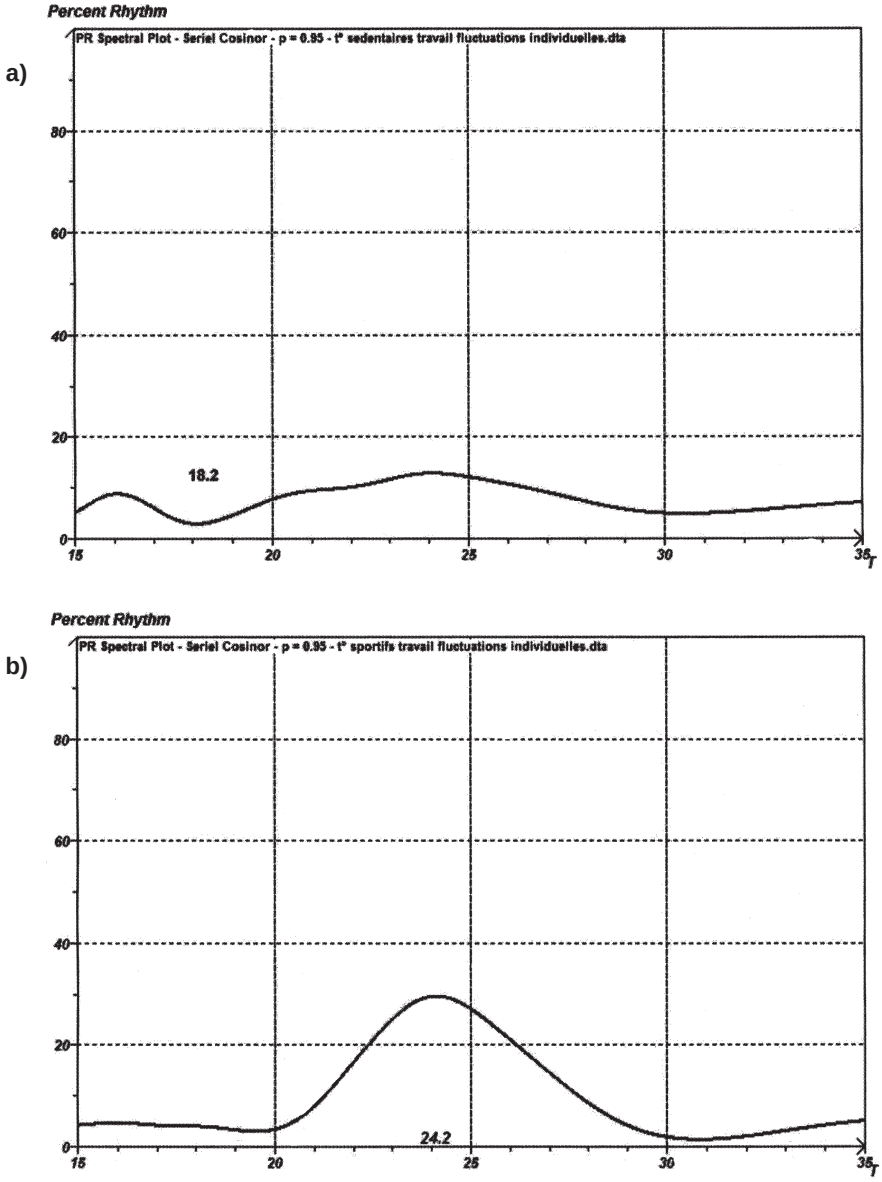


Figure 8. Recherche de périodicité entre 15 et 35 h avec la méthodologie Cosinor Sériel: Spectres du PR. La période du rythme de la T° chez les sujets sédentaires pendant la semaine de travail de nuit est de 18,2 h (graphique a), et pour les sujets sportifs est de 24,2 h (graphique b). On pourra noter que le Population Mean Cosinor est difficilement applicable (zone valide très restreinte, pas de pic vraiment remarquable) pour les données de T° relatives aux sujets sédentaires du fait certainement de la trop grande variabilité des mesures de T° entre les sujets.

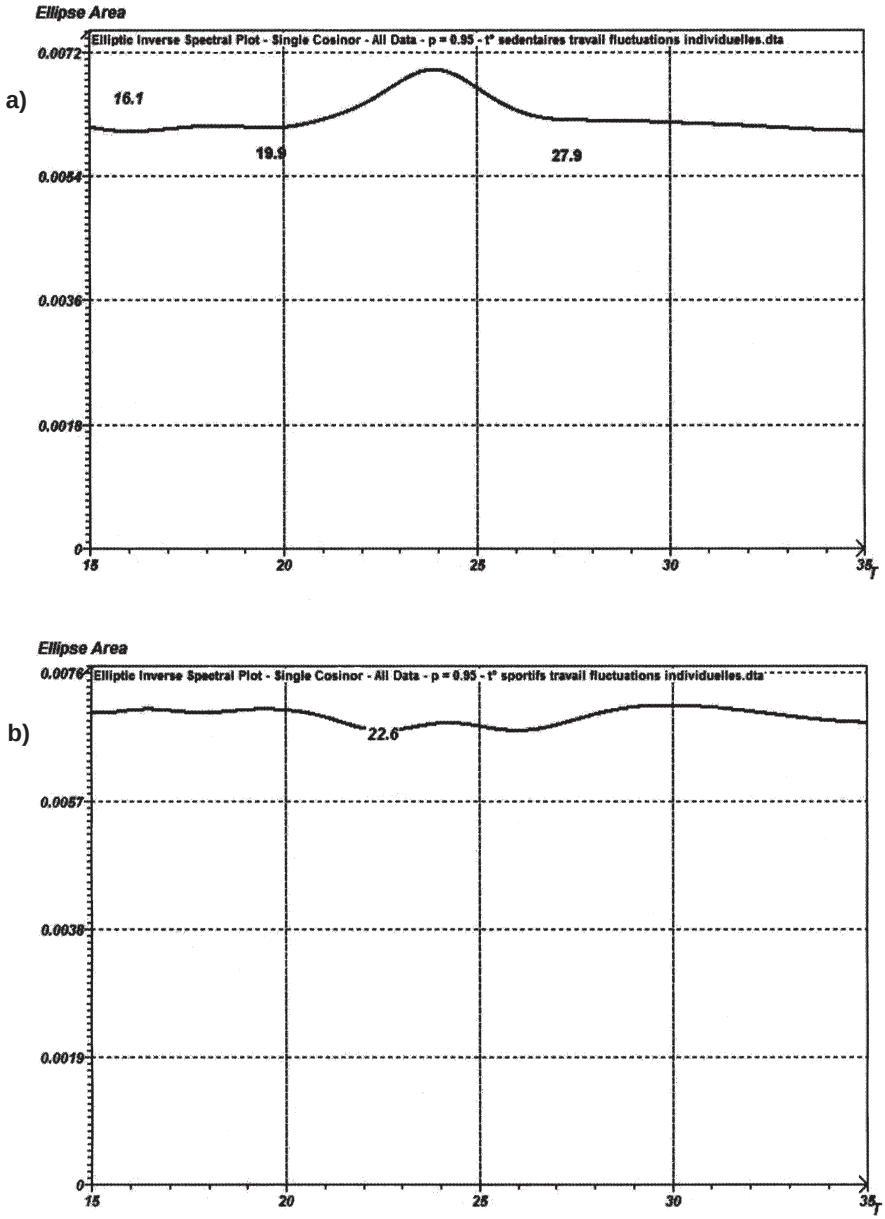
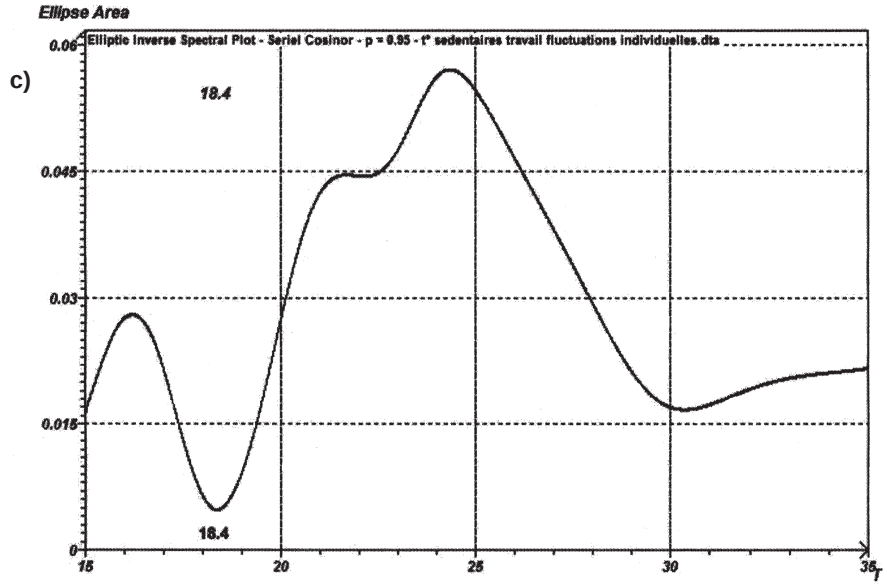


Figure 9. Recherche de périodicité entre 15 et 35 h pendant la semaine en postes de nuit avec la méthodologie du SEI. La période remarquable du rythme de la T° chez les sujets sédentaires pendant le travail de nuit est de 16,1 h (et entre 19,9 et 27,9 h (SEI appliqué au Single Cosinor) (graphique a), et la période remarquable du rythme de la T° pour les sujets sportifs est de 22,6 h (SEI appliqué au Single Cosinor) (graphique b). →



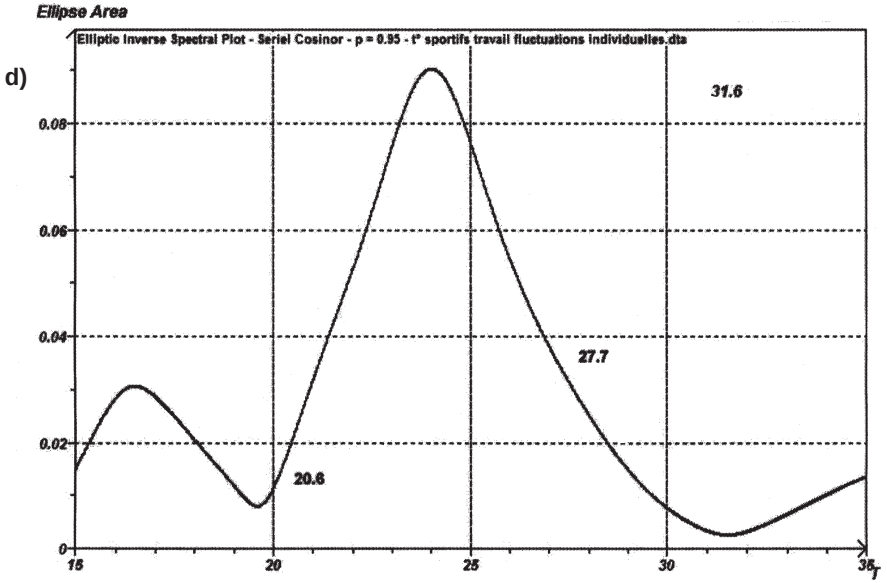


Figure 9 (*cont.*). Le SEI appliqué au Cosinor Sériel indique une période remarquable de 18,4 h pour le groupe des sédentaires pendant la semaine de nuit (graphique c), et indique une période de 20,6 à 27,7 h pour les sujets sportifs (graphique d).

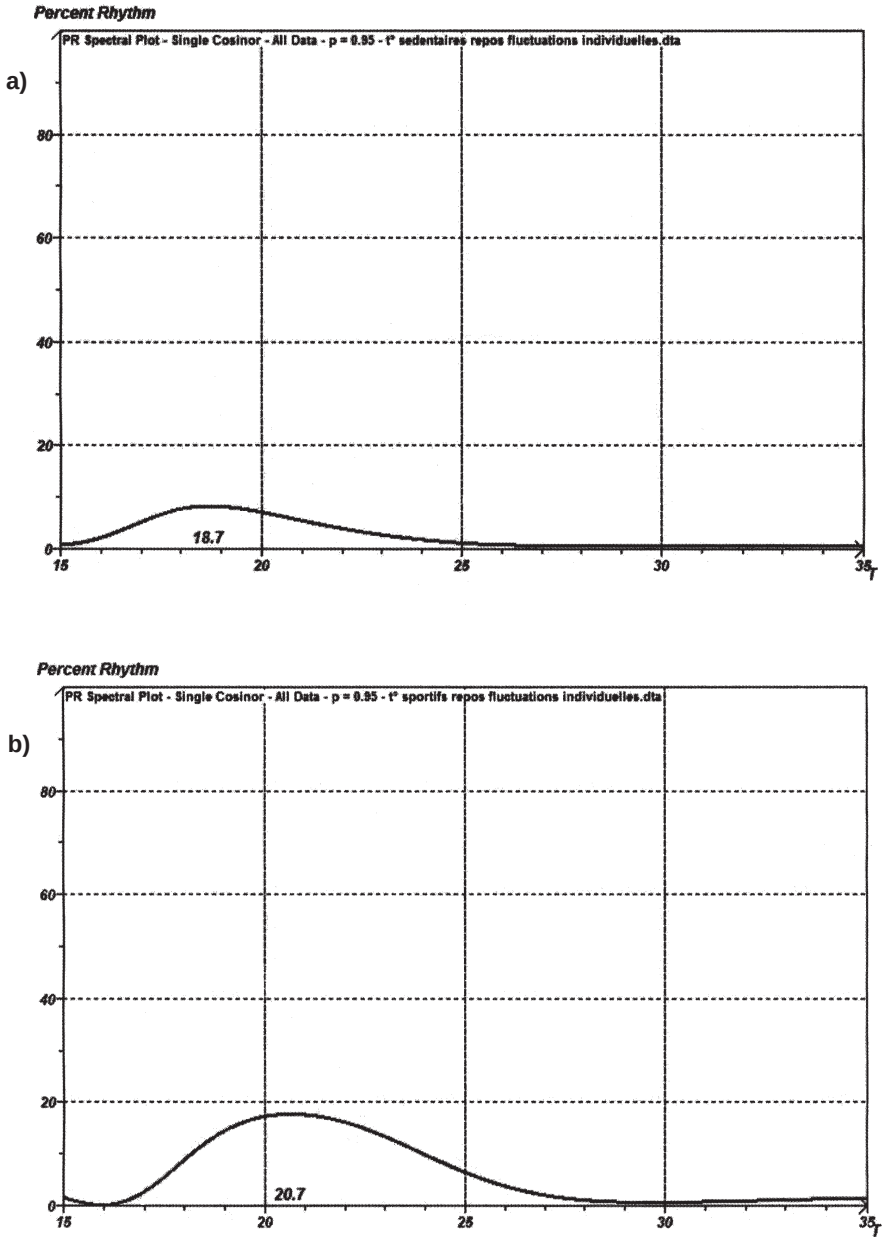
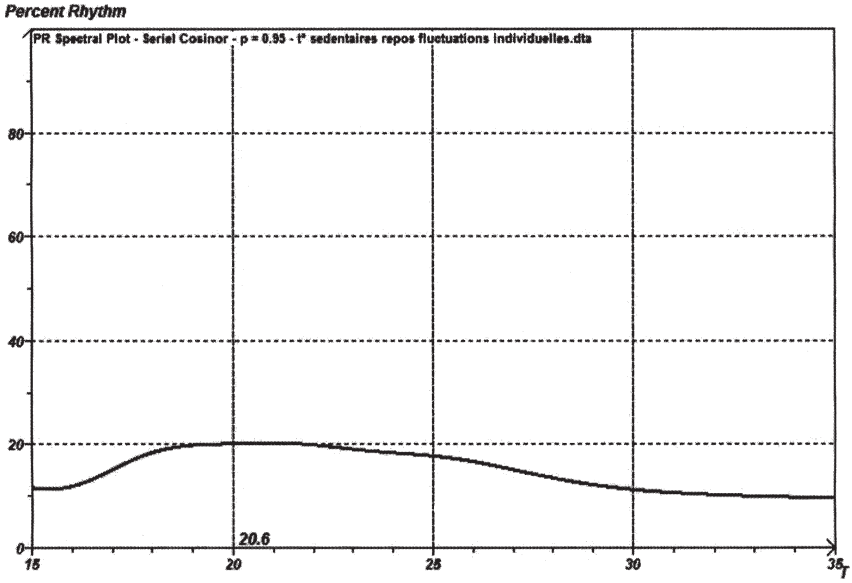


Figure 10. Recherche de périodicité entre 15 et 35 h avec la méthodologie du PR par le Single Cosinor (graphiques a et b) et par le Cosinor Sériel (graphiques c et d) pendant la période de repos de fin de semaine. →

c)



d)

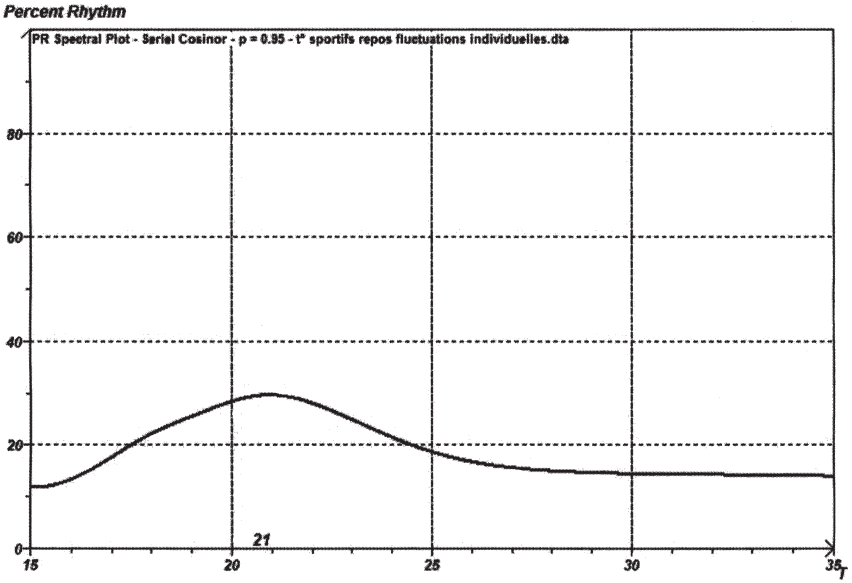
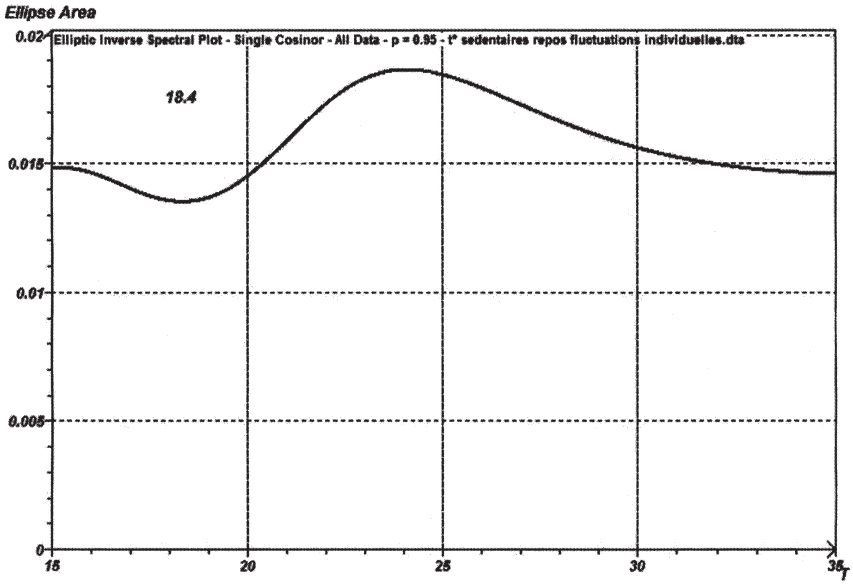


Figure 10 (*cont.*). La période remarquable du rythme de la T° chez les sujets sédentaires pendant le repos est de 18,7 h et de 20,6 h suivant la méthodologie employée (graphiques a et c). La période du rythme de la T° pour les sujets sportifs se situe autour de 20,7 et 21 h (graphiques b et d).

a)



b)

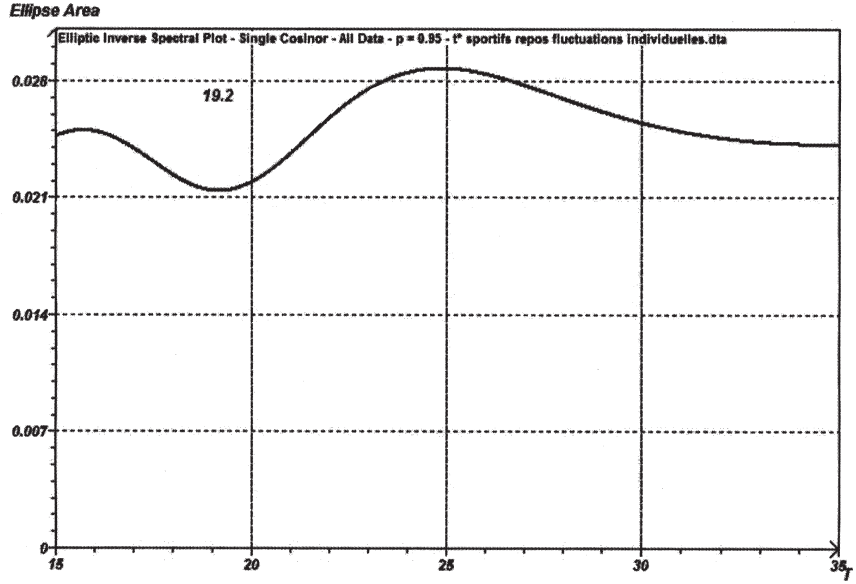
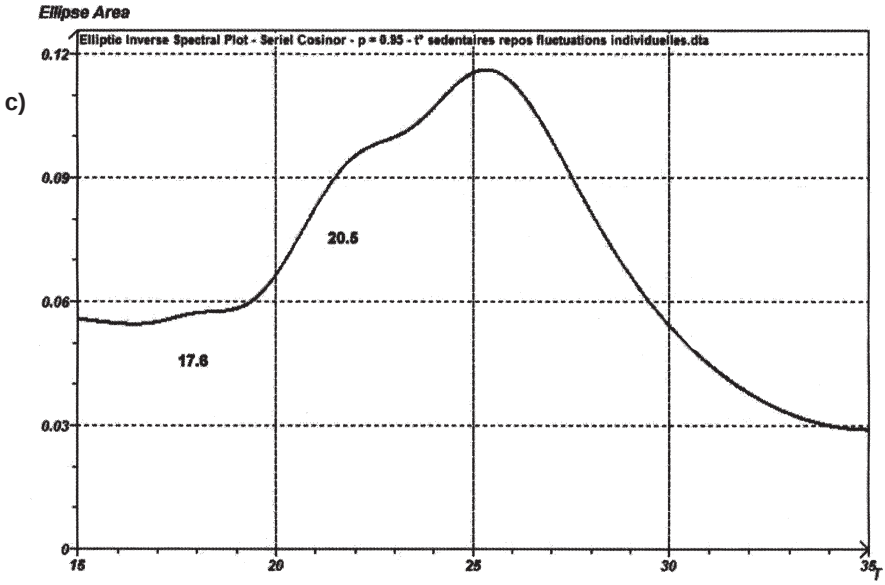


Figure 11. Recherche de périodicité entre 15 et 35 h avec la méthodologie du SEI par le Single Cosinor (graphiques a et b) et par le Cosinor Sériel (graphiques c et d) pendant la période de repos de fin de semaine. →



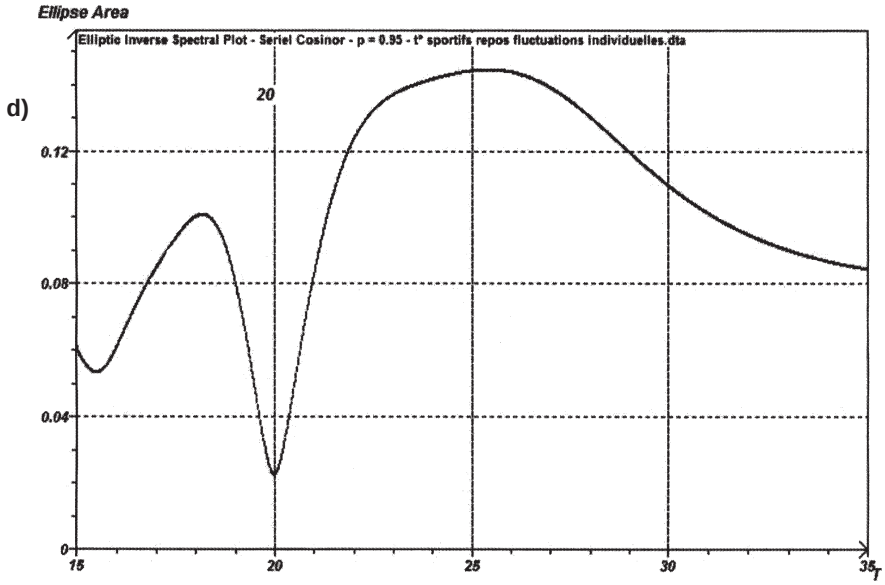
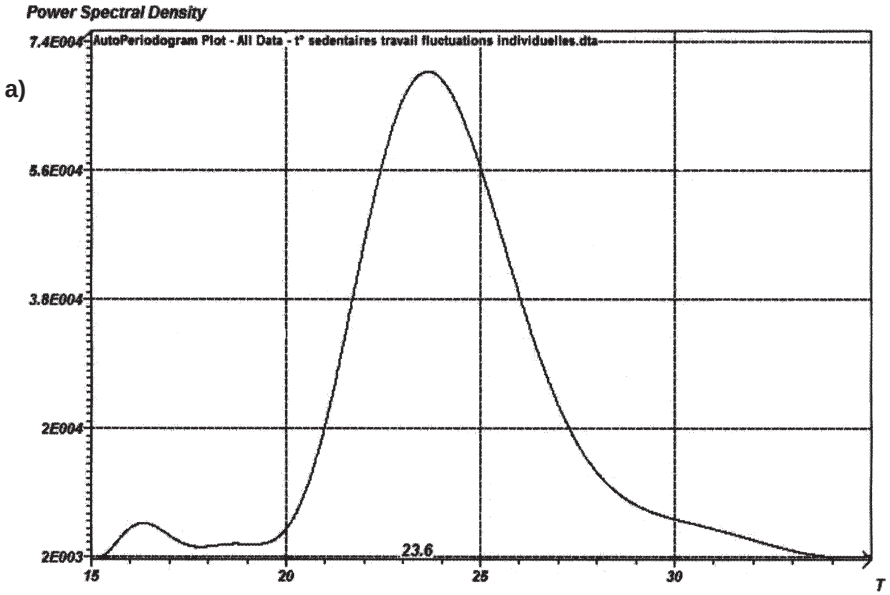


Figure 11 (*cont.*). La période remarquable du rythme de la T° chez les sujets sédentaires pendant le repos est de 18,4 h et de 17,6 à 20,5 h suivant la méthodologie employée (graphiques a et c). La période du rythme de la T° pour les sujets sportifs se situe autour de 19,2 et 20 h (graphiques b et d).



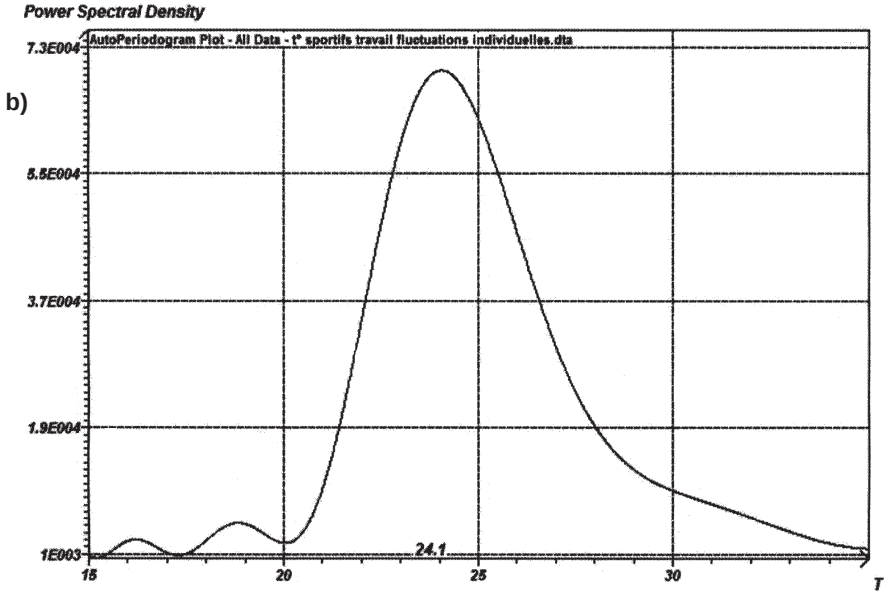
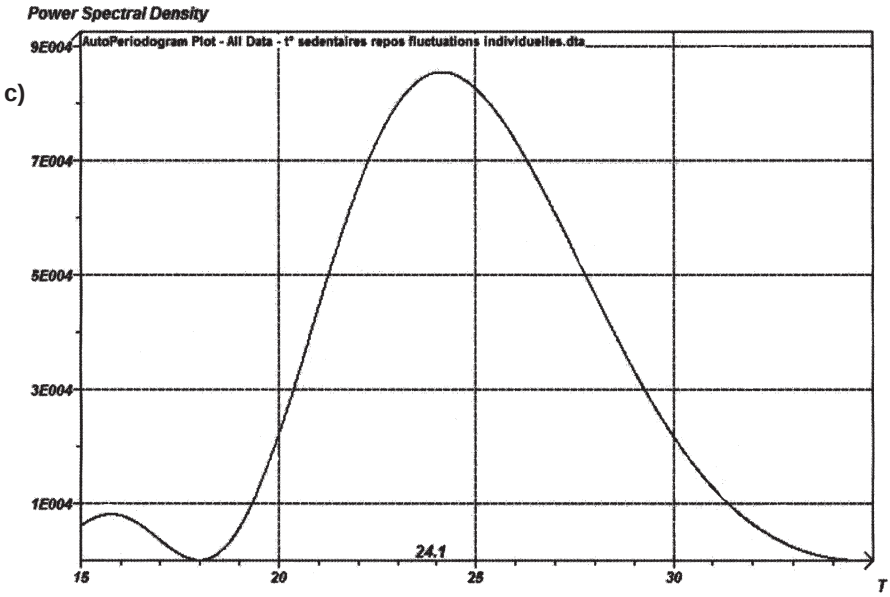


Figure 12. Recherche de la période de T° entre 15 et 35 h par le spectre d'autopériodogramme selon Jenkins et Watts. La période du rythme de la T° chez les sujets sédentaires est de 23,6 h pendant la semaine de travail en poste de nuit (graphique a), et de 24,1 h pendant la période de repos de fin de semaine (graphique c). →



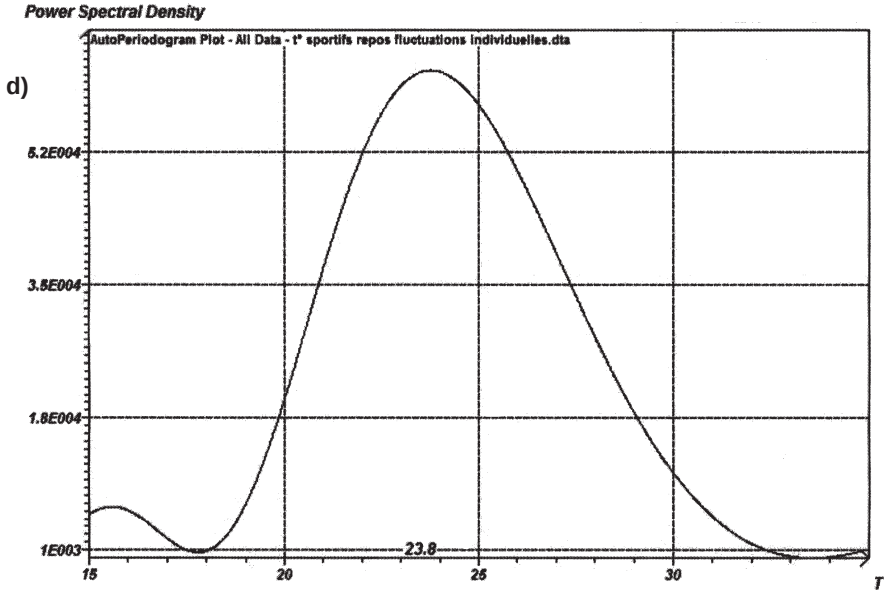
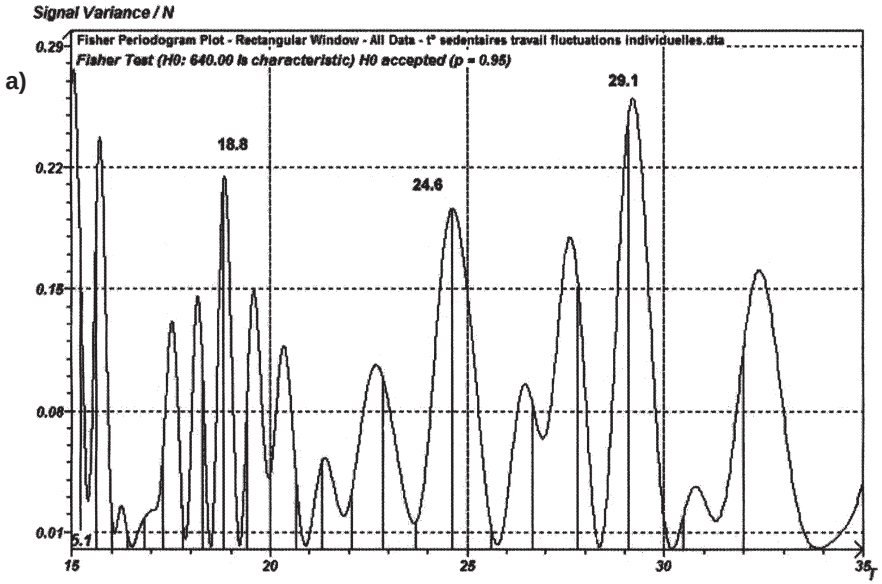


Figure 12 (*cont.*). Chez les sujets sportifs, la période du rythme de la T° est de 24,1 h (graphique b) pendant la semaine en poste de nuit, et de 23,8 h pendant le repos de fin de semaine (graphique d).



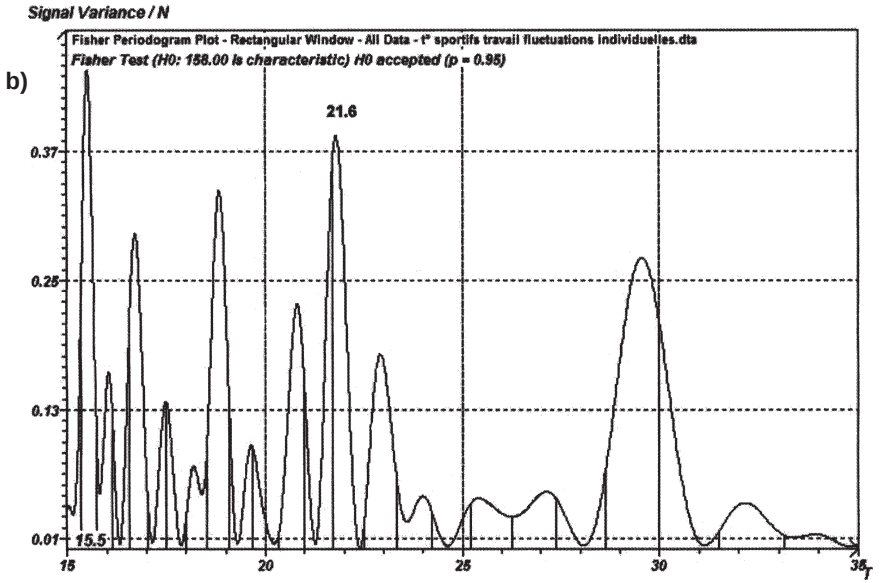
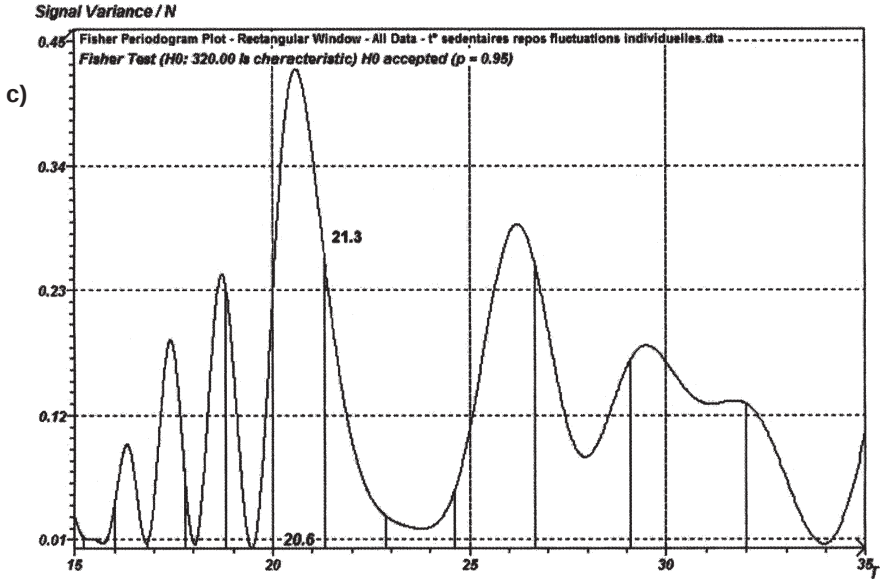


Figure 13. Recherche de la période de T° entre 15 et 35 h par le périodogramme de Fisher. La période du rythme de la T° chez les sujets sédentaires pendant le travail présente plusieurs pics remarquables: 18,8 h, 24,6 h, et 29,1 h (graphique a), et la période du rythme de la T° est de 20,6 h pour ce même groupe pendant la période de repos (graphique c). →



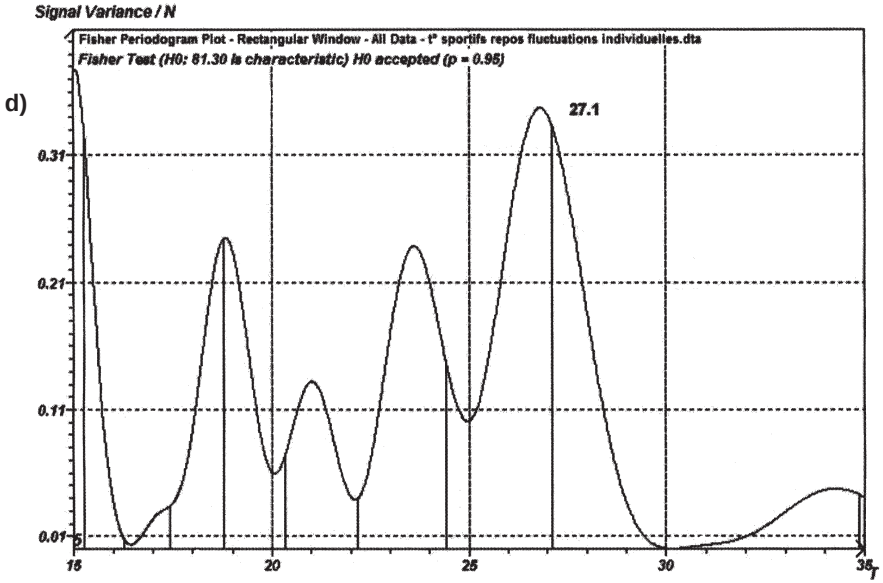


Figure 13 (*cont.*). Pour les sujets sportifs, la période du rythme de la T° se situe à 15,5 h et éventuellement à 21,8 h pendant les postes de nuit (graphique b), et plusieurs périodes remarquables sont détectées pendant la période de repos de fin de semaine et nous retiendrons la principale à 15,1 h (spectre de raies) (graphique d). *Note*: Lecture de la période se fait sur la fondamentale et non sur la crête du pic.

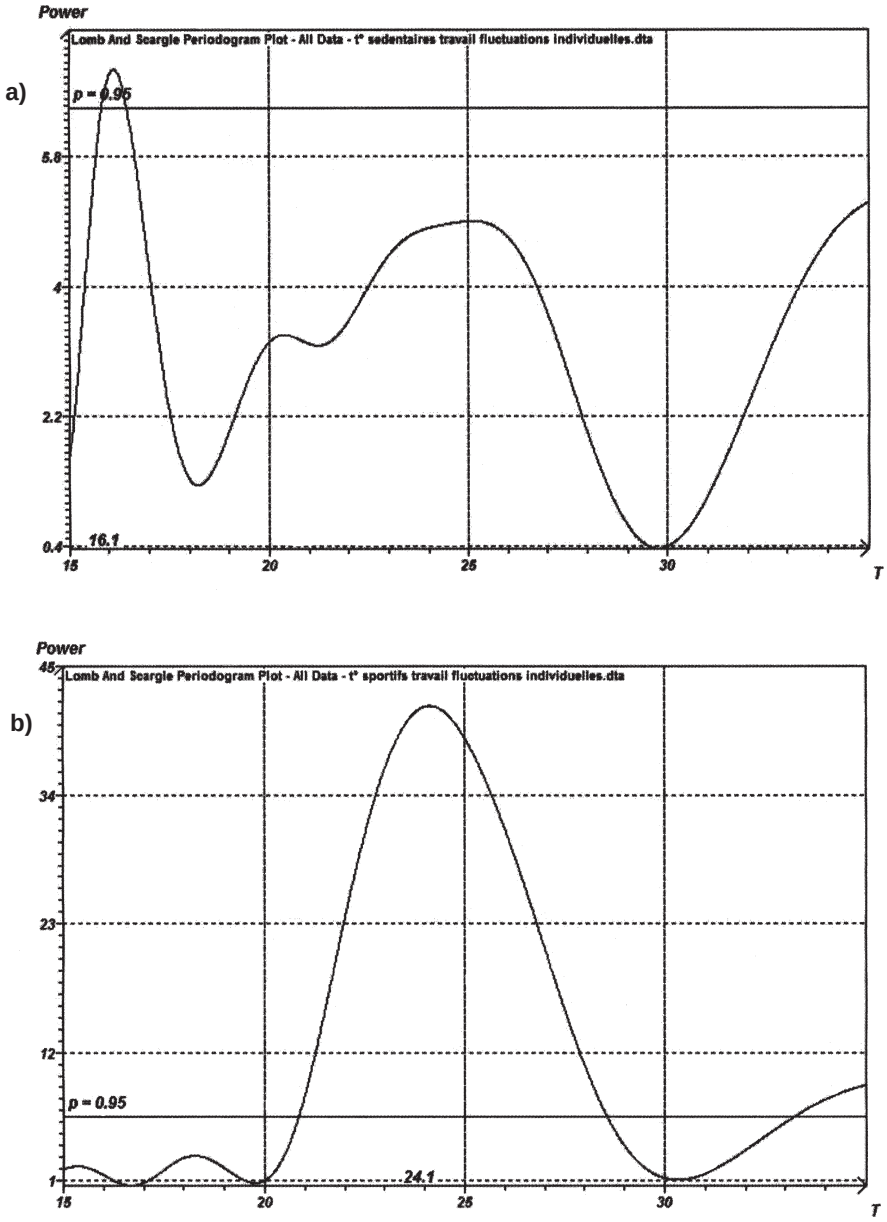


Figure 14. Recherche de période du rythme de la T° entre 15 et 35 h par la méthode du périodogramme de Lomb et Scargle. La période du rythme de la T° pendant les postes de nuit chez les sujets sédentaires se situe autour de 16,1 h (graphique a), et la période du rythme de T° chez les sujets sportifs se situe autour de 24,1 h (graphique b).

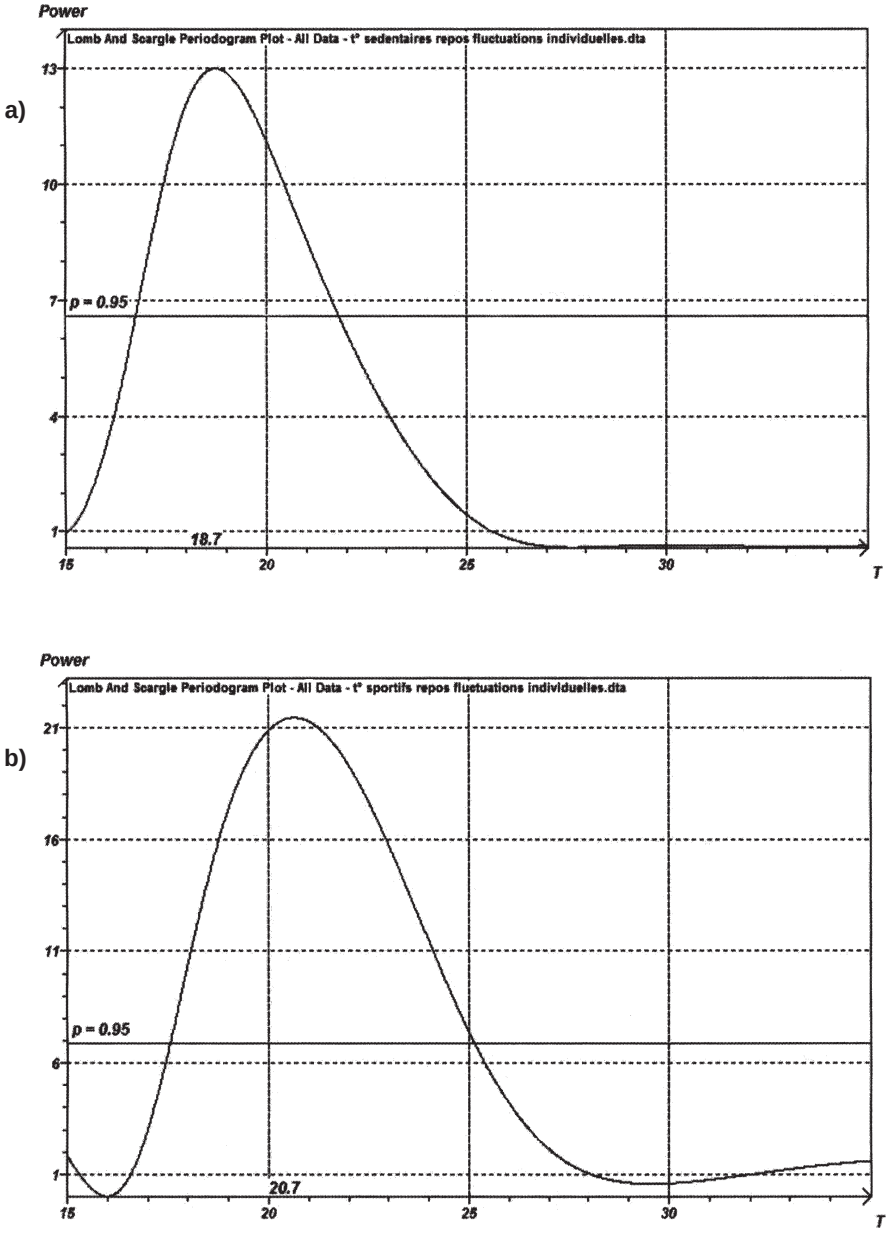


Figure 15. Recherche de période du rythme de la T° entre 15 h et 35 h par la méthode du périodogramme de Lomb et Scargle. La période du rythme de la T° pendant le repos chez les sujets sédentaires se situe autour de 18,7 h (graphique a), et celle chez les sujets sportifs autour de 20,7 h (graphique b).

Tableau 2 Tableau récapitulatif des valeurs de périodes du rythme de la T°

	Pendant les postes de nuit		Période de repos (week-end)		
	Sédentaires	Sportifs	Sédentaires	Sportifs	Fiabilité
PR – Single Cosinor	16,1 (et 24)	24,1	18,7	20,7	**
PR – Sériel Cosinor	18,2	24,2	20,6	21	*
SEI – Single Cosinor	16,1 et entre 19,9 et 27,9	22,6	18,4	19,2	******
SEI – Sériel Cosinor	18,4	20,6 à 27,7	17,6 à 20,5	20	***
Autopériodogramme de Jenkins et Watts	23,6	24,1	24,1	23,8	*
Périodogramme de Fisher	18,8, 24,6 et 29,1	15,5 et 21,6	20,6	15,1	
Périodogramme de Lomb et Scargle	16,1	24,1	18,7	20,7	**

Note: Le choix de la valeur de la période est déterminé par la fiabilité de la méthode, et dans ce domaine le spectre elliptique inverse (SEI) selon le Single Cosinor présente le plus grand intérêt.

des rythmes circadiens. Cependant, les périodes indiquées par cette méthode ne valident pas le modèle suite à l'analyse complémentaire des tests goodness-of-fit, avec le K^2 test, K-S test, et test de l'ellipse de confiance. Voir exemple des tests en annexe. La recherche de périodes par le SEI présente ici le plus d'intérêt et permet de déterminer les différentes avec le plus de fiabilité. Cependant, la période détectée pour le rythme de la T° du groupe des sédentaires pendant leurs postes de nuit semble difficile à déterminer (ainsi qu'avec les autres méthodes, certainement du fait de la faible amplitude) et confirme le manque de qualité des données (figure 5, graphique a).

Modélisation par la méthodologie Cosinor. Les figures 16 et 17 présentent le modèle sinusoïdal choisi dans le cas d'une modélisation par le Single Cosinor (voir aussi les exemples des tests en annexe), respectivement, pour les sujets sédentaires puis sportifs pendant le travail de nuit (voir figure 18). De même, les modèles par le Population Mean Cosinor sont calculés (voir tableau 3).

Nous allons présenter de même les modèles obtenus pour la période de repos par la modélisation du single cosinor (voir figures 19 et 20). Nous ne présenterons pas les modèles obtenus par le Population Mean Cosinor du fait de leur proche similitude avec les précédents, mais un tableau récapitulatif avec les équations des modèles calculés (voir tableau 4).

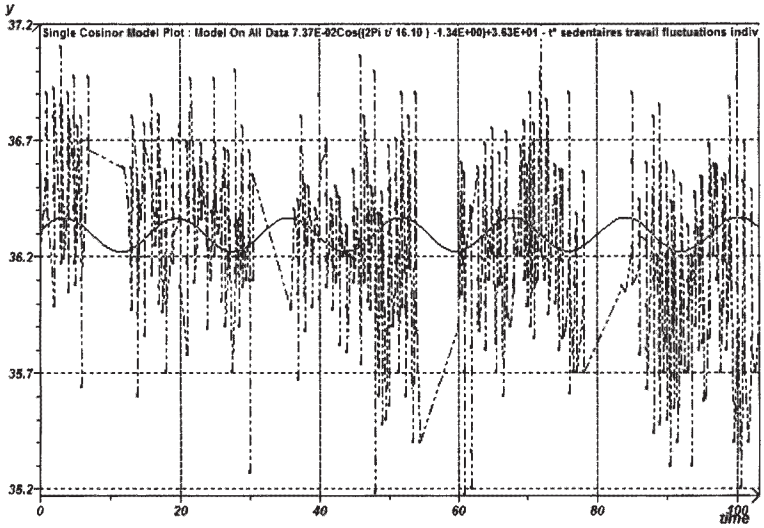


Figure 16. Modélisation par le Single Cosinor pour les sujets sédentaires pendant le travail de nuit avec une période de 16,1 h. Le test de l'ellipse est positif. On observe une décroissance du niveau moyen. Cependant, du fait de la qualité des données et de la faible amplitude de T°, l'ajustement de la période semble difficile à déterminer. S'agissant du rythme circadien de la T°, une période de 16,1 h semble surprenante, ce qui de plus, semble se confirmer la représentation graphique.

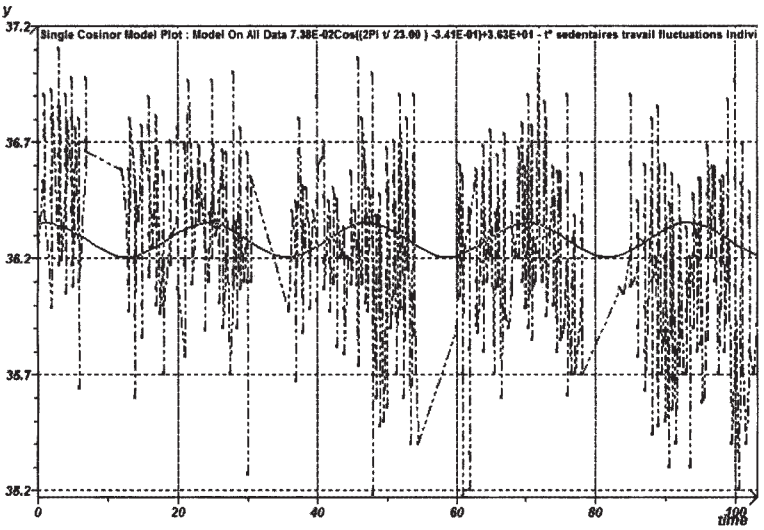


Figure 17. Modélisation par le Single Cosinor pour les sujets sédentaires pendant le travail de nuit avec une période de 23 h. Le test de l'ellipse est aussi positif et le modèle est vérifié par les tests du goodness-of-fit. Le rythme de la T° peut être modélisé par l'équation: 0,0738 Cos [(2π t / 23.00) – 0,341] + 36,3.

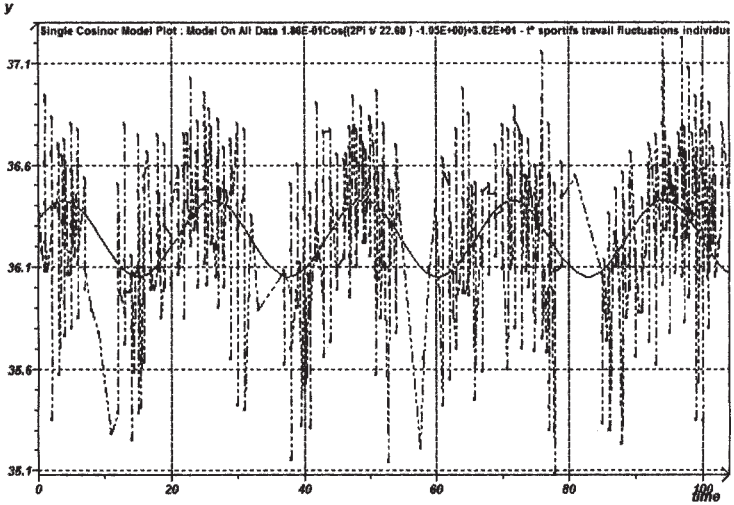


Figure 18. Modélisation par le Single Cosinor pour les sujets sportifs pendant le travail de nuit avec une période de 22,6 h du rythme de la T° (la phase est exprimée en radians soit –60 degrés). Le test de l'ellipse est positif. Le niveau moyen reste constant.

Tableau 3 Modèles obtenus par le Single Cosinor et par le Population Mean Cosinor pour la période des postes de nuit

Sujets sedentaires, pendant le travail de nuit, période de 23 h	Sujets sportifs, pendant le travail de nuit, période de 22,6 h
Modélisation par le Single Cosinor	
0,0738 Cos [(2π t / 23.00) – 0,341] + 36,3 Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit	0,186 Cos [(2π t / 22,6) – 1,05] + 36,2 Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit
Modélisation par le Population Mean Cosinor	
0,0806 Cos [(2π t / 23) – 0,272] + 36,3 Test de l'ellipse négatif, l'origine du vecteur amplitude se situe dans l'ellipse de confiance	0,181 Cos [(2π t / 22,6) – 1,06] + 36,2 Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit

Note: Seul le modèle par le Population Mean Cosinor pour les sédentaires ne semble pas être validé. On pourra noter que les valeurs des amplitudes, des acrophases, et des MESOR sont proches avec les deux modélisations. Pour les tests complémentaires goodness-of-fit, voir la figure en annexes.

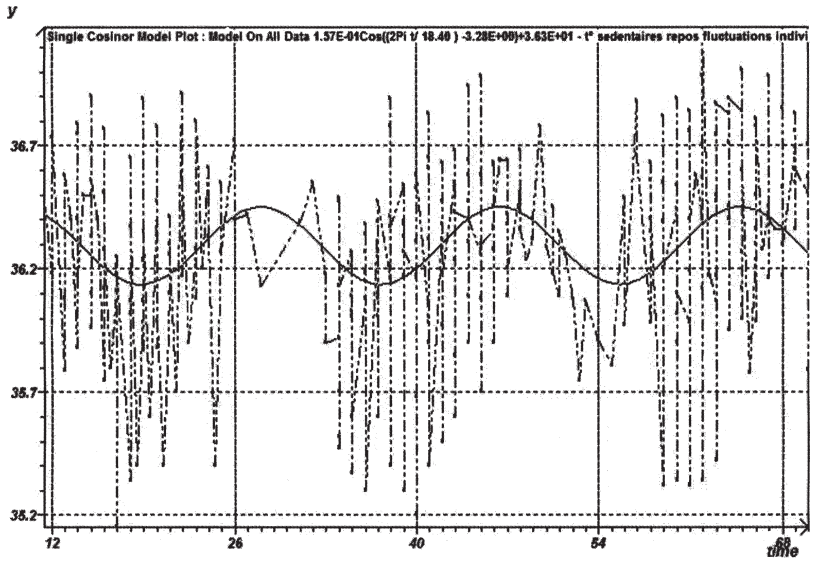


Figure 19. Modélisation par le Single Cosinor pour les sujets sédentaires pendant le repos pour une période du rythme de T° de 18,4 h (la phase est exprimée en radians soit –187 degrés). Le test de l'ellipse est positif.

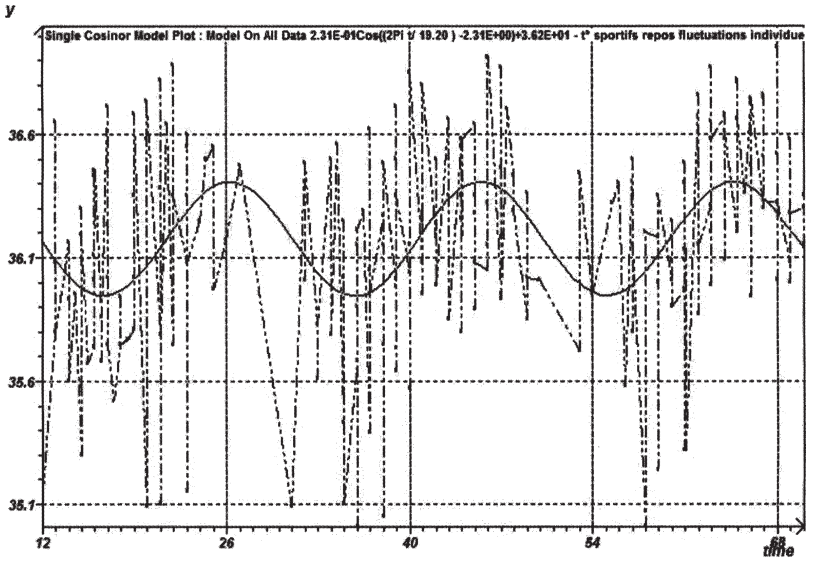


Figure 20. Modélisation par le Single Cosinor pour les sujets sportifs pendant le repos pour une période de 19,2 h (la phase est exprimée en radians soit –154 degrés). Le test de l'ellipse est positif.

Tableau 4 Modèles obtenus par le Single Cosinor et par le Population Mean Cosinor pour la période de repos en fin de semaine

Sujets sédentaires, pendant le travail de nuit, période de 18,4 h	Sujets sportifs, pendant le travail de nuit, période de 19,2 h
Modélisation par le Single Cosinor	
0,157 Cos [(2π t / 18,4) – 3,28] + 36,3	0,231 Cos [(2π t / 19,2) – 2,31] + 36,2
Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit	Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit
Modélisation par le Population Mean Cosinor	
0,162 Cos [(2π t / 18,4) – 3,29] + 36,3	0,216 Cos [(2π t / 19,2) – 2,36] + 36,2
Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit	Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit

Note: On pourra noter que les valeurs des amplitudes, des acrophases, et des MESOR sont proches avec les deux méthodes issues du Single et Sériel Cosinor.

ETUDE COMPARÉE DES FLUCTUATIONS JOURNALIÈRES DE T° CHEZ LES SUJETS SÉDENTAIRES ET SPORTIFS EXERÇANT UN TRAVAIL DE NUIT

Dans l'étude des T° concernant les fluctuations journalières, les données sont recueillies par journée et constituent des séries journalières. On distinguera les données concernant la période de repos qui seront organisées de la même façon. Nous allons présenter ici des tableaux récapitulatifs.

Etude d'indépendance, distribution normale des données et caractère aléatoire des distributions. La qualité de la distribution des données des différents échantillons est évaluée par différents diagrammes (voir tableau 5 et les résultats des paragraphes: "Etudes de Normalité"; "Independance des donnees de T°"; "Caractère aléatoire de la distribution des donnés de T°").

Recherche de périodicité. Les différentes méthodes ont été décrites précédemment (voir les résultats des paragraphes: "Recherche de périodicité par l'analyse spectral dérivée de la méthodologie Cosinor" à "Autre analyse spectral–Périodogramme de Lomb et Scargle"). La période du rythme de la T° est recherchée par différentes analyses spectrales (voir tableau 6).

Modélisation par la méthodologie Cosinor. Le modèle single cosinor est le mieux adapté et on choisira le modèle calculé sur tous les points. La méthodologie du population mean cosinor et le modèle en résultant ne sont pas à prendre en considération du fait de la grande variabilité des données. Il sera donné ici à titre indicatif. Ainsi, il est difficile de déterminer le comportement de la population (voir tableaux 7 et 8).

Tableau 5 Evaluation de la qualité des données des différents échantillons

Postes de nuit		Repos de fin de semaine	
Sédentaires	Sportifs	Sédentaires	Sportifs
Diagramme de Décalage			
Indépendance +++	Indépendance +++	Indépendance +++	Indépendance +++
Aléatoire +	Aléatoire +	Aléatoire +	Aléatoire +
Auto Corrélogramme			
Aléatoire – – –	Aléatoire – – –	Aléatoire – – –	Aléatoire – – –
Graphique de Normalité $p = 0{,}95$ $H_{(0)}$: Distribution Normale			
K-S test négatif	K-S test négatif	K-S test négatif	K-S test positif

Tableau 6 Evaluations des périodes du rythme de la T° avec un fenêtrage de 15 à 35 h

	Postes de nuit		Repos		
	Sédentaires	Sportifs	Sédentaires	Sportifs	Fiabilité
PR – Single Cosinor	23,4 h	24,2 h	19,1 h	20,6 h	**
PR – Sériel Cosinor	27,1 h	24,4 h	21,8 h	22,5 h	*
SEI – Single Cosinor	15,1 h et de 20,9 à 25,4 h	22,2 h	18,6 h	19,2 h	******
SEI – Sériel Cosinor	26,6 h	23,7 h	20,8 h	20,4 h	*
Autopériodogramme	24,7 h	24,5 h	24,1 h	23,9 h	*
Périodogramme de Fisher	34,2 h	16,5 h	25 h	18,5 h	
Périodogramme de Lomb et Scargle	23,1 h	24,2 h	19 h	20,5 h	**

Note: On choisira ici les résultats obtenus par le spectre elliptique inverse (SEI) appliqué au Single Cosinor.

Tableau 7 Modèles du rythme de la T° chez les sujets sédentaires et sportifs pendant les postes de nuit, issus de la méthodologie Cosinor

Pendant le travail en poste de nuit	
Sujets sédentaires, période de 23 h	Sujets sportifs, période de 22,2 h
Modélisation par le Single Cosinor	
0,0922 Cos [(2π t / 23.00) – 0,217] + 3.63E+01 Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit	0,155 Cos [(2π t / 22,2) – 1,46] + 36,3 Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit
Modélisation par le Population Mean Cosinor	
0,11 Cos [(2π t/ 23,0) – 0,853] + 36,2 Test de l'ellipse négatif, l'origine du vecteur amplitude se situe dans l'ellipse de confiance	0,188 Cos [(2π t / 22,2) – 0,936] + 36,2 Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit

Tableau 8 Modèles du rythme de la T° chez les sujets sédentaires et sportifs pendant la période de repos de la fin de semaine, issus de la méthodologie Cosinor

Pendant la période de repos de fin de semaine (week-end)	
Sujets sédentaires, période de 18,4 h	Sujets sportifs, période de 19,2 h
Modélisation par le Single Cosinor	
0,151 Cos [(2π t / 18,4) – 3,23] + 36,3 Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit	0,224 Cos [(2π t / 19,2) – 2,25] + 36,2 Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit
Modélisation par le Population Mean Cosinor	
0,144 Cos [(2π t / 18,4) – 3,08] + 36,3 Test de l'ellipse négatif, l'origine du vecteur amplitude se situe dans l'ellipse de confiance	0,184 Cos [(2π t / 19,2) – 2,00] + 36,1 Test de l'ellipse significatif (0.95). Modèle validé par les tests complémentaires goodness-of-fit

Tableau 9 Comparatifs des paramètres des fluctuations de la T° calculés à partir du modèle du Single Cosinor pour les sujets sédentaires et sportifs

	Travail de nuit		Repos (week-end)	
	Sedentaires	Sportifs	Sédentaires	Sportifs
Fluctuations Individuelles				
Amplitude du rythme de la T°	0,07 °C	0,19 °C	0,16 °C	0,23 °C
Période du rythme de la T°	23 h	22,6 h	18,4 h	19,2 h
Fluctuations Journalières				
Amplitude du rythme de la T°	0,09 °C	0,15 °C	0,15 °C	0,22 °C
Période du rythme de la T°	20,9 à 25,4 h	22,2 h	18,5 h	19,2 h

Note: Lors des périodes en postes de nuit et lors de leur période de repos du week-end.

COMPARAISONS DES RYTHMES DE LA T° OBSERVÉS DANS LE CAS DES FLUCTUATIONS INDIVIDUELLES ET DES FLUCTUATIONS JOURNALIÈRES

Les deux études précédentes nous laissent supposer que le rythme de la T° chez les sujets sédentaires pendant le travail en postes de nuit a une période aux alentours de 15,1 h à 16,1 h d'après le SEI appliqué au Single Cosinor. Cependant pour ce groupe, compte tenu de la distribution des données (figure 1, graphique a), des périodes secondaires détectées (figure 9, graphique a), de l'ajustement du modèle sur les points expérimentaux (figures 16 et 17) et des connaissances sur le rythme circadien de T° chez l'homme, la période se rapproche probablement de 23 h. Pour les sujets sportifs, la période du rythme de la T° est comprise entre 22,2 et 22,6 h lors de la semaine de travail de nuit.

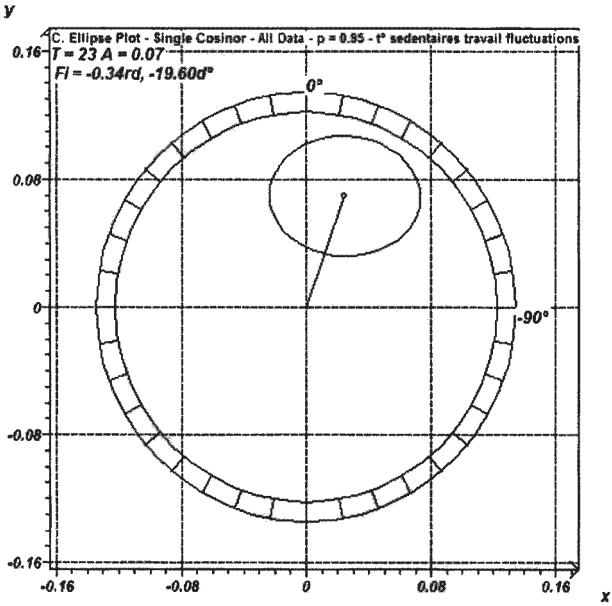
Pendant le temps de repos en fin de semaine, la période de la T° observée chez les sujets sédentaires est comprise entre 18,4 et 18,5 h. Pour les sujets sportifs la période est de 19,2 h. Ainsi, les différents paramètres des fluctuations sont calculés et présentés dans le tableau 9.

Les différents paramètres des différents rythmes observés sont résumés dans les figures suivantes (figures 21 et 22).

QUALITÉ ACTIGRAPHIQUE OU REFLET ACTIMÉTRIQUE DU SOMMEIL

Activité motrice pendant l'éveil. Au cours de la semaine de travail, l'analyse statistique ne démontre pas de différence du niveau d'activité global lors de la période d'éveil entre le groupe des sportifs et des sédentaires, $F(1, 7) = 0.234$; $p = 0.64$. Cependant, pour nos deux groupes, le niveau global d'activité diminue pendant la période de repos de fin de semaine par rapport aux autres jours de la semaine, $F(5, 35) = 3.32$; $p = 0.014$ (figure 23 et tableau 10).

a)



b)

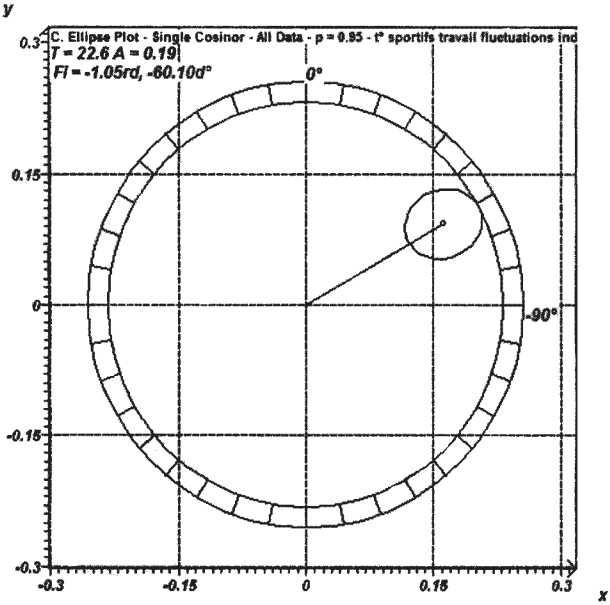
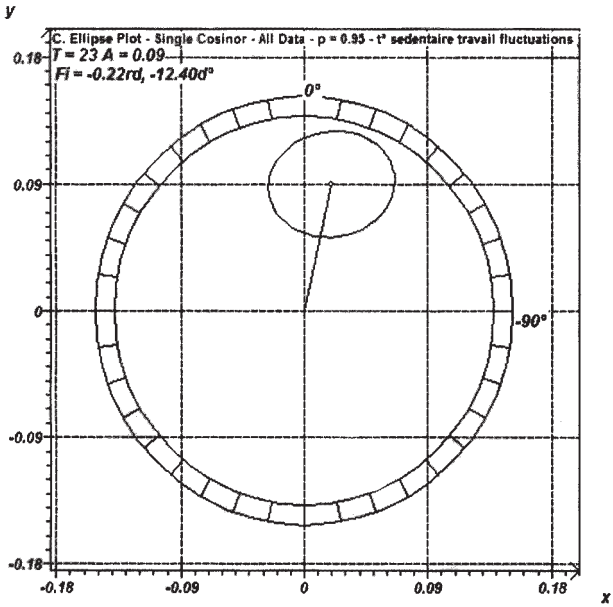


Figure 21. Ellipses de confiance suivant le Single Cosinor. Les sujets sédentaires présentent une acrophase comprise entre 00h49’ (–0,22 rd ou –124 d°) et 01h18’ (–0,34 rd ou –19,6 d°) avec une amplitude allant de 0,07 °C à 0.09 °C (graphiques a et c) avec une période de 23 h. →

c)



d)

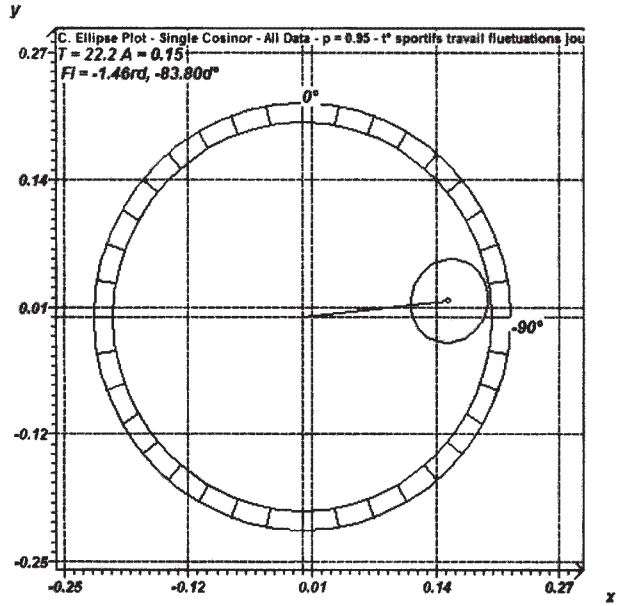


Figure 21 (*cont.*). Les sujets sportifs présentent une acrophase comprise entre 03h59' (–1,05 rd ou –60,10 d°) et 05h35' (–1,46 rd ou –83,80 d°) avec une amplitue comprise entre 0,15 °C et 0,19 °C (graphiques b et d) avec une période de 22,6 h pendant le travail de nuit. La 1ère ligne correspond aux fluctuations individuelles, la 2ème ligne aux fluctuations journalières.

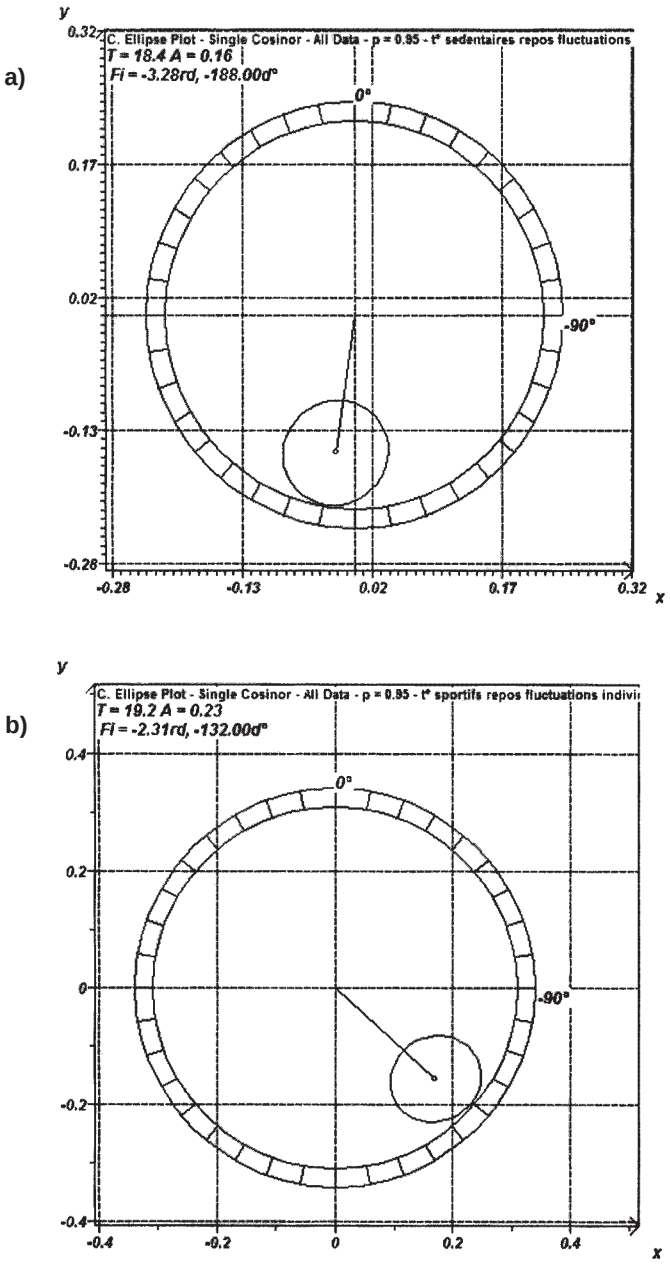
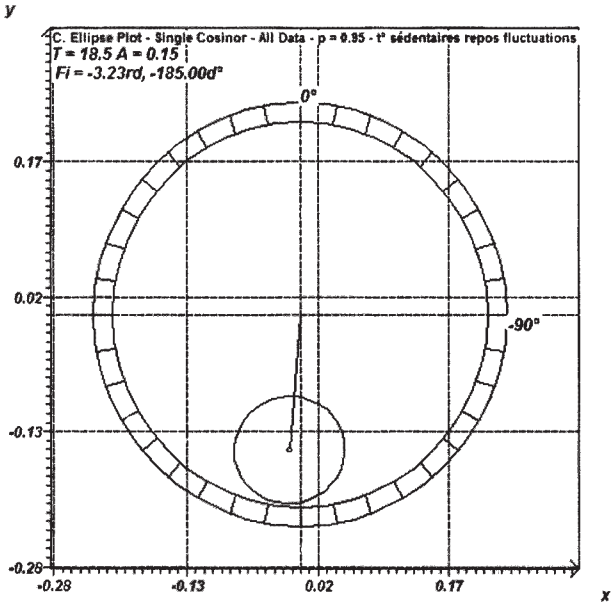


Figure 22. Ellipses de confiance suivant le Single Cosinor. Les sujets sédentaires pendant leur période de repos présentent une acrophase comprise entre 12h19' (–3,23 rd ou –185 d°) et 12h31' (–3,28 rd ou –188 d°) avec une amplitude variant de 0,15 °C à 0,16 °C pour une période du rythme de T° allant de 18,4 à 18,5 h (graphiques a et c). →

c)



d)

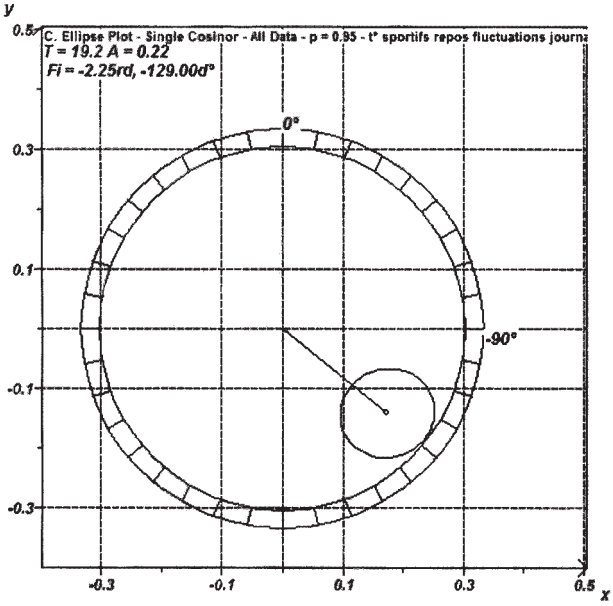


Figure 22 (*cont.*). Les sujets sportifs présentent une acrophase comprise entre 08h36' (–2,25 rd ou –129 d°) et 08h49' (–2,31 rd ou –132 d°) avec une amplitude variant entre 0.22 °C et 0,23 °C pour une période du rythme de T° de 19.2 h (graphiques b et d) pendant la période de repos. Le 1ère ligne correspond aux fluctuations individuelles, la 2ème ligne aux fluctuations journlières.

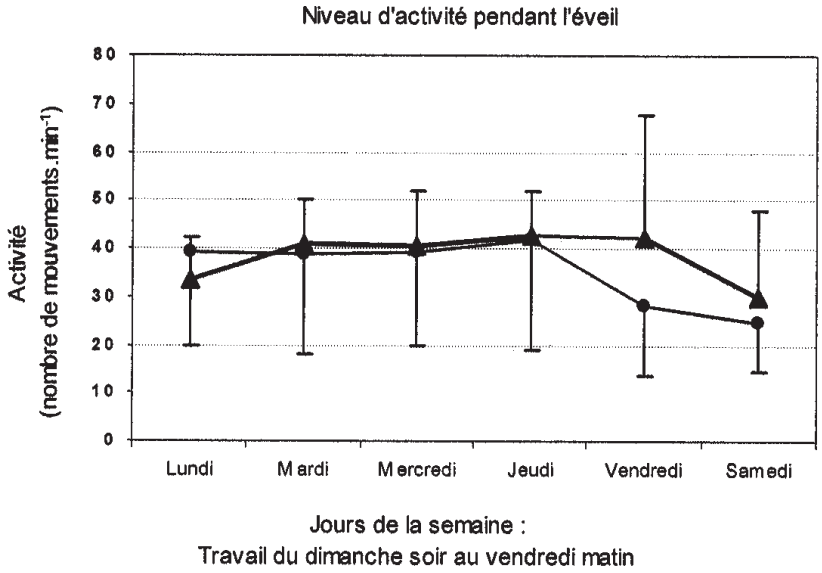


Figure 23. Evolution du niveau d'activité pendant la période d'éveil au cours de la semaine. Chaque ligne représente un groupe (▲ sujets sportifs, $n = 7$; ● sujets sédentaires, $n = 8$).

Tableau 10 Résultats de l'ANOVA avec un effet *Groupe* (effet 1) et effet *Jours de la semaine* (effet 2)

	Effet 1, Sportifs/Sédentaires		Effet 2, Jours de la semaine			
	dl Effet	MC Effet	dl Erreur	MC Erreur	F	*p*
Effet 1	1	221,74	7	944,89	0,235	0,643
Effet 2	5	442,57	35	133,33	3,32	0,015
Effet 1/2	5	170,48	35	114,76	1,48	0,220

Note: Le niveau d'activité global est le même pour les 2 groupes pendant la semaine en poste de nuit et pendant le week-end; il n'y a pas d'effet *Groupe* (effet 1). Cependant les 2 groupes sont moins actifs pendant le week-end que pendant la semaine de travail de nuit; il existe donc un effet *Jours* (effet 2).

D'autre part, l'index d'activité pendant la période d'éveil ne montre pas de différence quel que soit le jour de la semaine pour les deux groupes, $F(1, 7) = 0.39$; $p = 0.89$, mais une diminution d'index d'activité est cependant à noter le samedi (période de repos) par rapport aux autres jours de la semaine (période de travail), $F(5, 35) = 12.75$; $p = 0.00$, et ceci pour les deux groupes.

Activité pendant la période de sommeil. Concernant la période de repos au cours de la semaine, le niveau global d'activité pendant le sommeil est moins important pour le groupe des sportifs que pour le groupe des sédentaires, $F(1, 7) = 11.61$; $p = 0.011$. Cette différence est observée pour chaque jour de la semaine. Cependant, le niveau d'activité augmente de façon significative en comparaison des autres jours de la semaine lors de la période de sommeil du week-end, la nuit du vendredi au samedi, $F(6, 42) = 2.85$; $p = 0.02$ (figure 24 et tableau 11).

Concernant l'index d'activité pendant la période de sommeil, une différence entre les deux groupes, $F(1, 7) = 13.62$; $p = 0.008$, avec un niveau plus bas pour les sportifs que pour les sédentaires est remarquée. Cette différence entre les deux groupes est aussi observée quel que soit le jour de la semaine. Cependant l'index d'activité du sommeil est plus important pendant le sommeil du week-end que pendant le sommeil de la semaine de travail, $F(6, 42) = 4.027$; $p = 0.003$.

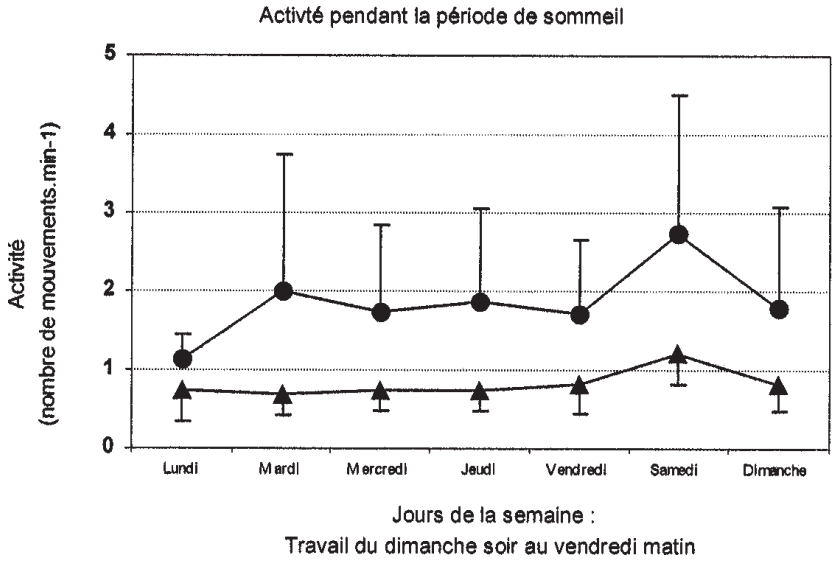


Figure 24. Evolution du niveau d'activité pendant la période de sommeil au cours de la semaine. Chaque ligne représente un groupe (▲ sujets sportifs, $n = 7$; ● sujets sédentaires, $n = 8$).

Tableau 11 Résultats de l'ANOVA avec l'effet *Groupe* (effet 1) et effet *Jours de la semaine* (effet 2)

	Effet 1, Sportifs/Sédentaires		Effet 2, Jours de la semaine			
	dl Effet	MC Effet	dl Erreur	MC Erreur	F	*p*
Effet 1	1	29,82	7	2,57	11,61	0,011
Effet 2	6	1,56	42	0,55	2,85	0,020
Effet 1/2	6	0,472	42	0,51	0,924	0,488

Note: Le niveau d'activité est moins important chez les sportifs que chez les sédentaires pendant la veille (c'est l'effet *Groupe*, ou effet 1). Cependant il existe un effet *Jours* (effet 2) qui montre qu'au cours de la semaine, quel que soit le groupe, une période de veille diffère des autres jours.

Activité pendant les 3 premières heures de sommeil. Le niveau global d'activité pendant les 3 premières heures de sommeil est plus petit chez les sportifs que chez les sédentaires, $F(1, 7) = 9.54$; $p = 0.017$. Cette diminution se retrouve pour tous les jours de la semaine (voir figure 25 et tableau 12).

Activité pendant les 3 dernières heures de sommeil. Comme l'activité pendant les 3 premières heures de sommeil, le reflet actimétrique de la qualité du sommeil pendant les 3 dernières heures de sommeil est différant d'un groupe à l'autre, $F(1, 7) = 9.545$; $p = 0.018$. Les sportifs ont un plus faible niveau d'activité (nuit moins agitée) et cette qualité ne varie pas pour nos deux groupes en fonction des jours de la semaine, $F(6, 42) = 2.214$; $p = 0.06$ (voir figure 26 et tableau 13).

Volume horaire de sommeil. La quantité de sommeil varie de la même façon pour nos deux groupes au cours de la semaine, $F(1, 7) = 3.845$; $p = 0.09$. Les sportifs ne dorment donc pas plus que les sédentaires (voir figure 27 et tableaux 14 et 15). Cependant, on s'aperçoit en complétant l'analyse par un post-hoc (PLSD de Fisher) que la quantité de sommeil augment chez les sportifs comme chez les sédentaires. On remarque que cette augmentation quantitative se situe pendant le week-end, $F(6, 42) = 10,104$; $p = 0.00$.

Discussion

LE RYTHME DE LA T°

Les résultats de cette étude comparative entre sujets sportifs entraînés et sédentaires ne montrent pas de différence significative dans les périodes des rythmes de la T° au cours de la semaine de postes de nuit entre nos groupes (23 h pour les sédentaires et de 22,2 à 22,6 h pour les sportifs). Reinberg et al. (1980, 1984b) soulignent que des périodes de rythme de T° inférieures ou proches de 24 h, indiquent une bonne adaptation au travail de nuit. Ce que l'on peut remarquer c'est que chez tous les sujets, sportifs et sédentaires, la période du rythme semble diminuer au cours des

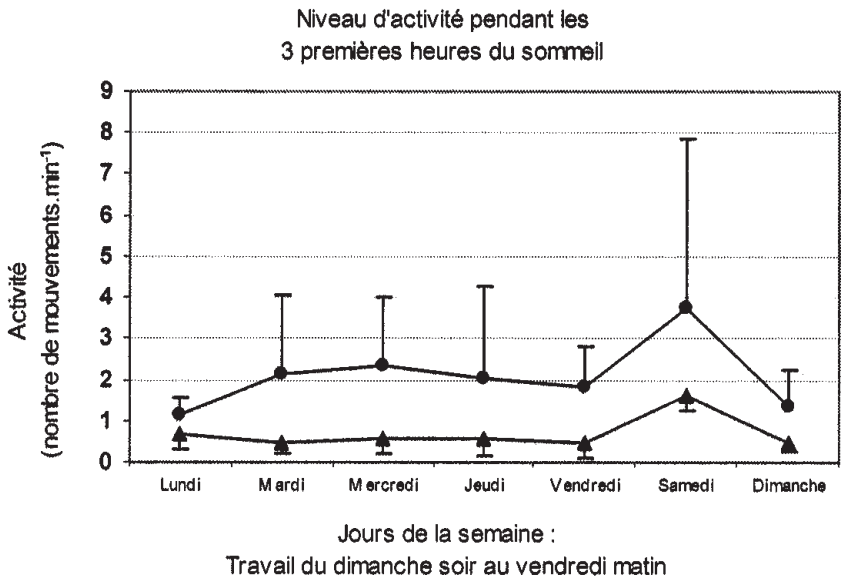


Figure 25. Evolution du niveau d'activité pendant les 3 premières heures de sommeil au cours de la semaine. Chaque ligne représente un groupe (▲ sujets sportifs, *n* = 7; ● sujets sédentaires, *n* = 8).

Tableau 12 Résultats de l'ANOVA avec effet *Groupe* (effet 1) et effet *Jours de la semaine* (effet 2)

	Effet 1, Sportifs/Sédentaires		Effet 2, Jours de la semaine			
	dl Effet	MC Effet	dl Erreur	MC Erreur	F	*p*
Effet 1	1	65,46	7	6,85	9,54	0,018
Effet 2	6	3,07	42	1,38	2,21	0,060
Effet 1/2	6	2,84	42	1,39	2,04	0,081

Note: Le niveau d'activité est moins important chez les sportifs que chez les sédentaires pendant les 3 premières heures du sommeil (c'est l'effet *Groupe*, ou effet 1). Cependant il n'existe pas d'effet *Jours* (effet 2).

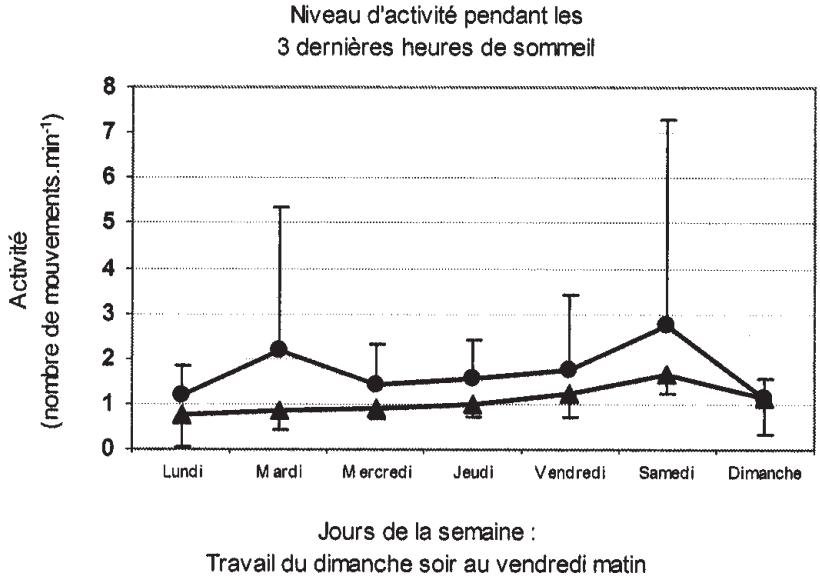


Figure 26. Evolution du niveau d'activité pendant les 3 dernières heures de sommeil au cours de la semaine. Chaque ligne représente un groupe (▲ sujets sportifs, n = 7; ● sujets sédentaires, n = 8).

Tableau 13 Résultats de l'ANOVA avec effet *Groupe* (effet 1) et effet *Jours de la semaine* (effet 2)

	Effet 1, Sportifs/Sédentaires		Effet 2, Jours de la semaine			
	dl Effet	MC Effet	dl Erreur	MC Erreur	F	*p*
Effet 1	1	65,47	7	6,86	9,54	0,018
Effet 2	6	3,072	42	1,39	2,21	0,060
Effet 1/2	6	2,84	42	1,39	2,04	0,081

Note: Le niveau d'activité est moins important chez les sportifs que chez les sédentaires pendant les 3 dernières heures du sommeil (l'effet *Groupe*, ou effet 1). Cependant il n'existe pas d'effet *Jours* (effet 2).

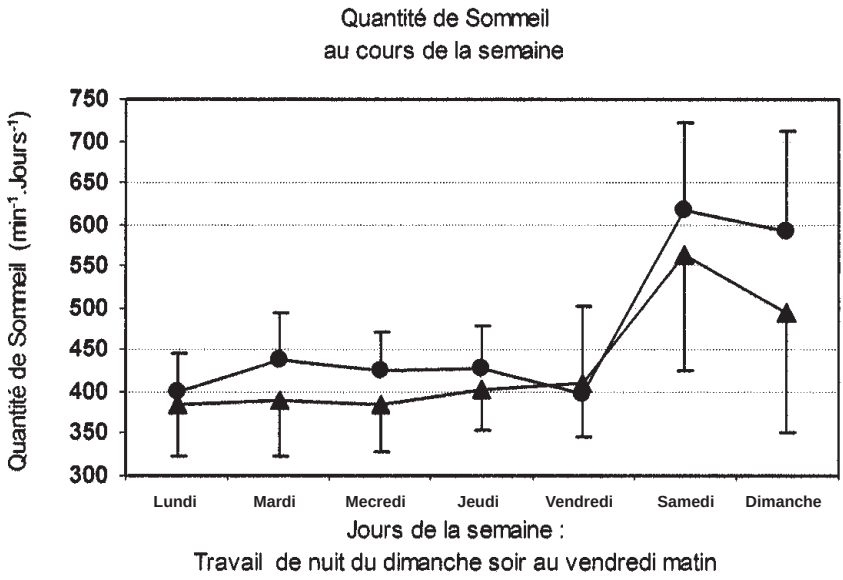


Figure 27. Evolution de la quantité de sommeil au cours de la semaine. Chaque ligne représente un groupe (▲ sujets sportifs, *n* = 7; ● sujets sédentaires, *n* = 8).

Tableau 14 Résultats de l'ANOVA avec effet *Groupe* (effet 1) et effet *Jours de la semaine* (effet 2)

	Effet 1, Sportifs/Sédentaires		Effet 2, Jours de la semaine			
	dl Effet	MC Effet	dl Erreur	MC Erreur	F	*p*
Effet 1	1	21257,58	7	14371,1	1,48	0,263
Effet 2	6	115358,48	42	6779,11	17,02	0,000
Effet 1/2	6	6390,89	42	3878,7	1,65	0,158

Note: La quantité de sommeil est identique pour les groupes sportifs et sédentaires quels que soient les jours de la semaine (il n'y a pas d'effet *Groupe*, ou effet 1). Cependant il existe un effet *Jours* (effet 2), qui montre une variation de la quantité de sommeil au cours de la semaine.

Tableau 15 L'analyse complémentaire post hoc (test PLSD de Fisher) sur l'effet *Jours de la semaine*

Comparaison inter groupes Sportifs / Sédentaires	Dimanche	Samedi	Vendredi	Jeudi	Mercredi	Mardi
Lundi	0,000	0,000	0,334	0,645	0,744	0,467
Mardi	0,000	0,000	0,809	0,788	0,687	
Mercredi	0,000	0,000	0,520	0,893		
Jeudi	0,000	0,000	0,611			
Vendredi	0,000	0,000				
Samedi	0,060					

Note: Ceci nous montre que la quantité de sommeil augmente pour les 2 groupes pendant la nuit du vendredi au samedi et la nuit du samedi au dimanche.

jours de repos, le week-end (voir tableau 9). Cette modification périodique de la T° est certainement due à un changement de repères environnementaux lors du retour à l'organisation de la vie sociale et familiale pendant le week-end.

Les résultats concernant l'amplitude du rythme de la T° (tableau 9) pour chacun des groupes, durant le travail de nuit et pendant la période de repos du week-end, nous montrent:

- Que l'amplitude de T° au cours de la semaine de travail de nuit est plus importante ($p < 0.00$, test de comparaison de moyennes) chez les sportifs (0,19 °C) que chez les sédentaires (0,07 °C),
- Que l'amplitude de T° au cours de la période de repos du week-end est plus importante ($p < 0.015$, test de comparaison de moyennes) chez les sportifs (0,22 °C) que chez les sédentaires (0,15 °C),
- Qu'il n'y a pas de différence remarquable ($p > 0.05$, test de comparaison de moyennes) sur l'amplitude de T° chez les sportifs entre les deux périodes étudiées (semaine de nuit vs. repos du week-end),
- Que l'amplitude de la T° augmente ($p < 0.00$**,** test de comparaison de moyennes) le week-end chez les sédentaires (0,15 °C) par rapport aux variations pendant la semaine en poste de nuit (0,07 °C).

Ces résultats semblent rejoindre les précédents travaux d'Atkinson et al. (1993), qui indiquent, que dans les mêmes conditions (avec cependant une technique d'analyse simplifiée), l'absence d'une fluctuation de la T° pour des sédentaires en poste de nuit, mais la persistance d'une fluctuation de T° chez des sportifs. Les amplitudes observées dans la présente étude sont effectivement diminuées, et ceci pour nos deux groupes. Pour les sportifs, on observe généralement des fluctuations de l'ordre de 0.5 °C en condition de synchronisation diurne du rythme de T° (Atkinson et Reilly, 1996). Les effets contradictoires du travail de nuit qui affectent

le rythme circadien de la T° (Atkinson et Reilly, 1996; Andlauer et al., 1979) semblent aussi, de façon plus minime, affecter la structure circadienne de T° même pour les sportifs.

Pour nos sujets sédentaires, le rythme circadien de la T° pendant la semaine de travail en poste de nuit présente une amplitude difficilement quantifiable. Cependant, le fait d'observer une différence entre l'amplitude de T° en poste de nuit et pendant la période de repos du week-end, peut s'expliquer par le fait que les sujets retrouvent une organisation sociale diurne et familiale. De ce fait, des synchroniseurs externes plus contrastés, peuvent permettre une modification de la structure du rythme et en augmenter son amplitude.

Dans notre partie méthodologie, nous avions précisé que les sujets sportifs ne devaient pas suivre leur programme d'entraînement physique pendant la semaine d'expérimentation. Le but était de nous affranchir autant que possible des effets masquant de l'activité sur le rythme de la T°. Sur ce point, le niveau global d'activité motrice pendant l'éveil ne montre pas de différence entre nos deux groupes et ceci quel que soit le jour de la semaine, $F(1, 7) = 0.234$; $p = 0.64$.

Avec les considérations précédentes, si le niveau d'activité n'est pas différent pour nos deux groupes, ce n'est donc pas l'activité physique en soit qui augmente l'amplitude de la T°. Des processus liés à l'entraînement agiraient sur la composante endogène et non dans ce cas comme effet masque (masking effect) sur la composante exogène (Waterhouse et al., 1996, 1999b).

Cette constatation souligne le caractère stable et persistant des rythmes biologiques chez les sportifs. En effet, plusieurs études montrent, dans des situations extrêmes comme des privations de sommeil, des désynchronisations ou des franchissements de fuseaux horaires, que les rythmes des sujets en grande condition physique était plus stables que ceux des sédentaires (Atkinson et al., 1993; Atkinson et Reilly, 1996; Meney et al., 1998).

Pour les sédentaires, la période du rythme de T° semble moins évidente. En effet, du fait d'une amplitude de T° relativement faible pendant la semaine en poste de nuit (0,05 °C à 0,07 °C), il semble difficile de définir une rythmicité circadienne de la T°. La contradiction et le manque de contraste des synchroniseurs externes en condition de travail de nuit affectent ce rythme biologique. Pendant la période de repos, le groupe sédentaire retrouve une amplitude de T° de 0,15 °C, ce qui se rapproche des amplitudes de T° généralement rapportées pour des sujets inactifs. Cependant, la période se réduit à 18,4 / 18,5 heures (18h24, 18h30, tableau 9) ce qui indique que l'acrophase de T° se resynchronise rapidement par une avance de phase sur l'activité sociale pendant cette période.

Cette faculté de synchronisation à de brusques changements de phase, est souvent associée à de petites amplitudes de T° (Reinberg et al., 1980). Les sportifs quant à eux, ne semblent pas subir d'importante variation dans la période de leur rythme de T°. Il serait possible que l'entraînement physique puisse augmenter la vitesse de synchronisation des rythmes circadiens après une nuit de travail ou de privation de sommeil (Reilly, 1990), en agissant comme synchroniseur externe influençant l'horloge interne. De plus, de hautes amplitudes montrent une grande stabilité du rythme circadien dans le cas du travail de nuit et de la privation de sommeil (Reinberg et Smolensky, 1983; Reinberg et al., 1983; 1984a; 1984b; 1988; Meney et al., 1998).

L'entraînement physique induit des adaptations physiologiques avec une augmentation des vaisseaux capillaires, donc du transport d'oxygène et une augmentation de sécrétion de sérotonine après une séance d'entraînement (Chaouloff, 1989). De plus, les différences entre la structure du rythme circadien (amplitude large et grande stabilité) seraient dues à l'adaptation de l'horloge interne et de mécanismes endogènes inconnus (Atkinson et al., 1993; Atkinson et Reilly, 1996).

Cependant, l'entraînement physique devrait être un synchroniseur significatif des rythmes circadiens et l'entraînement physique régulier pendant le jour aurait tendance à augmenter l'amplitude (Baehr et al., 1999; Beersma et Hiddinga, 1998). Nous remarquons aussi, que la période du rythme de T° observée chez les sportifs est inférieure à 24 heures et inférieure aussi à la période du rythme de la T° des sédentaires (tableau 9). Des travaux montrent que les travailleurs de nuit avec une période inférieure ou proche de 24 heures présentent une grande adaptation au travail de nuit (Reinberg et Smolensky, 1983; Reinberg et al., 1983). De plus, il est possible que l'activité physique ait des effets sur la période des rythmes circadiens (Redlin et Mrosovsky, 1997).

Chez les animaux, des études montrent que l'activité physique peut augmenter et entraîner le système de synchronisation des rythmes biologiques (Reebs et Mrosovsky, 1989; Reebs et al., 1989) et réduire la période du rythme (Edgar et al., 1991; Yamada et al., 1988). Il semble de plus que la période du rythme circadien varie avec l'augmentation du taux d'hormone lors de l'activité physique (Daan et al., 1975).

Les modifications des rythmes circadiens ont certainement un lien avec les caractéristiques du sommeil des sujets. Une corrélation possible existe entre le niveau de dépense énergétique et l'entraînement d'une part et d'autre part, avec l'amélioration de la structure des rythmes biologiques (amplitude élevée, stabilité, période proche de 24h). Van Someren et al. (1997) se sont particulièrement intéressés aux effets de l'exercice sur les rythmes circadiens. Ces travaux ont conduit à l'élaboration de trois théories. La première repose sur un modèle génétique qui postule que les caractéristiques des rythmes circadiens sont programmées. Ce modèle est cependant contesté par les données de l'expérimentation animale qui montrent que des rats entraînés ont des temps de réponse plus rapides que des rats non entraînés de la même lignée (Dustman et al., 1990).

Une autre hypothèse physiologique suggère que les effets bénéfiques de l'exercice sur le sommeil et les rythmes résultent d'une meilleure capacité de transport et d'utilisation de l'oxygène, facilitant un meilleur fonctionnement des systèmes de neurotransmission. La troisième théorie s'appuie sur les travaux de Horne (1981, 1992; Horne et Staff, 1983) et indique que l'augmentation de la T° corporelle et de ses corrélats physiologiques pendant l'activité physique sont responsables de l'amélioration de la qualité du sommeil. De plus, une augmentation de la T° corporelle par un bain chaud sans exercice physique ou un exercice physique seul, effectué dans l'après-midi, permet d'augmenter le sommeil lent profond au cours de la nuit suivante et donc d'améliorer le rythme activité-repos.

Ces derniers auteurs suggèrent que cette modification serait due à une libération d'un neuromédiateur (prostaglandine), de substances induisant entre autre le sommeil (interleukines) (Myers et al., 1992). Par ailleurs, le concept "use it or lose it" (Swaab, 1991) suppose que l'activation des cellules nerveuses soit nécessaire à l'entretien du fonctionnement du système. Cette activation repose sur des stimuli

hormonaux et environnementaux comme la lumière ou l'activité physique (Swaab, 1991). En fait, l'activité physique activerait le système nerveux central en améliorant les communications synaptiques et en augmentant l'amplitude du rythme circadien de la T° (Van Someren et al., 1998).

L'ACTIVITÉ ET QUALITÉ DU SOMMEIL

Une estimation actimétrique de la qualité du sommeil a pu être faite en se basant sur l'hypothèse selon laquelle celui-ci est d'autant plus mauvais qu'il est agité et fragmenté par des intervalles d'activité (Middelkoop et al., 1993; Aubert-Tulkens et al., 1987).

Pour estimer la qualité du sommeil, on utilise plusieurs variables comme celle de l'activité pendant le jour (période éveillée) et l'activité pendant la nuit (période non éveillée), l'index de l'activité de ces périodes, l'activité pendant les trois premières et pendant les trois dernières heures de la nuit, ainsi que la quantité de sommeil.

Le cycle veille / sommeil est certainement le rythme biologique humain le plus évident et sa régulation serait double: homéostasique et circadienne (Borbely, 1982). C'est pendant la première partie du sommeil que le sommeil lent profond (SLP) serait le plus important (Goldenberg, 1991). Cependant, le SLP est observé dans la dernière partie de la nuit et une mauvaise qualité de sommeil pendant la semaine de travail de nuit est généralement observée pendant le travail de nuit.

Nos résultats semblent indiquer que l'activité physique améliore la qualité du sommeil: l'activité pendant la période de sommeil ainsi que l'index d'activité, montrent des niveaux plus faibles pour les sportifs quel que soit le jour de la semaine. De plus, avec une étude plus précise, on s'aperçoit qu'il en est de même pour l'activité et l'index d'activité pendant les trois premières et les trois dernières heures de sommeil.

Toutefois, même si d'autres travaux montrent une corrélation entre l'actimétrie et l'EEG (Reid et Dawson, 1999; Middelkoop et al., 1993), la technique de l'actimétrie n'étudie pas la structure du sommeil. Il ne s'agit que du reflet de l'activité et non d'un EEG.

Pendant la semaine de travail de nuit, d'importantes différences sont observées entre les acrophases de T° pour nos deux groupes. Il semble en effet que l'acrophase de T° des sportifs soit plus tardive que celle des sédentaires. En effet, les sujets sédentaires présentent une acrophase de T° comprise entre 00h49 et 01h18 et les sujets sportifs présentent une acrophase de T° comprise entre 03h59 et 05h35. Notons cependant que dans les traitements actimétriques, aucune différence n'a été observé entre l'heure du coucher, $F(1, 7) = 2.59$; $p = 0.158$; l'heure de réveil, $F(1, 7) = 0.030$; $p = 0.897$; et sur la quantité de sommeil, $F(1, 7) = 3.84$; $p = 0.097$, pour nos deux groupes au cours de la semaine.

L'avance de l'acrophase de la T° orale chez les sujets sédentaires peut expliquer la mauvaise qualité de sommeil. En effet, il semble difficile de dormir sur une phase montante de la T°.

Un certain nombre de travaux sur l'entraînement physique et le sommeil doivent expliquer et confirmer ces résultats. L'amélioration du SLP est observée après un exercice physique intense chez les sujets sportifs et les sujets jeunes (Baekeland et Lasky, 1966; Buguet et al., 1980; Buguet et Lonsdorfer, 1987; Bunnell

et al., 1983; 1984; Griffin et Trinder, 1978; Horne et Staff, 1983; Maloletnev et al., 1977; Shapiro, 1978; Shapiro et al., 1981).

Les sujets sportifs ont une quantité de SLP par cycle de sommeil supérieure à celle des sujets inactifs (Goldenberg, 1991; Maloletnev, 1977; Montgomery et al., 1982; Shapiro, 1978; Shapiro et al., 1975; Zloty et al., 1973) et un délai d'endormissement plus court (Baekeland et Lasky, 1966; Buguet et al., 1980; Montgomery et al., 1982; Shapiro et al., 1975).

L'exercice physique pourrait être un important agent entraînant ou synchroniseur pour l'horloge interne et les variations circadiennes des fonctions biologiques (Baehr et al., 1999; Beersma et Hiddinga, 1998; Redlin et Mrosovsky, 1997). Ce phénomène a déjà été observé chez des hamsters, mais les effets sont-ils identiques pour l'homme?

Il semblerait que l'activité physique et sportive, associée avec d'autres "Zeitgebers," rende la structure des rythmes circadiens plus stable et affecterait le centre régulateur dans les noyaux suprachiasmatiques, via la voie géniculo-hypothalamic.

Remerciements

Nous remercions la direction PSA Peugeot Citroën Automobiles pour l'intérêt qu'elle a su porter à nos travaux. Nous remercions aussi le Docteur Raoult, médecin du travail, et Monsieur Belair, infirmier au sein du groupe PSA Peugeot Citroën Automobiles.

Nous remercions également l'Institut Régional de Médecine du Sport et l'ensemble de son équipe pour leur disponibilité. Nous remercions aussi Germaine Cornélissen, Professeur au Laboratoire de Chronobiologie de l'Université du Minnesota, pour sa lecture et ses conceils critiques.

Enfin, nous remercions infiniment les techniciens de PSA Peugeot Citroën Automobiles pour leur participation volontaire, enthousiaste et dynamique.

Références

Akerstedt, T., and Gillberg, M. (1980). Sleep disturbances and shift work. In: A. Reinberg, N. Vieux, and P. Andlauer, **Night and Shift Work. Biological and Social Aspects**, pp. 127-137. Oxford: Pergamon Press.

Akerstedt, T., and Gillberg, M. (1982). Displacement of the sleep period and sleep deprivation, implications for shift work. **Human Neurobiol.** 1: 163-171.

Andlauer, P., et Fourre, L. (1965). **Le travail en équipes alternantes. Revue française du travail**, pp. 35-50. Paris: Ministère du Travail.

Andlauer, P., Reinberg, A., Fourré, L., Battle, W., and Duverneuil, G. (1979). Amplitude of the oral temperature circadian rhythm and the tolerance to shift-work. **J. Physiol. (Paris)** 75: 507-512.

Aschoff, J., Gerecke, U., and Wever, R. (1967). Desynchronisation of human circadian rhythms. **Jpn. J. Physiol.** 17: 450-457.

Atkinson, G., Coldwells, A., and Reilly, T. (1993). A comparaison of circadian rhythms in work performance between physically active and inactive subjects. **Ergonomics** 36: 273-281.

Atkinson, G., and Reilly, T. (1996). Circadian variation in sports performance. **Sports Med.** 21: 292-312.

Aubert-Tulkens, G., Culée, K., Rijckevorsel, H.V., and Rodenstein, D.O. (1987). Ambulatory evaluation of sleep disturbance and therapeutic effects in sleep apnea syndrome by wrist activity monitoring. **Am. Rev. Respir. Dis.** 136: 851-856.

Baehr, E.K., Fogg, L.F., and Eastman, C.I. (1999). Intermittent bright light and exercise to entrain human circadian rhytms to night work. **Am. J. Physiol.** 277: R1598-R1604.

Baekeland, F., and Lasky, R. (1966). Exercise and sleep patterns in college athletes. **Percept. Mot. Skills** 23: 1203-1207.

Beersma, D., and Hiddinga, A. (1998). No impact of physical activity on the period of the circadian pacemaker in humans. **Chronobiol. Int.** 15: 49-57.

Benoit, O. (1988). Chronobiologie et troubles endogènes du rythme veille/sommeil. **Rev. Prat. (Paris)** 38: 1721-1724.

Benoit, O., et Foret, J. (1988). Régulation circadienne des états de veille et de sommeil. **Neurophysiol. Clin.** 18: 403-431.

Borbely, A.A. (1982). A two process model of sleep regulation. **Hum. Neurobiol.** 1: 195-204.

Box, G.E.P., and Jenkins, G. (1976). **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Brown, A., Smolensky, M., D'Alonzo, G., Redmond, D., Conrad, E., and Hsi, B. (1990). Circadian rhythm in human activity objectively quantified by actigraphy. **Prog. Clin. Biol. Res.** 341A: 77-83.

Buguet, A., et Lonsdorfer, J. (1987). Sommeil et exercice physique chez l'homme. **Sci. & Sports** 2: 193-202.

Buguet, A., Roussel, B., Angus, R., Sabiston, B., and Radomski, M. (1980). Human sleep and adrenal individual reactions to exercise. **Electroenphalogr. Clin. Neurophysiol.** 49: 515-523.

Bunnell, D., Bevier, W., and Horvath, S. (1983). Effects of exhaustive exercise on the sleep of men and women. **Psychophysiology** 23: 58-68.

Bunnell, D.E., Bevier, W.C., and Horvath, S.M. (1984). Sleep interruption and exercise. **Sleep** 7: 261-271.

Carpentier, J., et Cazamian, P. (1977). **Le travail de nuit. Effets sur la santé et la vie sociale du travailleur**. Genève: Bureau International du Travail.

Chambers, J., Cleveland, W., Kleiner, B., and Tukey, P. (1983). **Graphical Methods for Data Analysis**. London: Wadsworth.

Chaouloff, F. (1989). Physical exercise and brain monoamines: A review. **Acta Physiol. Scand.** 137: 1-13.

Colquhoun, W.P., Blake, M.J.F., and Edwards, R.S. (1968a). Experimental studies of shift-work II: Stabilized 8-hour shift systems. **Ergonomics** 12: 865-882.

Colquhoun, W.P., Blake, M.J.F., and Edwards, R.S. (1968b). Experimental studies of shift-work II: Stabilized 12-hour shift systems. **Ergonomics** 11: 527-546.

Cugini, P. (1993). Chronobiology: Principles and methods. Medical semeiology and methodology. **Annali Istituto Superiore Sanità** 29: 483-500.

Daan, S., Damassa, D., Pittendrigh, C.S., and Smith, E.R. (1975). An effect of castration and testosterone replacement on a circadian pacemaker in mice (Mus musculus). **Proc. Nat. Acad. Sci. USA** 72: 3744-3747.

Dawson, D., Encel, N., and Lushington, K. (1995). Shift work and sleep deprivation: Improving adaptation to simulated night shift: Timed exposure to bright light versus daytime melatonin administration. **Sleep** 18: 11-21.

DePrins, J. (1996). **Le Problématique Cosinor**. Société d'Edition de l'Association d'Enseignement Médical des Hôpitaux de Paris.

Dustman, R., Ruhling, R., Russell, M., Shearer, D., Bonekat, H., and Shigeoka, J. (1990). Age and fitness effects on EEG, ERPs, visual sensitivity and cognition. **Neurobiol. Aging** 11: 193-200.

Edgar, D.M., Kilduff, T.S., Martin, C.E., and Dement, W.C. (1991). Influence of running wheel activity on free-running sleep/wake and drinking circadian rhythms in mice. **Physiol. Behav.** 50: 373-378.

Folkard, S., Monk, T., and Lobban, M. (1978). Short and long term adjustment of circadian rhythms in permanent night nurses. **Ergonomics** 21: 785-799.

Foret, F. (1988). Horaires d'activité irréguliers, sommeil et santé. **La Revue du Praticien, Troubles du Sommeil** 24: 1716-1720.

Foret, J., Bensimon, G., Benoit, O., and Vieux, N. (1980). Quality of sleep as a function of age and shift work. In: A. Reinberg, N. Vieux, and P. Andlauer (Eds.), **Night and Shift Work: Biological and Social Aspects**, pp. 149-154. Oxford: Pergamon Press.

Frese, M., and Okonek, K. (1984). Reasons to leave shiftwork and psychological and psychosomatic complaints of former shiftworkers. **J. Appl. Psychol.** 69: 509-514.

Gaudeau, C., et Gouthière, L. (1992). Méthodologie d'analyse des rythmes dans les systèmes non linéaires. In: **Les Rythmes: Lectures et Théories, Centre Culturel International de Cerisy, "Conversciences**," pp. 31-56. Paris: L'Harmattan.

Goldenberg, F. (1991). Sleep in normal aging. **Neurophysiol. Clin.** 21: 267-279.

Gouthière, L. (2003). Laboratoire de BioStatistiques Appliquées, Expert Soft Tech. Le chemin de la Birotte, F-37320 Esvres / Indre France. http://www. euroestech.net

Granger, C., and Hatanaka, M. (1964). **Spectral Analysis of Economic Time Series**. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Griffin, S.J., and Trinder, J. (1978). Physical fitness, exercise, and human sleep. **Psychophysiology** 15: 447-450.

Helen, S., and Taylor, S. (1996). Sleep disturbances and exercise. **Sports Med.** 21: 1-6.

Horne, J.A. (1981). The effects of exercise upon sleep: A critical review. **Biol. Psychol.** 12: 241-290.

Horne, J.A. (1992). Human slow wave sleep: A review and appraisal of recent findings, with implications for sleep functions, and psychiatric illness. **Experientia** 48: 941-954.

Horne, J.A., and Östberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. **Int. J. Chronobiology** 4: 97-110.

Horne, J.A., and Staff, L. (1983). Exercise and sleep: Body-heating effects. **Sleep** 6: 36-46.

Ilmarinen, J., Ilmarinen, R., Korhonen, O., and Nurminen, M. (1980). Circadian variation of physiological functions and their relation to oral temperature. In: A. Reinberg, N. Vieux, and P. Andlauer (Eds.), **Night and Shift Work. Biological and Social Aspects,** pp. 112-126. Oxford: Pergamon Press.

Jenkins, G., and Watts. (1986). **Spectral Analysis and its Applications**. Emerson-Adams Press.

Knauth, P., Rutenfranz, J., Herrmann, G., and Poppel, S.J. (1978). Re-entrainment of body temperature in experimental shift work studies. **Ergonomics** 21: 775-783.

Lamb, K., and Brodie, D. (1991). Leisure time physical activity as an estimate of physical fitness: A validation study. **J. Clin. Epidemiol.** 44: 41-52.

Lille, F., et Andlauer, P. (1981). Rythmes circadiens, sommeil, veille et travail. In: J. Scherrer, P. Andlauer, P. Berthoz, et al., **Précis de Physiologie du Travail, Notion d'Ergonomie** (2ème ed.), pp. 485-504. Paris: Editions Masson.

Maloletnev, V.I., Teliia, Z.A., and Chachanaschvili, M.G. (1977). [Changes in sleep structure of persons following intensive muscular work]. **Fiziol Zh SSSR Im I M Sechenova** 63: 11-20.

Meney, I., Waterhouse, J., Atkinson, G., Reilly, T., and Davenne, D. (1998). The effect of one

night's sleep deprivation on temperature, mood, and physical performance in subjects with different amounts of habitual physical activity. **Chronobiol. Int.** 15: 349-363.

Middelkoop, H., Van Hilten, B., Kramer, C., and Kamphuisen, H. (1993). Actigraphically recorded motor activity and immobility across sleep cycles and stages in healthy male subjects. **J. Sleep Res.** 2: 28-33.

Montgomery, I., Trinder, J., and Paxton, S.J. (1982). Energy expenditure and total sleep time: Effect of physical exercise. **Sleep** 5: 159-168.

Moog, R., and Hildebrandt, G. (1989). Adaptation to shift work – Experimental approaches with reduced masking effects. **Chronobiol. Int.** 6: 65-75.

Mormont, M., DePrins J., et Lévi, F. (1996). Etude des rythmes circadiens d'activité par actométrie: Résultats préliminaires chez 30 patients atteints de cancer colorectal métastasé. **Pathol. Biol.** 44: 165-171.

Motohashi, Y. (1990). Desynchronisation of oral temperature and grip strengths: Circadian rhythms in healthy subjects with irregular sleep-wake behavior. **Prog. Clin. Biol. Res.** 341B: 57-63.

Motohashi, Y. (1991). Alteration of circadian rhythm in shift-working ambulance personnel. **Jpn J. Psychiatry Neurol.** 45: 147-148.

Motohashi, Y. (1992). Alteration of circadian rhythm in shift-working ambulance personnel. Monitoring of salivary cortisol rhythm. **Ergonomics** 35: 1331-1340.

Myers, B., Murphy, P., and Badia, P. (1992). Role of the melatonin in thermoregulation and sleep. **Sleep Res.** 21(2): 21-31.

Ottmann, W., Karvonen, M.J., Schmidt, K.H., Knauth, P., and Rutenfranz, J. (1989). Subjective health status of day and shift working policemen. **Ergonomics** 32: 847-854.

Redlin, U., and Mrosovsky, N. (1997). Exercise and human circadian rhythms: What we know and what we need to know. **Chronobiol. Int.** 14: 221-229.

Reebs, S.G., Lavery, R.J., and Mrosovsky, N. (1989). Running activity mediates the phase-advancing effects of dark pulses on hamster circadian rhythms. **J. Comp. Physiol. [A]** 165: 811-818.

Reebs, S.G., and Mrosovsky, N. (1989). Large phase-shifts of circadian rhythms caused by induced running in a re-entrainement paradigm: The role of pulse duration and light. **J. Comp. Physiol. [A]** 165: 819-825.

Reid, K., and Dawson, D. (1999). Correlation between wrist activity monitor and electrophysiological measures of sleep in a simulated shiftwork environment for younger and older subjects. **Sleep** 22: 378-85.

Reilly, T. (1990). Human circadian rhythms and exercise. **Biomedical Engineering** 18: 165-180.

Reilly, T., Atkinson, G., and Waterhouse, J. (1997). **Biological Rhythms and Exercise**. Oxford: Oxford University Press.

Reilly, T., and Brooks, G.A. (1986). Exercise and the circadian variation in body temperature measures. **Int. J. Sports Med.** 7: 358-362.

Reinberg, A., Andlauer, P., Bourdeleau, P., Lévi, F., et Bicakova-Rocher, A. (1984a). Rythme circadien de la force des mains droites et gauches: Désynchronisation chez certains travailleurs postés. **C.R. Acad. Sc. Paris** 299: 634-636.

Reinberg, A., Andlauer, P., DePrins, J., Malbecq, W., Vieux, N., and Bourdeleau, P. (1984b). Desynchronisation of the oral temperature circadian rhythm and tolerance to shift work. **Nature** 308: 272-274.

Reinberg, A., Andlauer, P., Guillet, P., Nicolai, A., Vieux, N., and Laporte, A. (1980). Oral temperature, circadian rhythm amplitude, ageing and tolerance to shift-work. **Ergonomics** 23: 55-64.

Reinberg, A., Andlauer, P., Teinturier, P., DePrins, J., Malbecq, W., et Dupont, J. (1983). Désynchronisation du rythme circadien de la T° orale chez des hommes jeunes tolérant mal le travail de nuit. **C.R. Acad. Sc. Paris 296** (Série III): 267-270.

Reinberg, A., Motohashi, Y., Bourdeleau, P., Andlauer, P., Lévi, F., and Bicakova-Rocher, A. (1988). Alteration of period and amplitude of circadian rhythms in shift workers (with special reference to temperature, right and left hand grip strength). **Eur. J. Appl. Physiol.** 57: 15-25.

Reinberg, A., and Smolensky, M. (1983). Chronobiology and thermoregulation. **Pharmacol. Ther.** 22: 425-464.

Scargle, J.D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. II – Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. **Astrophysical Journal** 263: 835-853.

Shapiro, C.M. (1978). Sleepiness of the long-distance runner. **J. Physiol. (Lond).** 276: 50P-51P.

Shapiro, C.M., Bortz, R., Mitchell, D., Bartel, P., and Jooste, P.L. (1981). Slow-wave sleep: A recovery period after exercise. **Science** 214: 1253-1254.

Shapiro, C.M., Griesel, R.D., Bartel, P.R., and Jooste, P.L. (1975). Sleep patterns after graded exercise. **J. Appl. Physiol.** 39: 187-190.

Swaab, D. (1991). Brain aging and Alzheimer's disease, "wear and tear" versus "use it or lose it." **Neurobiol. Aging** 12: 317-324.

Van Cauter, E., and Huyberechts, S. (1973). Problems in the statistical analysis of biological times series: The Cosinor Test and the periodigram. **J. Interdisciplinary Cycle Research** 12: 41-57.

Van Someren, E.J., Lijzenga, C., Mirmiran, M., and Swaab D. (1997). Long-term fitness training improves the circadian rest-activity rhythm in healthy elderly males. **J. Biol. Rhythms** 12: 146-156.

Van Someren, E., Scherder, E., and Swaab, D. (1998). Transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) improves circadian rhythm disturbances in Alzheimer disease. **Alzheimer Dis. Assoc. Disord.** 12: 114-118.

Waterhouse, J., Edwards, B., Mugarza, J., Flemming, R., Minors, D., Calbraith, D., Williams, G., Atkinson, G., and Reilly, T. (1999a). Purification of masked temperature data from humans: Some preliminary observation of use of an activity diary, wrist actimetry, and heart rate monitoring. **Chronobiol. Int.** 16: 461-475.

Waterhouse, J., Minors, D., Akerstedt, T., Hume, K., and Kerkhof, G. (1996). Circadian rhythm adjustement: Difficulties in assessment caused by masking. **Pathol. Biol.** 44: 205-207.

Waterhouse, J., Weinert, D., Minors, D., Atkinson, G., Reilly, T., Folkard, S., Owens, D., MacDonald, I., Sytnik, N., and Tucker, P. (1999b). The effect of activity on the waking temperature rhythm in humans. **Chronobiol. Int.** 16: 343-357.

Weibel, L., Follènuis, M., et Brandenberger, G. (1999). Les rythmes biologiques: Leur altération chez les travailleurs de nuit. **La Presse Médicale** 5: 252-258.

Yamada, N., Shimoda, K., Ohi, K., Takahashi, S., and Takahashi, K. (1988). Free-access to a running wheel shortens the period of free-running rhythms in blinded rats. **Physiol. Behav.** 42: 87-91.

Zloty, R.B., Burdick, J.A., and Adamson, J.D. (1973). Sleep of distance runners. **Act. Nerv. Super. (Praha)** 15: 217-221.

Received February 25, 2003; accepted in final form May 18, 2003.

Figure Annexe

Exemple des tests effectués sur le modèle de T° de période 22,6 heures chez le groupe de sujets sportifs (fluctuations individuelles – extrait des résultats)

Results for all data

Solution model: 9.28E – 02 Cos(2π t/22.60) + 1.62E – 01 Sin(2π t/22.60) + 3.62E + 01

Initial model: 1.86E – 01 Cos[(2π t/22.60) – 1.05E + 00] + 3.62E + 01

Model (ANOVA) is valid at probability level 0.9500

Chronobiometric values

Amplitude	1.86E – 01
Amplitude standard error	1.90E – 02
CI of amplitude	[1.45E – 01; 2.28E – 01]
Disphasing–Chronobiometric acrophase (radians)	–1.05E + 00
Disphasing standard error	1.20E – 01
CI of disphasing	[–1.27E + 00; –8.32E – 01]
Disphasing–Chronobiometric acrophase (degrees)	–6.01E + 01
Disphasing standard error	6.87E + 00
CI of disphasing	[–7.26E + 01; –4.77E + 01]
Shifting–Chronobiometric MESOR	3.62E + 01
Shifting standard error	1.50E – 02
CI of shifting	[3.62E + 01; 3.63E + 01]

Chronobiometric parameters

Percent rhythm	11.37%
Percent error	88.63%
p-value for H0 (amplitude = 0)	0.0000

Chronobiometric test

Ellipse Test (H0: $\beta = 0$ and $\gamma = 0$) for T = 2.2600000E + 01 is significant at probability level 0.9500

Area of the confidence ellipse: 8.02E – 03

Residuals distribution–Goodness of fit

Ajusted r^2	1.00E + 00

k^2 Test (H0: Normal residuals distribution) is significant at probability level 0.9500

K-S Test (H0: Normal residuals distribution) is significant at probability level 0.9500

Average Test (H0: RS average = 0) is *not* significant at probability level 0.9500

Q Test (H0: Independent residues) is significant at probability level 0.9500

K-S Test is the Kolmogorov and Smirnov Test

Average Test (H0: RS average = 0) is a test of average on the average sum of residues

Q Test is the Ljung-Box Q-statistic lack-of-fit hypothesis test