

Rythme circadien, âge et mémoire de travail

Quelle est l'influence de la température corporelle sur le registre visuo-spatial, selon les âges ?

Marine Dourte

Matricule : 000453121

Mémoire réalisé sous la direction de Monsieur Philippe Peigneux et Madame Christina Schmidt,
en vue de l'obtention du diplôme en Sciences Psychologiques à finalité
Neuropsychologie et Développement Cognitif.

Année académique 2020-2021



Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire Pr Philippe Peigneux et ma co-promotrice Dr Christina Schmidt pour leur patience, disponibilité et surtout leurs judicieux conseils. Ils m'ont encouragée à donner le meilleur de ma personne pour ce travail, et tous les projets associés de près ou de loin.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Mme Mathilde Reyt, qui m'a beaucoup épaulée dans la découverte du monde de la recherche. Elle a partagé ses connaissances et expériences dans ce milieu, tout en m'accordant sa confiance et une aide précieuse dans la réalisation des étapes clés de mon mémoire et de mon stage de Master 2.

Mr Grégory Hammad, pour m'avoir accordé du temps dans la mise en place d'un outil précieux dans le nettoyage des données utiles à ce mémoire, pour sa patience et clarté lors de nos entretiens, et pour sa disponibilité.

Mesdames Mélanie Robe, Nastazya Schampaert et Lise Delvosal pour avoir relu et corrigé mon mémoire. Leurs conseils et soutien inconditionnel ont été très précieux dans l'aboutissement de ce travail.

Mes parents, ma famille et mes amis, pour leur soutien constant et leurs encouragements sans lesquels mes études auraient été difficiles.

Préface

Le rythme circadien est un processus endogène cyclique de 24h, présent chez tous les organismes vivants. Son impact sur la physiologie et biologie humaines a largement été investigué, tout comme son influence sur la cognition. Il est dès lors démontré que les fonctions cognitives suivent la courbe circadienne, cette dernière étant reflétée par des variations de température sur un cycle de 24h. Une augmentation de température corporelle tend à stabiliser voire améliorer les performances en fin de journée, contre-carrant la fatigue accumulée au cours de l'éveil. L'objectif de ce mémoire est d'évaluer l'effet du rythme circadien de la température corporelle sur les performances en mémoire de travail visuo-spatiale et les processus attentionnels. Au-delà de ce premier objectif, nous tenterons également de rendre compte de l'influence du vieillissement sur cette relation, en comparant des participants âgés à des sujets jeunes. Contrairement à ce que nous avons prédit, les performances tant à la tâche mesurant le calepin visuo-spatial qu'à la tâche d'attention ne semblent pas influencées, dans leur globalité, par la modulation circadienne de la température. Seules des indices sont partiellement corrélés à la modification de température (capacité de localisation dans l'espace en mémoire de travail). Aussi, des différences entre participants jeunes et âgés ont pu être remarquées mais ne peuvent faire office que d'illustration, dû au trop faible échantillon du groupe âgé.

Mots clés : rythme circadien – pression homéostatique – sommeil – mémoire de travail visuo-spatiale – vieillissement – chronotype – processus attentionnels

Table des matières

1	Introduction	1
2	Rythme circadien	2
2.1	Définition du rythme circadien et de son fonctionnement chez l'Humain.....	2
2.1.1	Base neuronale et marqueurs biologiques du rythme circadien.....	4
2.1.2	Rythme circadien de la température corporelle	5
2.1.3	Zeitgebers et leur influence.....	7
2.2	Chronotype.....	7
2.3	Influence de l'âge sur le rythme circadien.....	8
3	Effet du rythme circadien sur la cognition	10
3.1	Fonctions attentionnelles	12
3.2	Fonctions exécutives	14
3.3	Mémoire de travail	14
4	Hypothèses de recherche	16
5	Méthodologie	19
5.1	Echantillon	19
5.2	Outils de mesure.....	20
5.2.1	Mesure de la température corporelle	20
5.2.2	Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ)	21
5.2.3	Index de Qualité du Sommeil de Pittsburgh (PSQI)	22
5.2.4	Tâche de Pertzov	22
5.2.5	Test d2 de Brinkenkamp & Zillmer (1998)	23
5.3	Procédure expérimentale	24
5.4	Analyses statistiques.....	25
6	Résultats	27
6.1	Température	27
6.2	d2.....	28

6.3	Pertsov	31
6.3.1	Identification.....	31
6.3.2	Localisation.....	32
6.3.3	Swap Error	33
6.3.4	Lien avec la température.....	33
7	Discussion.....	35
7.1	Rappel des objectifs de l'étude et de l'hypothèse	35
7.2	Interprétation des résultats	36
7.2.1	Température	36
7.2.2	Tâche d2	37
7.2.3	Tâche de Pertsov	38
7.2.4	Lien entre performances aux tâches cognitives et température	39
7.3	Limites de l'étude et critiques de la méthode	40
7.4	Perspectives futures.....	41
8	Conclusion.....	42
9	Bibliographie.....	43
10	Annexes	51
10.1	Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ).....	51
10.2	PSQI.....	54
10.3	Tableau des données brutes.....	55
10.3.1	Tableau des performances aux tâches cognitives	55
10.3.2	Tableau des températures	58

1 Introduction

L'étude de la chronobiologie est ancienne, mais a connu un essor considérable durant le XXème siècle. Les pionniers de cette approche sont Kleitman & Richardson, qui ont établi l'expérience de la caverne de Mammoth aux USA, en 1938. Ces chercheurs ont mis en évidence l'existence d'un rythme endogène de 24h, indépendant de tout signal externe. Par ailleurs, Aschoff a également démontré qu'en dehors de la vie quotidienne socialement rythmée, le corps continue à suivre son propre rythme en ordonnant la veille et le sommeil (Schmidt, 2019).

En le même temps, la neuropsychologie prenait de l'ampleur. Dès lors, à partir des années 50, la communauté scientifique s'est intéressée à l'impact des rythmes biologiques sur la cognition. Kleitman affirmait déjà en 1963 que les performances cognitives oscillaient selon le rythme circadien, ce dernier étant traduit par la température corporelle. Alors que Borbély (1982) montrait quant à lui que la performance cognitive était fonction de l'interaction entre le rythme circadien et le processus homéostatique ; Aschoff (1987) mettait la lumière sur l'influence du moment de la journée sur la perception du temps à court terme (Valdez, Ramírez & Garcia, 2012). Il s'ensuivit un courant de recherche à part entière, investiguant l'influence du rythme circadien sur une grande variété de performances quotidiennes. Les connaissances tirées de ce courant scientifique ont permis des retombées bénéfiques telles que la luminothérapie, ou encore l'adaptation de l'horaire de médication (Lévi, Van Someren, cités par Schmidt, 2019).

Beaucoup d'inconnues demeurent, y compris l'impact spécifique du rythme circadien sur plusieurs fonctions cognitives. Des consensus ne sont pas toujours trouvés à ce niveau, par exemple en ce qui concerne la mémoire de travail. Cela n'empêche que des auteurs stipulent que la prise en compte du moment de la journée et des préférences d'horaire de l'individu est importante lors de l'évaluation des fonctions cognitives (Schmidt, Peigneux & Cajochen, 2012). L'interaction entre le rythme circadien et le vieillissement n'est pas non plus entièrement éclaircie. L'idée selon laquelle l'âge apporte des difficultés cognitives et de santé de plus en plus importantes tend à être réfutée ces dernières années, et à être nuancée selon des facteurs confondants tels que le mode de vie, la médication, etc. (Gaggioni, Maquet, Schmidt, Dijk & Vandewalle, 2014).

Dans ce travail, nous allons nous concentrer sur l'influence du rythme circadien sur le registre visuo-spatial, une sous-composante de la mémoire de travail. Au-delà de ceci, nous chercherons à comparer cette influence entre des personnes âgées saines et jeunes.

2 Rythme circadien

2.1 Définition du rythme circadien et de son fonctionnement chez l'Humain

Le rythme circadien est un rythme biologique endogène présent chez tous les organismes vivants. En l'absence de signaux externes, il a une période avoisinant les vingt-quatre heures (Reichert et al., 2017 ; Valdez, 2019 ; Valdez et al., 2012). Sa caractéristique principale est la synchronisation entre, d'une part, le cycle d'activité et les processus physiologiques, et, d'autre part, l'environnement (Moore, cité par Gaggioni et al., 2014).

Le rythme circadien agit comme une barrière, confinant le sommeil et l'éveil à des parts distinctes du cycle veille-sommeil (Heyde, Kiehn & Oster, 2018). Il contribue au maintien de l'éveil, ainsi qu'au bon fonctionnement neurocomportemental et cognitif au cours de la journée biologique (Dijk & von Schantz, 2005). Le signal circadien favorise graduellement l'éveil tout au long de la journée afin de contrecarrer l'accumulation de fatigue. Dans des conditions normales, il atteint son niveau le plus élevé entre 20h et 22h, permettant des performances cognitives stables malgré le besoin accru de sommeil, il s'agit de la « zone de maintenance de l'éveil » (Dijk & Czeisler, cités par Gaggioni et al., 2014 ; Schmidt, 2019 ; Schmidt & Collette, 2016 ; Valdez et al., 2012).

Le rythme circadien régule aussi partiellement le sommeil, en ce qui concerne l'évolution de ses différents stades et de son architecture. Lors de la nuit biologique, ce rythme favorise le sommeil, et ce de plus en plus fortement au fur et à mesure que le besoin de repos disparaît. Le signal circadien augmente au cours de l'endormissement pour empêcher l'individu de se réveiller bien que sa fatigue se soit dissipée. En effet, à ce moment, il agit de façon à permettre un sommeil consolidé d'environ 8h. Son rôle est particulièrement important en fin de nuit, car il influence la régulation du sommeil paradoxal et des fuseaux de sommeil, deux caractéristiques essentielles à la consolidation d'informations en mémoire à long terme (Heyde et al., 2018).

Le rythme circadien contrôle par ailleurs le cycle veille-sommeil en concomitance avec le processus homéostatique du sommeil (cf. Figure 1 ci-contre). Ce dernier représente l'accumulation de pression de sommeil lorsque le temps passé éveillé augmente, ainsi que sa dissipation avec le temps passé endormi (Gaggioni et al., 2014 ; Schmidt & Collette, 2016 ; Schmidt, Peigneux, Cajochen & Collette, 2012). L'interaction de ces deux processus physiologiques entre eux n'est pas linéaire : les

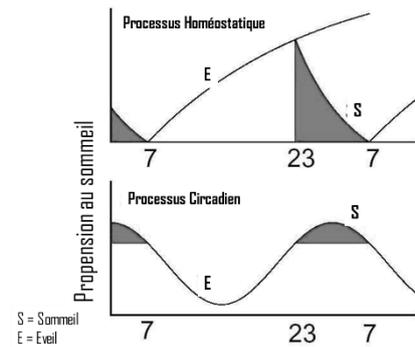


Figure 1. Modifiée de Borbély et al. (1982), représentant le modèle à deux processus du cycle veille-sommeil.

performances cognitives et cérébrales varient davantage lorsque l'éveil est allongé au-delà de 16h ou dans la nuit biologique, le rythme circadien n'étant plus assez fort pour s'opposer efficacement aux effets délétères du manque de sommeil (Dijk, Duffy & Czeisler, 1992). De manière générale, le rythme circadien et la pression homéostatique s'influencent mutuellement et partagent des paramètres similaires (Heyde et al., 2018). De nombreuses études ont utilisé les méthodes de désynchronisation forcée ou de routine constante pour mettre en évidence l'interaction entre le rythme circadien et les processus homéostatiques, mais également leurs apports singuliers au cycle veille-sommeil. La première technique implique que les participants adhèrent à un rythme d'éveil et de sommeil en inadéquation avec leur rythme circadien, comme par exemple un cycle de 28h ou supérieur. Dans ce cas, le rythme circadien endogène ne parvient plus à se synchroniser au cycle de veille-sommeil et commence à fonctionner en libre cours, ce qui mène à une désynchronisation entre cycle de veille-sommeil et rythme circadien. La routine constante quant à elle impose aux participants de rester éveillés, alors que sont maintenus stables tous les facteurs pouvant influencer ou masquer leur rythme circadien, c'est-à-dire l'apport nutritionnel, la luminosité, la température ambiante et leur niveau d'activité (Valdez et al., 2012).

Enfin, le cycle veille-sommeil est corrélé avec les phases circadiennes de la température corporelle et de la mélatonine, mais aussi avec des signaux extérieurs tels que la lumière ou l'activité. L'endormissement est initié par l'interaction entre une augmentation de mélatonine dans le sang, une perte d'activité, une baisse de luminosité et la diminution de la température corporelle basale – mais une augmentation de la température distale. Ce cycle est donc multifactoriel et peut, à son tour, avoir un effet direct sur le rythme circadien et le sommeil (Weinert & Waterhouse, 2007). Des différences interindividuelles peuvent être observées dans

le fonctionnement de ce cycle, et plus particulièrement au niveau de la gestion de la privation de sommeil et de la résistance cognitive à la fatigue (Schmidt & Collette, 2016).

2.1.1 Base neuronale et marqueurs biologiques du rythme circadien

Le locus anatomique du rythme circadien se situe dans les noyaux suprachiasmatiques de l'hypothalamus antérieur (ci-après « NSC »). Ces noyaux sont composés de cellules rythmiques qui interagissent afin de produire un signal circadien général et cohérent tant au niveau tissulaire que comportemental. Ainsi, les noyaux suprachiasmatiques influencent le comportement locomoteur et physiologique des mammifères (Gaggioni et al., 2014 ; Kyriacou & Hastings, 2010 ; Refinetti & Menaker, 1992 ; Reichert et al., 2017 ; Rosenwasser & Turek, 2015 ; Santhi, Lazar, McCabe, Lo, Groeger & Dijk, 2016 ; Schmidt, Peigneux & Cajochen, 2015 ; Valdez, 2019).

Les organes et différentes régions cérébrales possèdent quant à eux leur propre rythme local. 10 à 20% du génome des tissus et organes humains s'expriment de manière rythmique, créant un réseau autonome de boucles de rétroactions. Les NSC ont donc pour rôle de les synchroniser entre eux, mais également avec le cycle solaire (Gaggioni et al., 2014 ; Heyde et al., 2018 ; Kyriacou et Hastings, 2010 ; Rosenwasser & Turek, 2015 ; Schmidt, 2019).

Au cours du cycle veille-sommeil, le réseau cérébral requis reste le même, mais l'activation de ses divers composants varie. L'activité cérébrale diurne se marque principalement dans les régions frontales, tandis que le système limbique est le plus actif durant la nuit biologique (Muto et al., 2016). L'interaction du rythme circadien avec la pression homéostatique de sommeil module l'excitabilité corticale, ce qui a un impact sur les fonctions cérébrales de base et cognitives (Ly et al., 2019). Les diverses zones du cerveau sont donc mobilisées par l'horloge circadienne afin d'induire l'éveil ou le sommeil. Les profils d'activation requis pour ces deux états sont cependant fortement différents : le tronc cérébral et l'hypothalamus induisent l'éveil ; a contrario, le noyau pré-optique ventrolatéral favorise le sommeil. Chacun de ces systèmes inhibe l'autre selon les besoins physiologiques de l'individu et le fait basculer brusquement d'un état à l'autre. Les NSC coordonnent ces différents changements d'activation, puisque ceux-ci projettent directement dans l'hypothalamus, et indirectement dans le noyau pré-optique ventrolatéral et le tronc cérébral (Heyde et al., 2018 ; Kyriacou & Hastings, 2010 ; Schmidt, Peigneux & Cajochen, 2012).

Au niveau biologique, le rythme circadien se manifeste par l'influence de deux hormones : la mélatonine et le cortisol. Ces deux marqueurs endocriniens sont fortement manipulés par le système circadien et l'activité des NSC. La mélatonine, sécrétée par l'épiphyse, est impliquée dans le contrôle de la température corporelle, la promotion du sommeil et la synchronisation des horloges périphériques chez l'humain. Sa sécrétion débute vers la fin de la zone de maintenance de l'éveil, c'est-à-dire après 12 à 14h suivant le réveil et donc en début de nuit. Elle augmente ensuite jusqu'à environ 3h du matin, avant que la température corporelle n'atteigne son minimum (Gaggioni et al., 2014 ; Heyde et al., 2018 ; Refinetti & Menaker, 1992 ; Schmidt, 2019 ; Sloten & Krekling, 1996). À l'inverse, l'augmentation du taux de cortisol est associée à la fin de la période de promotion du sommeil et prend place avant le réveil. L'effet excitateur de cette hormone offre une opportunité de transition du sommeil à l'éveil et module l'excitabilité corticale (Gaggioni et al., 2014 ; Ly et al., 2016).

2.1.2 Rythme circadien de la température corporelle

La température corporelle oscille au cours du cycle veille-sommeil, ce qui lui vaut d'être considérée comme le reflet fidèle du rythme circadien. Dans des conditions normales de veille et de sommeil, la température du corps est initialement de 36,5°C à 3h du matin. Elle augmente ensuite au cours de la matinée et se stabilise de 14h à 16h, puis augmente de nouveau pour finalement atteindre son pic de 37,4°C – « l'acrophase » – aux alentours de 17h. Elle rejoint ensuite son seuil initial vers 4h du matin (Dijk & Czeisler, cités par Gaggioni et al., 2014 ; Refinetti & Menaker, 1992 ; Weinert & Waterhouse, 2007). L'augmentation de la chaleur corporelle en matinée est associée à la remise en activité du corps lors du réveil. Ce dernier est initié par le rythme circadien, la chute de concentration sanguine de mélatonine, l'augmentation de la concentration en cortisol, et l'augmentation de la luminosité ambiante (Weinert & Waterhouse, 2007).

L'effet rythmique des NSC est à l'origine des variations circadiennes de la température corporelle. Il a un impact sur les centres de thermorégulation hypothalamiques, qui modulent à leur tour la vasodilatation et la transpiration. Ces processus de régulation thermique modifient également le set-point de la température corporelle, défini comme « la valeur d'une variable que les organismes sains tendent à stabiliser par le processus de régulation » (Refinetti &

Menaker, 1992 ; Weinert & Waterhouse, 2007). Dès lors, la température du corps à un moment spécifique de la journée est le résultat d'un travail d'ajustement actif par l'organisme.

La thermorégulation fait intervenir la production et/ou la perte de chaleur par l'organisme, ou encore la combinaison des deux. Les variations circadiennes de température seraient principalement expliquées par la perte de chaleur. Ce mécanisme serait plus efficace durant la journée biologique que durant la nuit. Toutefois, la température corporelle est affectée par l'activité physique et locomotrice de l'individu. Cette mise en mouvement est corrélée avec une production de chaleur lors des phases les plus actives de la journée. Cela est plus communément appelé « l'effet de masquage » (Valdez, 2019). D'ailleurs, la température garde son oscillation naturelle lorsque le mécanisme de production de chaleur est contrôlé (Refinetti et Menaker, 1992 ; Weinert et Waterhouse, 2007). Afin de mieux rendre compte de l'association entre température distale (les membres) et proximale (le tronc du corps), il a été proposé d'utiliser un gradient distal-proximal de la température (Kräuchi, Knoblauch, Wirz-Justice & Cajochen, 2006). Ce gradient soustrait la température proximale à la distale, permettant d'avoir un reflet fidèle de la dynamique de thermorégulation et des modifications au cours de la journée. De ce fait, **le DPG suit le rythme circadien de sorte qu'il est à son maximum au cours de la nuit, vers 2-3h du matin, pour atteindre son minimum vers 16-17h** (Kräuchi et al., 2006)

Le niveau d'activité varie de la même façon que la température corporelle, avec des pics de chaleur observables lors des phases actives. Notons cependant que l'un n'est pas un effet secondaire de l'autre. Les rythmes de la température corporelle naturelle et de l'activité sont plutôt soumis au même horaire, avec une avance de phase : la température augmente avant même que nous nous réveillions, et que nous soyons dès lors actifs (Refinetti & Menaker, 1992 ; Weinert & Waterhouse, 2007).

En conclusion, la température de l'organisme humain est maintenue dans des limites étroites grâce à un système complexe d'échanges entre la température basale (interne, le plus souvent mesurée au niveau du rectum), distale (cutanée, due à la vasodilatation) et l'environnement, sous la supervision de l'hypothalamus. La mesure de la température corporelle à un moment déterminé est le résultat de composants endogènes (l'horloge circadienne) et exogènes (environnement et activité). Alors même qu'elle est régulée partiellement par les oscillations du rythme circadien, la température modulerait quant à elle l'activité cérébrale. Cela impliquerait qu'elle représente un rythme circadien à double voie (Schmidt, 2019 ; Weinert & Waterhouse, 2007).

2.1.3 Zeitgebers et leur influence

L'environnement dans lequel l'humain évolue a un impact à la fois direct et indirect sur lui-même et son rythme circadien. Les signaux externes permettent à ce dernier de synchroniser les rythmes du corps au monde extérieur, notamment au cycle solaire. Ils lui offrent également l'opportunité d'anticiper et préparer les défis que la journée et la nuit peuvent présenter (Heyde et al., 2018 ; Kyriacou & Hastings, 2010 ; Schmidt, 2019 ; Valdez, 2019).

Ces stimuli exogènes, appelés « zeitgebers », induisent la réinitialisation de la phase circadienne. Le plus puissant d'entre eux est le niveau de luminosité ambiant ; la lumière est traditionnellement associée au rythme circadien et a un impact direct sur l'alerte et la cognition. Les autres zeitgebers connus chez l'humain sont la consommation de repas, les interactions sociales, l'activité locomotrice et les changements de température (Gaggioni et al., 2014 ; Heyde et al., 2018 ; Kyriacou & Hastings, 2010 ; Santhi et al., 2016 ; Schmidt, 2019). Le sommeil a été considéré par certains auteurs comme un zeitgeber (Weinert & Waterhouse, 2007), alors que d'autres réfutent cette hypothèse (Heyde et al., 2018). Soulignons toutefois que le rythme circadien est capable de réguler le cycle veille-sommeil sans aucune intervention de l'environnement (Schmidt, 2019).

2.2 Chronotype

On remarque des différences interindividuelles dans l'expression du rythme circadien. Cela mène souvent à qualifier certaines personnes de « couche-tôt » ou de « couche-tard » (Schmidt, 2019). Ces différences transparaissent dans une multitude de comportements humains quotidiens tels que les habitudes de sommeil, ou le moment préféré de la journée pour entreprendre des activités cognitives complexes. Cette préférence varie entre la matinée ou la soirée se nomme le « chronotype ». Son origine est multifactorielle : elle prend source au niveau génétique, socio-professionnel et environnemental (Schmidt & Collette, 2016 ; Schmidt et al., 2012). Selon certains auteurs, ces diverses expressions du rythme circadien pourraient être causées par une différence au niveau de la transmission des signaux d'alerte dans les structures sous-corticales (Gaggioni et al., 2014 ; Schmidt, Peigneux & Cajochen, 2012).

Les processus circadiens de régulation veille-sommeil varient selon le chronotype : les individus ayant une préférence pour le matin (« chronotype matinal ») ont une phase circadienne en avance sur celle des personnes préférant le soir (« chronotype du soir »). La

pression homéostatique de sommeil semble s'accumuler aussi plus rapidement chez eux au cours de la journée. Ils ont donc tendance à se lever tôt et peinent à rester éveillés au-delà de leur horaire de coucher habituel (Gaggioni et al., 2014 ; Schmidt et al., 2012 ; Schmidt & Collette, 2016).

Au niveau physiologique, les marqueurs circadiens tels que la température corporelle ou la concentration sanguine de mélatonine sont décalés en fonction du chronotype de la personne : les chronotypes du matin ayant une avance de phase tandis que les chronotypes du soir ont un retard de phase (Schmidt et al., 2009). En général, lorsque la pression homéostatique du sommeil est plus élevée, l'activité de l'hypothalamus antérieur (région suprachiasmatique) maintient les capacités de résistance cognitive à l'interférence. Cette activité serait plus efficacement maintenue au cours de la journée chez les chronotypes du soir que chez les personnes matinales (Gaggioni et al., 2014 ; Schmidt & Collette, 2016 ; Schmidt, Peigneux & Cajochen, 2012). Le marqueur de la pression de sommeil, c'est-à-dire l'activité d'ondes lentes au cours du sommeil en début de nuit, est négativement corrélé à l'activation de cette région hypothalamique lors de la réalisation d'une tâche attentionnelle en fin de journée. Une pression de sommeil moindre, comme le présentent les chronotypes du soir, semble permettre une activation plus importante de la région suprachiasmatique, et donc un signal d'alerte circadien plus prononcé (Schmidt et al., 2009). Le chronotype est dès lors très important à prendre en compte et à contrôler dans l'investigation de l'influence du rythme circadien sur les fonctions cognitives.

2.3 Influence de l'âge sur le rythme circadien

Au cours du vieillissement normal, le rythme circadien est instable et susceptible de présenter des différences significatives selon les tranches d'âge. Il s'avère être très faible – voire inexistant – à la naissance pour ensuite s'améliorer au cours de la première année de vie (Refinetti & Menaker, 1992 ; Schmidt & Collette, 2016).

L'organisme âgé perd sa capacité d'adaptation à l'environnement, et plus particulièrement aux signaux périodiques exogènes. Leur rythme circadien se décompose et devient plus silencieux, reflété par exemple par une **diminution de la sécrétion nocturne de mélatonine**. On remarque de plus une avance de phase circadienne chez les personnes âgées, abondamment rapporté par la littérature (Schmidt, 2019 ; Schmidt & Collette, 2016 ; Schmidt, Peigneux &

Cajochen, 2012 ; Schmidt et al., 2012 ; West, Murphy, Armilio, Craik & Stuss, 2002). La thermorégulation est également déficitaire lors du vieillissement, et plus particulièrement au niveau de la conservation de la chaleur. Le régulateur circadien central fonctionne jusqu'aux derniers jours de la vie, mais le rythme de la température varierait à cause du manque d'adaptation aux sources externes. Ces facteurs réduisent l'amplitude du rythme circadien de la température corporelle (Refinetti & Menaker, 1992 ; Weinert & Waterhouse, 2007).

Cependant, certains auteurs considèrent que le cycle circadien de la température endogène serait relativement stable au cours du vieillissement, et que les disparités observées seraient attribuables à l'état de santé, l'âge physiologique et le mode de vie de l'individu. En effet, on remarque une phase circadienne stable lorsque l'effet de l'activité est contrôlé. Le mode de vie cause une plus grande variabilité intra-quotidienne de l'acrophase, ce qui expliquerait qu'on observe une diminution de l'amplitude d'oscillation chez les individus âgés. En réalité, pour ce groupe d'âge, les différences intra- et inter-individuelles sont considérablement plus fréquentes que pour les jeunes individus, ce qui se traduit non pas par une diminution réelle de l'acrophase moyenne, mais plutôt par une avance ou un retard de phase du rythme circadien (Schmidt, Peigneux & Cajochen, 2012 ; Gubin et al., Monk et al., cités par Weinert & Waterhouse, 2007).

L'horaire du cycle veille-sommeil varie également avec l'âge. La tendance fait que les enfants se rapprochent d'un chronotype matinal puis passent à un chronotype du soir lors de l'adolescence. Par la suite, en vieillissant, l'humain retourne progressivement vers un chronotype matinal. De plus, on rapporte un moindre besoin de sommeil chez les personnes âgées (Carrier et al. cités par Schmidt et al., 2012 ; Schmidt, 2019 ; Schmidt, Peigneux & Cajochen, 2012). Dès lors, le maintien d'une attention stable et adéquate semble plus difficile le matin pour les jeunes adultes, tandis que les personnes âgées éprouvent plus de difficultés au cours de la soirée, après avoir passé une plus grande quantité de temps éveillés. On observe de meilleures performances quand le moment de l'évaluation cognitive est adapté au chronotype de l'individu, et d'autant plus pour les personnes âgées que pour les jeunes (Schmidt & Collette, 2010 ; Schmidt et al., 2012).

Le vieillissement s'accompagne donc de plusieurs changements physiologiques et comportementaux, induisant des modifications du rythme circadien, notamment des dérégulations du cycle d'éveil et une fragmentation du sommeil. Ces conséquences sont à leur tour potentiellement néfastes pour les performances cognitives des personnes âgées et à fortiori, pour leur bien-être (Schmidt & Collette, 2016 ; Weinert & Waterhouse, 2007).

3 Effet du rythme circadien sur la cognition

Le rythme circadien affecte relativement fortement les fonctions cognitives. De meilleures compétences dans certains domaines (vigilance, alerte, fonctions exécutives, ...) sont corrélées avec une température corporelle maximale, tandis qu'une diminution de la chaleur de l'organisme s'accompagne généralement d'un ralentissement du traitement cortical de l'information. La performance cognitive est déterminée par l'interaction entre les processus circadiens et homéostatiques du sommeil (Gaggioni et al., 2014 ; Kyriacou & Hastings, 2010 ; Lewandowska, Wachowicz, Marek, Oginska, & Fafrowicz, 2018 ; Lo et al., 2012 ; Schmidt, Collette & Peigneux, 2007 ; Schmidt, Peigneux & Cajochen, 2012 ; Sloten & Krekling, 1996 ; Valdez, 2019 ; West et al., 2002).

L'influence des processus physiologiques sur la cognition est responsable des variations de performance au cours de la journée. La première modulation s'observe durant les 30 minutes suivant le réveil, durant lesquelles l'individu se trouve dans un état transitoire de faiblesse cognitive semblable à une intoxication alcoolique : il s'agit de « l'inertie de sommeil » (Burke, Scheer, Ronda, Czeisler & Wright, 2015 ; Gaggioni et al., 2014 ; Lo et al., 2012 ; Scheer, Shea, Hilton & Shea, 2008). Pour une personne se levant à 7-8h et se couchant vers 23-00H, le niveau de performance cognitive reste bas jusqu'à 10h, et puis augmente au cours de la journée jusqu'à atteindre son niveau maximal entre 16h et 22h. Notons toutefois l'existence du phénomène de « post-lunch dip » aux environs de 14h, reflétant l'altération temporaire de l'efficacité cognitive causée par un repas copieux. La nuit biologique s'accompagne quant à elle d'un déclin des performances. Ainsi, il s'avère que la mesure des aptitudes cognitives est grandement influencée par le moment du cycle veille-sommeil. Cela est d'autant plus certain qu'on sait que le cerveau s'active différemment selon les périodes de la journée (Lewandowska et al., 2018 ; Schmidt, 2019 ; Schmidt & Collette, 2016 ; Valdez et al., 2012 ; West et al., 2002).

Le signal circadien se marque dans la privation de sommeil par le fait que le déclin des performances n'est pas linéaire : pendant la journée biologique, l'effet délétère de la pression de sommeil est contrecarré par le signal d'alerte circadien. Cela permet un moindre impact sur les fonctions cognitives, surtout au sein de la zone de maintenance de l'éveil. On remarque en revanche une diminution des performances ou de l'alerte si l'éveil est prolongé dans la nuit biologique. Ce déclin est moins important si l'éveil est prolongé jusqu'au prochain jour car, à ce moment, le niveau d'alerte bénéficie du signal circadien d'éveil qui tente de restabiliser nos performances. Il est toutefois important de souligner que la modulation circadienne n'est pas

apte à s'opposer à une fatigue anormalement élevée causée par une privation chronique ou aiguë de repos (Dijk et al., 1992 ; Gaggioni et al., 2014 ; Lo et al., 2012 ; Schmidt, 2019 ; Schmidt & Collette, 2016).

L'ampleur des oscillations cognitives circadiennes est partiellement dépendante du domaine cognitif évalué et des caractéristiques de la tâche utilisée (Schmidt & Collette, 2016). Les différences de performance au cours de la journée sont également expliquées par des modifications métaboliques dans des régions cérébrales cruciales pour la fonction cognitive mesurée. On observe d'ailleurs que l'excitabilité corticale augmente au fil de la journée biologique (Ly et al., 2016 ; Ramírez, Talamantes, García, Morales, Valdez & Menna-Barreto, 2006 ; Valdez et al., 2012).

Le chronotype nuance les changements de performance selon le rythme circadien : une préférence pour le soir est associée à une amélioration des performances cognitives au cours de la journée, tandis que le contraire s'observe pour ceux qui préfèrent le matin. Cette dichotomie désigne l'importance de « l'effet de synchronie », c'est-à-dire le bénéfice retiré par l'adéquation entre le chronotype et le moment choisi pour évaluer les fonctions cognitives. Notons toutefois que d'autres facteurs peuvent influencer ladite performance. En effet, cela peut mener à subjectivement considérer le moment comme optimal ou non optimal (May et al., Yoon, May & Hasher, Hasher et al., May, Yang et al., cités par Schmidt, Peigneux & Cajochen, 2012 ; Puttaert, Adam & Peigneux, 2019 ; Schmidt et al., 2007). Puttaert, Adam & Peigneux (2019) ont d'ailleurs observé que l'efficacité des processus contrôlés de récupération en mémoire était corrélée avec la période subjectivement définie comme optimale par les participants, ce qui n'est pas le cas pour les processus automatiques. Puisque la perception d'un moment optimal reflète partiellement le chronotype de l'individu, il est opportun de prendre ce facteur en considération dans l'étude du rythme circadien.

De plus, il existe de nombreuses différences inter-individuelles concernant les variations cognitives circadiennes au cours de la journée, celles-ci pouvant être influencées par le chronotype, l'éventuelle médication ou l'âge de l'individu (Gaggioni et al., 2014 ; Valdez, 2019). En effet, le vieillissement s'accompagne d'un ralentissement cognitif et d'une détérioration de certaines fonctions cognitives, à savoir : la mémoire, les fonctions exécutives et l'attention. Cela pourrait être le résultat de l'atténuation de l'influence circadienne et homéostatique liée à l'âge (Schmidt, Peigneux & Cajochen, 2012 ; Valdez et al., 2012).

Enfin, les fonctions cognitives de haut niveau seraient manipulées par cette interaction du rythme circadien avec la pression homéostatique du sommeil. Ces fonctions reposent sur les trois processus neuropsychologiques de base, pour lesquels des rythmes de performance ont été largement observés. Il s'agit de l'attention, des fonctions exécutives et de la mémoire de travail (Burke et al., 2015 ; Valdez, 2019 ; Valdez et al., 2012).

3.1 Fonctions attentionnelles

Les données de la littérature mettent en exergue la modulation des processus attentionnels par l'interaction entre le cycle veille-sommeil et le rythme circadien. Les performances des fonctions attentionnelles seraient plus faibles au cours de la matinée et augmenteraient progressivement jusqu'à 22h – avec une diminution transitoire liée au *post-lunch dip*. Cette préservation d'un niveau adéquat des processus attentionnels en fin de journée est consistante avec la présence de la zone de maintenance de l'éveil, et cela est vrai même dans un contexte de privation de sommeil. Bien sûr, la variabilité inter-individuelle est de mise : le niveau de performance quand la fatigue est élevée dépend de l'individu (Gevers, Deliens, Hoffmann, Notebaert & Peigneux, 2015 ; Lo et al., 2012 ; McMahan, Ftouni, Drummond, Maruff, Lockley, Rairaratnam & Anderson, 2018 ; Schmidt et al., 2007 ; Valdez, 2019).

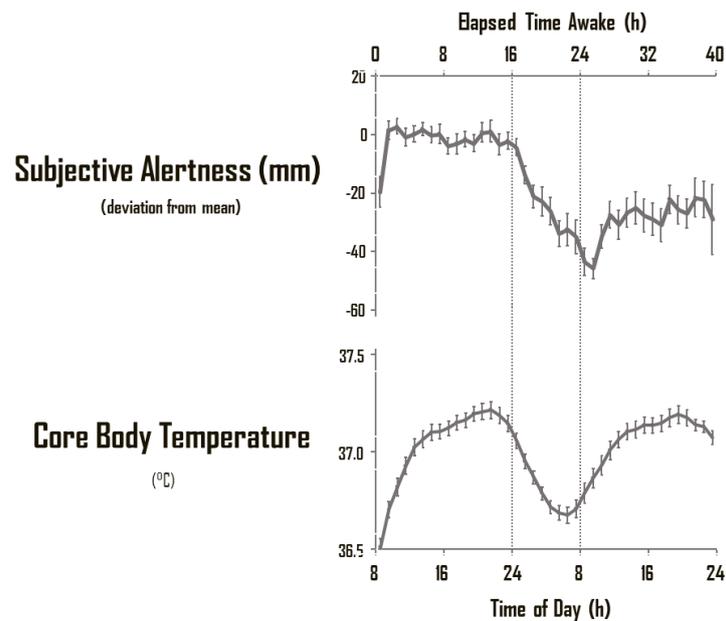


Figure 2. Modifiée de Dijk et al. (1992), montrant l'évolution dans le temps de la vigilance subjective et de la température corporelle en moyenne sur 24 sujets au cours d'une routine constante de 36 à 40 heures.

L'impact sur l'alerte – phasique et tonique – a été le plus documenté. Cette fonction attentionnelle oscille en phase avec le rythme circadien de la température corporelle (cf. Figure 2 ci-dessus), en plus d'être affectée par la pression homéostatique de sommeil. L'accumulation de cette dernière a pour conséquence une augmentation des omissions et un ralentissement graduel au cours de la journée (Dijk et al., 1992 ; Lo et al., 2012 ; Santhi et al., 2016 ; Valdez et al., 2012 ; West et al., 2002). Tout comme pour les autres domaines cognitifs, ou pour le fonctionnement cérébral général, l'interaction des deux processus physiologiques entre eux détermine le niveau d'alerte d'un individu (Gaggioni et al., 2014 ; Johnson, Duffy, Dijk, Dval & Czeisler, 1992 ; Valdez, 2019).

Dans des conditions normales de veille et de sommeil, la vigilance reste stable au cours de la journée pour ensuite se détériorer aux environs du coucher. Cependant, un décalage entre processus homéostatiques et circadiens peut être à l'origine de troubles de cette fonction. Cette information est à nuancer par le fait que le chronotype module le déclin : les chronotypes matinaux subissent une chute de leur niveau de vigilance plus marquée au cours de la journée que les chronotypes du soir. Il s'avérerait également que le vieillissement est associé à une sensibilité du niveau de vigilance plus faible au manque de sommeil (Burke et al., 2015 ; Gevers et al., 2015 ; Schmidt & Collette, 2016 ; Schmidt, Peigneux & Cajochen, 2012).

L'influence des mécanismes circadiens et homéostatiques touche également l'attention soutenue et sélective. De la même manière que pour l'alerte ou la vigilance, la privation de sommeil a des effets délétères sur la performance, induisant des décrochages attentionnels de plus en plus fréquents lorsque que la période d'éveil se prolonge dans la nuit biologique. De nouveau, ces variations sont modulées par le chronotype, celui-ci ayant un impact sur l'activité hypothalamique liée à l'exécution d'une tâche d'attention soutenue (Lo et al., 2012 ; Santhi et al., 2016 ; Reichert et al., 2017 ; Schmidt & Collette, 2016 ; Valdez et al., 2012).

Enfin, il semblerait que les aspects attentionnels soient plus fortement touchés par les deux processus physiologiques que ne le sont la mémoire de travail ou les fonctions exécutives. Le maintien, voire l'augmentation, des capacités attentionnelles au cours de la journée reflète fidèlement la contribution du rythme circadien (Lo et al., 2012 ; Santhi et al., 2016).

3.2 Fonctions exécutives

À l'instar des fonctions attentionnelles, les fonctions exécutives sont affectées par l'interaction entre le rythme veille-sommeil et circadien (Lo et al., 2012). Au cours de la journée, la flexibilité mentale et l'inhibition varient en association avec le rythme de la température corporelle (Valdez, 2019). De fait, leur efficacité est au plus bas lorsque la température corporelle est à son minimum, c'est-à-dire pendant la nuit biologique et les premières heures du jour (Gaggioni et al., 2014 ; Lo et al., 2012 ; Valdez, 2019). La fatigue aigüe a quant à elle un impact négatif sur l'inhibition. Néanmoins, il semblerait que la composante automatique de l'attention n'est pas modulée par le manque de sommeil dans la tâche du Stroop, au contraire de la composante contrôlée (Gevers et al., 2015 ; Lo et al., 2012 ; Schmidt et al., 2012). Cela pourrait s'expliquer par le fait que le rythme circadien et le moment de la journée modulent fortement l'impact de la fatigue sur la performance à cette tâche.

Les fonctions exécutives de haut niveau peuvent être modulées par les variations circadiennes et homéostatiques. Le cortex préfrontal contrôle les fonctions exécutives, mais coordonne également la mémoire de travail, l'attention, la prise de décision et la gestion des stratégies de résolution de problème. L'oscillation de performance au niveau exécutif peut dès lors avoir un impact sur les capacités dans d'autres domaines, tel que l'administrateur central de la mémoire de travail considéré comme le gestionnaire du stockage (Dijk et al. cités par Valdez, 2019 ; Smith & Jonides cités par Ramirez et al., 2006).

3.3 Mémoire de travail

La mémoire de travail est une fonction cognitive qui a pour but la conservation temporaire, consciente et active d'informations afin de réaliser des opérations complexes. Cela comprend par exemple la lecture, l'apprentissage et le raisonnement. Cette fonction est divisée en trois sous-composantes, selon le modèle classique de Baddeley et al. :

- ❖ **L'administrateur central** : il permet la manipulation et la coordination des informations stockées dans les deux systèmes esclaves, c'est-à-dire les systèmes de stockage.
- ❖ **La boucle phonologique** : elle est composée d'un stock phonologique maintenant l'information verbale pour quelques secondes à quelques minutes, et d'une récapitulation articulatoire subvocale qui permet de réintroduire et rafraîchir

l'information dans la boucle. Ce système de stockage verbal à court terme est latéralisé dans l'hémisphère gauche. Il permet la compréhension verbale orale et en lecture, mais aussi l'apprentissage verbal.

- ❖ **Le registre visuo-spatial** (ou calepin visuo-spatial) : il sert à garder les informations visuelles et spatiales accessibles à la conscience. Il retient à court terme les détails visuels de l'information, mais aussi les dimensions et les éventuels mouvements. Il est latéralisé dans l'hémisphère droit, et admet entre-autres le dessin, la construction spatiale et l'arithmétique.

Les interactions entre l'administrateur central et les deux systèmes de stockages constituent la fonction dynamique de mémoire de travail (Lewandowska et al., 2018 ; Ramirez et al., 2006 ; Seron & Van der Linden, 2014, p.167-174).

Ce modèle théorique de la mémoire de travail, bien qu'ayant été la pierre angulaire de son étude dans la littérature, a néanmoins évolué avec le temps. Celui-ci est devenu obsolète ; il est désormais généralement accepté qu'une composante attentionnelle et langagière contribue à son bon fonctionnement, comme le stipule le modèle A-O-STM proposé par Majerus, Heiligenstein, Gautherot, Poncelet & Linden (2009), basé sur des données neuropsychologiques, comportementales et de neuroimagerie : une place centrale est attribuée à l'attention sélective, interagissant avec le système langagier et le traitement de l'ordre sériel. Ces deux derniers entretiennent par ailleurs une relation bidirectionnelle. Ici, la composante attentionnelle et exécutive n'est pas active uniquement pour les modifications actives en mémoire à court terme, mais agit dès le stockage passif d'items.

La performance varie au cours de la journée selon l'interaction de la pression homéostatique de sommeil avec le rythme circadien. Notons toutefois que les deux processus de stockage oscillent avec un retard de phase de 1h à 3h par rapport au rythme de la température corporelle (Burke et al., 2015 ; Gevers et al., 2016 ; Johnson et al., 1992 ; Lewandowska et al., 2018 ; Lo et al., 2012 ; Schmidt et al., 2012 ; West et al., 2002). Aussi, les capacités en mémoire de travail sont altérées par le manque et l'inertie de sommeil (Burke et al., 2015). On observe de meilleures performances au cours de la journée biologique. Elles augmentent durant les 4 premières heures d'éveil et puis déclinent ensuite jusqu'à l'endormissement (Burke et al., 2015 ; Heyde et al., 2018 ; Johnson et al., 1992 ; Reichert et al., 2017 ; Santhi et al., 2016). En ce qui concerne la zone de maintenance de l'éveil, les avis divergent : certains auteurs stipulent que la performance est protégée lors de cette période (Lewandowska et al., 2018 ; McMahan et al., 2018), d'autres affirment qu'on n'y voit aucune amélioration (McMahan et al., 2018 ;

Reichert et al., 2017). Une explication potentielle pour cette différence de résultats au sein de la littérature scientifique pourrait se trouver dans le fait que les variations de performance en mémoire de travail seraient influencées par la charge mentale nécessaire à la bonne réalisation de la tâche. Une tâche nécessitant une charge mentale élevée sera plus influencée par le moment de la journée et la privation de sommeil qu'une tâche demandant peu de charge mentale (Lewandowska et al., 2018). Qui plus est, la contribution hypothalamique permettant une bonne performance en mémoire de travail lors de la zone de maintenance de l'éveil dépend de la quantité et de la qualité du sommeil nocturne de l'individu (Reichert et al., 2017).

La capacité du registre visuo-spatial de la mémoire de travail est détériorée aux alentours de l'acrophase de la mélatonine (Valdez et al., 2012). Il semblerait que ce stock soit en retard de phase de 3h par rapport à la température corporelle, ce qui coïncide avec cette affirmation (Ramirez et al., 2006).

L'efficacité des processus de mémoire de travail semblent décliner avec le vieillissement. Plus spécifiquement, des recherches évoquent un déclin de l'inhibition - fonction qui a pour rôle de limiter et supprimer les informations non pertinentes - comme perturbant le bon fonctionnement de la mémoire de travail (Connell et al., Tipper, Hamm & Hasher, Hartman & Hasher, Kramer et al., West, cités par West et al., 2002). Ce déclin dû à l'âge est modulé par le moment de la journée (a). Connaissant les implications de la mémoire de travail dans la vie quotidienne, un déclin pourrait être la source d'autres détériorations cognitives, observés par exemple en matière de prise de décision, de résolution de problèmes ou de compréhension verbale (Sattari, Whitehurst, Ahmadi & Mednick, 2019). Malgré cela, les personnes âgées ont une performance en mémoire de travail moins perméable au manque de sommeil que les jeunes adultes (Sattari et al., 2019).

4 Hypothèses de recherche

Les recherches en matière de physiologie, rythme circadien ou encore en mémoire de travail ne sont pas nouvelles, et beaucoup d'éléments ont déjà pu être mis en lumière. Néanmoins, l'interaction de ces facteurs entre eux n'a été que récemment investiguée. Il semblerait que la recherche sur l'influence du rythme circadien sur la cognition se soit plutôt focalisée sur l'attention, dont la rythmicité a été plus abondamment démontrée.

La neuroimagerie, les techniques biomédicales et neuropsychologiques sont en constante amélioration ; celles-ci ont d'ailleurs permis l'observation de tous les faits établis dans la revue de littérature précédente. L'utilisation des méthodes de routine constante et de désynchronisation forcées mettent en lumière de multiples caractéristiques du rythme circadien, mais ne permettent pas un consensus clair sur bon nombre de facteurs : l'influence de l'âge sur le rythme circadien, l'interaction de la température avec l'activité cérébrale et cognitive, la modulation circadienne des performances en mémoire de travail, etc. Tout ceci est théoriquement évaluable dans un protocole de routine constante, l'effet de l'âge sur le rythme circadien ayant par exemple déjà été testé (Münch, Knoblauch, Blatter, Schröder, Schnitzler, Kräuchi, Wirz-Justice & Cajochen, 2005). Elles ne permettent pas non plus d'apprécier le réel impact du rythme circadien dans des conditions écologiques.

Certains auteurs tendent à affirmer que le rythme circadien diminue avec l'âge avancé, mais d'autres soutiennent qu'il n'en est rien. Les observations d'une amplitude d'oscillation réduite sont, selon eux, dues aux différences intra- et interindividuelles, elles-mêmes bien plus marquées avec l'âge (cf. point 2.3). Alors même que la plupart de la communauté scientifique juge que le rythme circadien a une influence sur la cognition, celle-ci peine à établir l'impact réel que le vieillissement a sur cette relation. Dans la mesure où le processus circadien serait moins puissant chez les personnes âgées, il semblerait logique de penser que son emprise sur la cognition se verra amoindrie.

Aussi, nos recherches théoriques ont mis en évidence que la mémoire de travail avait été relativement bien observée en lien avec le rythme circadien. Pourtant, peu d'études semblaient s'intéresser aux sous-composantes en tant que telles. La recherche s'est plutôt concentrée sur la fonction cognitive générale, ou encore sur le pan exécutif de l'administrateur central. La boucle phonologique et le registre visuo-spatial ont, quant à eux, été relayés au second plan. Il est donc difficile de déterminer le réel impact qu'ont les processus physiologiques sur leur performance.

Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés à l'influence du rythme circadien sur la performance du registre visuo-spatial en mémoire de travail. Étant donné l'abondante affirmation que ce rythme est reflété fidèlement par la température corporelle, c'est via celle-ci que nous allons l'investiguer. De plus, compte tenu des informations contradictoires concernant le signal circadien au cours du vieillissement, il nous a paru pertinent de nous pencher également sur la question. Nous émettons donc les hypothèses suivantes :

- ❖ La température varie en fonction du moment de la journée, reflétant une modulation circadienne. Nous observerons un effet du moment de la journée sur la température, mais également une différence significative entre la température maximale et minimale, ainsi qu'entre la température mesurée aux deux instants de testing (9H et 17H). Pour cela, nous utiliserons principalement le gradient distal-proximal (DPG) : il serait à son maximum au cours de la nuit et à son minimum aux alentours de la wake-maintenance zone.
- ❖ Les performances aux tâches cognitives sont influencées par le moment de la journée et sont affectées par la modulation de la température, marqueur classique de la rythmicité circadienne chez l'Homme. Elles seront meilleures quand la chaleur du corps sera élevée, avec un éventuel retard de phase de trois heures.
 - Les performances au d2 (vitesse de traitement et attention) suivront la courbe circadienne de la température, avec une amélioration au testing du soir comparément à celui du matin. Nous pensons également que la vitesse de traitement sera différemment affectée par rapport à la précision.
 - Les performances à la tâche de Pertzov (calepin visuo-spatial de la mémoire de travail) suivront la courbe circadienne de la température, avec une meilleure identification et localisation, ainsi que moins d'erreurs « swap » lors du testing de 17H, moment au cours duquel le signal circadien est plus fort. Aussi, nous nous attendons à voir un effet principal du délai de rétention (moins bonne performance pour les délais de 4 sec vs 1 sec) et du nombre d'items (moins bonne performance pour les essais contenant 3 items au lieu de 1).
- ❖ La modulation journalière de la température et des performances aux différentes tâches (d2 et Pertzov) dépend de l'âge : les participants âgés auront un signal circadien de plus faible amplitude que les jeunes, se reflétant également par une variation de performance moins marquée au cours du cycle veille-sommeil par rapport aux participants jeunes.

5 Méthodologie

5.1 Echantillon

24 participants ont été recrutés et répartis dans deux groupes, selon leur âge : les participants jeunes (N=21, $23,7 \pm 3,66$ ans, 14 femmes) et les participants âgés (N=3, $71 \pm 2,65$ ans, 2 femmes). Quel que soit leur groupe, ils ne devaient pas présenter de troubles circadiens, du sommeil ou de troubles associés. Dès lors, les horaires de sommeil habituels des participants étaient contrôlés. Un critère d'exclusion était de dormir moins de 6h ou plus de 11h par nuit pour les jeunes, et en-dessous de 6h et au-delà 9h pour les participants âgés (Hirshkowitz et al., 2014). Ils devaient avoir une vision suffisante ou corrigée. Ci-dessous, un tableau reprenant les caractéristiques de nos deux groupes :

	Groupe jeune (N=21)	Groupe âgé (N=3)		
		Âgé 1	Âgé 2	Âgé 3
<i>Âge</i>	$23,7 \pm 3,66$ ans	74	70	69
<i>Sexe</i>	14 femmes, 7 hommes	F	H	F
<i>BMI</i>	$21,905 \pm 3,108$	26.3	24.5	32.5
<i>PSQI</i>	$4,14 \pm 1,62$	3	5	7
<i>MEQ</i>	15 « matin », 6 « soir »	Matin	Matin	Matin
<i>Niveau d'éducation</i>	$2,76 \pm 2,762$	2	3	3
<i>Heure du coucher</i>	$23h39 \pm 0h47$	$23h00 \pm 0h30$	$23h45 \pm 0h15$	$23h50 \pm 0h30$
<i>Heure du lever</i>	$8h16 \pm 0h07$	$8h42 \pm 0h45$	$8h45 \pm 0h$	$7h00 \pm 1h00$

Plusieurs auteurs ont montré une différence de genre dans l'expression du rythme circadien. Les femmes auraient un rythme circadien de la température corporelle plus court, s'accompagnant d'une sécrétion plus tôt et plus abondante de mélatonine et d'une plus grande durée de sommeil (cf. Figure 3 ci-dessous). Les fonctions cognitives seraient qualitativement identiques entre les deux sexes. En revanche, les variations au niveau quantitatif seraient plus marquées chez les femmes quand la fatigue augmente : la précision de réponse se détériore. Cette différence est à interpréter d'un point de vue neuroendocrinien, c'est-à-dire que les hormones sexuelles auraient un effet aigu et de longue durée sur le rythme circadien (Santhi et al., 2016). En effet, lors de la phase lutéale du cycle menstruel, la température corporelle est de $0,4^{\circ}\text{C}$ plus élevée que dans la phase folliculaire, dû à l'action de l'hormone progestérone. L'autre hormone sexuelle féminine, l'œstrogène, a quant à elle pour effet de diminuer la température basale, c'est pourquoi on remarque une température plus basse précédant

l'ovulation. Néanmoins, la phase circadienne semble rester stable, quelle que soit le moment du cycle menstruel. De plus, notons que la prise de contraceptifs contenant de la progestérone a le même effet sur la température que la phase lutéale : on observe une augmentation générale de la chaleur corporelle (Baker & Driver, 2007). Enfin, la ménopause a été identifiée comme une source importante de changements endocriniens et de vulnérabilité cognitive (Baker, Sattari, de Zambotti, Goldstone, Alaynick & Mednick, 2019).

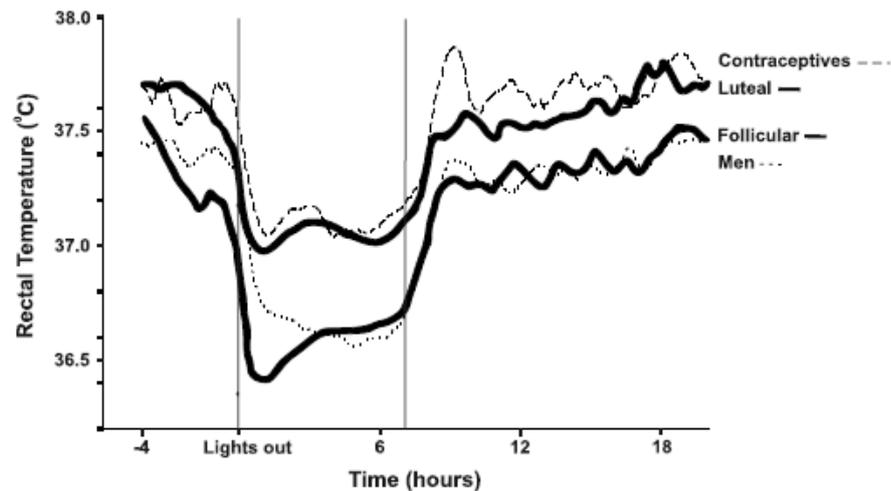


Figure 3 – Graphique des variations de température chez des hommes, des femmes en phase : lutéale, folliculaire et sous contraceptifs oraux. Reproduit à partir de « Circadian rhythms, sleep, and the menstrual cycle», par Baker, F.C., & Driver, H.S., 2007, *Sleep Medicine*, 8(6), p. 614.

Sur base de ces informations, nous avons jugé pertinent de prendre le cycle menstruel de nos participantes en compte, et de ne les tester que lors de leur phase folliculaire.

5.2 Outils de mesure

5.2.1 Mesure de la température corporelle

Comme mentionné plus haut, nous avons utilisé la mesure de la température corporelle pour obtenir le reflet des oscillations du rythme circadien. Pour ce faire, nous avons eu recours à des sondes thermiques cutanées, les iButtons (DS1922L-F5). Celles-ci, ressemblant à de petites pastilles, étaient apposées sur la poitrine (température proximale) et sur le poignet de la main non dominante (température distale), et contribuaient à détecter les changements de température corporelle (Romeijn & Van Someren, 2011). Ces iButtons ont une sensibilité de 0,0625°C et supportent de -10°C à 65°C. Cette sensibilité maximale est idéale dans le cadre de

l'étude de la température, il est toutefois à noter que pour un certain nombre de participants, une erreur de paramètre a limité la résolution à 0,5°C (10 participants). Ces outils peuvent enregistrer en continu pendant 273 heures. Il a été demandé à nos participants de les porter en continu durant au minimum 72h avant les évaluations, et si possible de les garder lors des 2 jours de testing. La résolution d'enregistrement (0,0625°C ou 0,5°C) était utilisée en covariée dans nos analyses statistiques.

Pour faciliter l'analyse des données, nos participants devaient remplir un « calendrier de sommeil », c'est-à-dire indiquer chaque jours leur heure de lever et de coucher, ainsi que l'éventuel enlèvement des outils et sa justification. Cela nous a permis de mieux déterminer l'heure d'endormissement et de réveil, et de comprendre les possibles pertes d'activité en cours de journée.

5.2.2 Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ)

L'expression du rythme circadien et de la pression homéostatique du sommeil, et tous leurs paramètres associés, varie selon le chronotype de l'individu. Cela implique que le rythme circadien n'a pas le même horaire pour tout le monde. Ainsi, les performances cognitives varient différemment selon ce facteur de préférence. Pour tenir compte de ce facteur, nous avons eu recours au questionnaire de Horne & Östberg (1976), le « Morningness-Eveningness Questionnaire ». Les 19 items qui le composent sont axés sur la préférence pour différentes activités sur le temps d'une journée, et aident donc à déterminer le chronotype de l'individu. Il s'agit du questionnaire le plus utilisé pour évaluer le chronotype. Initialement créé sur base d'un échantillon d'étudiants, il a été validé pour une population adulte par la suite (Taillard, Philip, Chastang & Bioulac, 2004 ; Valdez et al., 2012).

Ce questionnaire a été administré aux participants, dans sa version française, avant le début de l'expérience. Il nous a permis, lors de nos analyses, de prendre en compte les préférences de chaque personne et nuancer l'expression de leur rythme circadien, mais également de trier les volontaires pour exclure les chronotypes extrêmes. 15 de nos participants jeunes et les 3 participants âgés présentaient un chronotype dit « du matin ».

5.2.3 Index de Qualité du Sommeil de Pittsburgh (PSQI)

Ce deuxième questionnaire porte sur la qualité de sommeil des répondants. Composé de 19 questions d'auto-évaluation (4 ouvertes et 5 questions à choix multiples), cet outil évalue 7 composantes pouvant recevoir chacune un score entre 0 (aucune difficulté) et 3 (difficultés sévères). L'addition de ces scores donne le score global allant de 0 (aucune difficulté) à 21 points (difficultés sévères) (Buysse, Reynolds, Monk, Berman & Kupfer, 1988). Nous avons exclu, sur base de cet outil, tout participant ayant un mauvais score de qualité de sommeil (score ≥ 5 , avec une tolérance allant jusqu'à 7). Les participants jeunes avaient un PSQI moyen de 4.14 ± 1.62 ; tandis que le PSQI moyen des participants âgés se situait à 5 ± 2 .

5.2.4 Tâche de Pertzov

Afin de mesurer les performances du registre visuo-spatial, nous avons utilisé une tâche créée par Pertzov et son équipe en 2012. Celle-ci mesure la capacité de se souvenir de l'identité mais également de la localisation d'un objet (Pertzov, Heider, Liang & Husain, 2015). Cette tâche évalue non seulement la mémoire de travail visuelle dans son pan identificatoire, c'est-à-dire maintenir l'identité d'une cible pendant un temps plus ou moins long afin de pouvoir la reconnaître, ainsi que dans son pan spatial, qui consiste à lier une information visuelle à une localisation relativement précise dans l'espace.

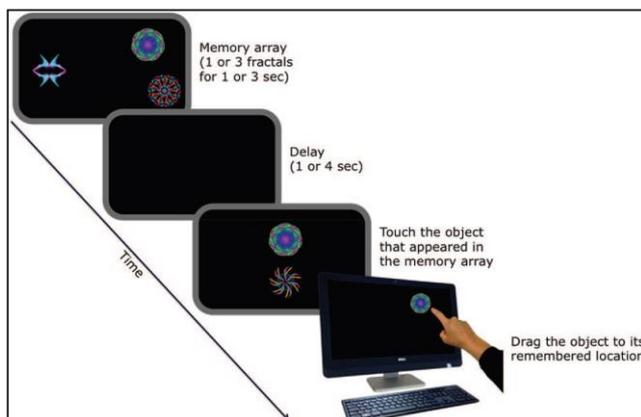


Figure 4 – Exemple de procédure d'un essai à 3 items. Reproduit à partir de « Effects of healthy ageing on precision and binding of object location in visual short term memory », par Pertzov, Y., Heider, M., Liang, Y., & Husain, M., 2015, *Psychology and Aging*, 30(1), p.27

Comme présenté sur la Figure 4, un à trois stimuli géométriques abstraits sont présentés pendant respectivement une à trois secondes. Ensuite, après un délai pouvant varier d'une à quatre secondes, deux figures sont présentées à l'écran : une des figures cible, et un leurre. Le participant doit dès lors appuyer sur la figure qu'il a précédemment vue. S'il a identifié correctement la cible, il doit glisser celle-ci à son emplacement initial

sur l'écran. Il valide son choix et s'ensuit l'essai suivant (Pertzov et al., 2015). Cette tâche permet entre-autres de différencier la performance en identification d'objet, c'est-à-dire la

reconnaissance visuelle, de la reconnaissance spatiale. La performance se déclinera dès lors en 3 indices :

- La performance à l'**identification d'objets** représente le nombre d'essais correctement identifiés divisés par le nombre total d'essais.
- Les **erreurs de localisation absolue** correspondent à la distance entre la localisation rapportée de l'objet et sa véritable localisation.
- Les « **swap-errors** », faisant référence à la précision de rappel de la localisation, sans prendre en compte l'identité de l'item. Il s'agit d'une tendance des participants à rappeler une caractéristique pour un item alors qu'elle était associée à un autre item au préalable. Le pourcentage de « swap error » des participants est quantifié en comptabilisant les essais pour lesquels la cible a été correctement identifiée mais localisée dans un rayon de 4,5° degré d'angle de la position d'un des items non-cible (Pertzov et al., 2015).

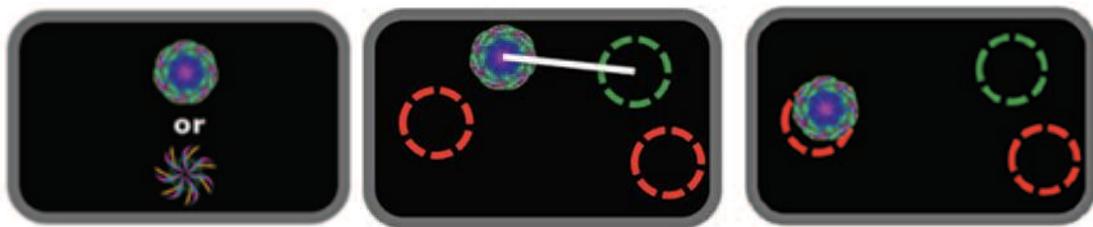


Figure 5. Représentation des 3 performances mesurées, tirée de Pertzov et al. (2015) : (1) identification de la cible correcte, (2) localisation de l'emplacement initial de la cible, prenant la distance de la cible avec le rond vert étant la réponse correcte et les rouges la localisation des distracteurs, (3) les « swap errors »,

5.2.5 Test d2 de Brinkenamp & Zillmer (1998)

Le test d2 est communément utilisé pour mesurer les processus d'attention et de concentration. Le principe de cette tâche de type papier-crayon est d'identifier tous les caractères-cibles (cf. un « d » accolé de deux traits, quelle que soit leur position) parmi des leurres (cf. des « d » ou des « p » ayant un, trois ou quatre traits). Cette tâche comporte 14 essais successifs, chacun composé de 47 items et d'une durée de 20 secondes. La « vitesse de performance » de ce test est définie comme le nombre moyen d'items traités par essai (« GZ »). La variabilité inter-essais (« SD ») est mesurée, celle-ci représentant la différence entre le plus grand nombre d'items traités et le plus petit. Dans la correction de cette tâche, un score d'erreur est également défini, comprenant le nombre d'omissions (erreurs passives) et de commissions (erreurs actives de réponse à un distracteur). Enfin, la mesure de base sera la quantité de travail

effectuée lors du temps imparti (« KL ») ; il s'agit du nombre de cibles correctement identifiées, auquel est soustrait le nombre d'erreurs (Steinborn, Langner, Flehmig & Huestegge, 2017).

5.3 Procédure expérimentale

L'expérience prenait cours à domicile, à la meilleure convenance des participants. Avant le début du testing, les volontaires remplissaient en ligne les deux questionnaires (MEQ et PSQI), afin d'établir leur éligibilité à la présente étude. Des informations démographiques leur étaient également demandées lors de cette étape (Sexe, âge, taille, poids, et niveau d'éducation). Pour les femmes, c'est également à cette étape que la date de leurs dernières règles était demandée afin de cibler la période propice pour la participation à l'étude.

Une fois enrôlés, les participants se sont vu remettre les sondes thermiques cutanées, ainsi que leurs consignes d'utilisation. Ils ont gardé ces dispositifs en tout temps pendant 3 à 5 jours consécutifs. Au cours de leur participation, les sujets acceptaient de se soumettre à quelques contraintes nécessaires au bon fonctionnement de l'étude : ne pas réaliser de sieste ; ne pas se lever plus tard que 10h du matin ; garder un rythme veille-sommeil normal (pour eux) et régulier ; ne pas consommer d'alcool ; ne pas consommer de boissons ou aliments énergisants les jours d'évaluation ; remplir un calendrier de sommeil avec leurs heures approximatives de lever et de coucher, ainsi que les moments et motifs d'enlèvement des capteurs.

La moitié des participants avaient leur premier rendez-vous à 17h (DPG bas), l'autre à 9h (DPG haut), afin de contrôler l'effet test-retest. Lors de leurs rendez-vous, les participants passaient la tâche de Pertzov et le D2. Au terme de l'expérience, les iButtons ont été récupérés, et leur cycle de température et leurs performances analysées.



5.4 Analyses statistiques

L'ensemble des analyses a été effectué sur le logiciel statistique RStudio (version 1.4.1717), ainsi que sur le programme DIFFLIMS.exe, créé et détaillé par Crawford & Garthwaite (2002). Le nettoyage et la visualisation des données de température ont été réalisés grâce au programme PyActigraphy (Hammad et al., 2020). Ce dernier nous a permis de visualiser le tracé des deux iButtons de chaque participant. Les périodes où le matériel n'était pas porté ont été retirées, ainsi que les portions aberrantes du tracé de température (chute soudaine de > 5 degrés). C'est également grâce à ce programme que nous avons moyenné les données de température par heure, pour faciliter l'analyse statistique. Enfin, il nous a permis de calculer le gradient de température distal-proximal, soustrayant la température captée par l'iButton proximal à celle captée par l'iButton distal. Cela nous fournit une valeur unique, représentative de la dynamique thermique du corps de notre participant.

Nous avons dans un premier temps réalisé une ANOVA à mesures répétées pour le décours journalier de la température en fonction de l'heure, ainsi que des test t appariés à mesures répétées pour les températures entourant les heures d'évaluation de nos participants (9h et 17h), et pour l'amplitude absolue de la température (minimum et maximum de la température).

Ensuite, nous avons fait des ANOVA à mesures répétées pour chaque performance au d2 (vitesse de performance, quantité de travail, taux d'erreur et variabilité). Une analyse single-case a été menée pour évaluer en quelle mesure les performances des participants âgés différaient ou non de celles des participants jeunes. Aussi, nous avons fait des corrélations entre différence de performances pour chaque indice de la tâche, et la différence de température entre le matin et le soir d'une part, et, d'autre part, l'amplitude absolue de la température.

Enfin, la tâche de Pertzov a été analysée de la même manière que le d2, via une ANOVA à mesures répétées avec le délai de rappel (1sec versus 4 sec), le nombre d'items (1 versus 3), la session (première ou deuxième), le chronotype (matin ou soir), ainsi que le moment de la journée (9h versus 17h) comme facteurs intra-sujet. Les facteurs inter-sujets reprenaient le moment du premier testing et le chronotype. Nous avons contrôlé le chronotype pour que le pourcentage de variance lui étant lié ne masque pas l'effet qu'on veut observer, tandis que le contrôle du moment de la première évaluation permettait de rendre compte de l'éventuel effet test-retest. L'analyse a été conduite sur chaque variable dépendante : la précision de l'identification, les erreurs de localisation absolue et les « swap errors ». À but exploratoire et illustratif, les données de 3 participants âgés ont été analysées grâce aux statistiques single-case

de Crawford & Garthwaite (2002). De cette manière, les prémisses d'une comparaison « participants jeunes » versus « participants âgés » peuvent être émises. En dernier lieu, nous avons réalisé des corrélations entre les différences de performances selon que l'évaluation prenne cours le matin ou le soir, et la différence de température de ces deux moments. Une corrélation entre différence de performance et différence entre maximum et minimum de la température a également été conduite.

6 Résultats

6.1 Température

Le décours temporel du gradient de température chez les jeunes est visible en bleu ci-contre, dans la Figure 6. On observe une courbe circadienne, une ANOVA à mesures répétées montrant un effet significatif de l'heure sur la température mesurée ($F=12.12$; $p<0.001$). On observe également une différence significative entre le minimum et le maximum du gradient de température distal-proximal (DPG, $t=17,331$; $p<0.001$), ainsi qu'entre les moments d'évaluation ($t=2,8104$; $p=0,01$).

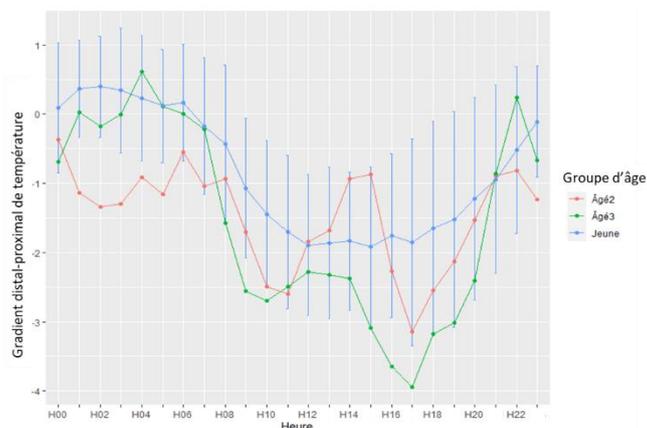


Figure 6. Décours temporel du DPG au cours d'une journée de 24 heures pour le groupe de participants jeunes, et les deux participants âgés retenus.

En ce qui concerne les âgés, seuls 2 participants sur 3 étaient éligibles à l'analyse du décours de température, un iButtons défectueux rendant l'analyse du DPG irréalisable pour le premier participant âgé. Pour les deux sujets retenus, nous avons pu illustrer, par une analyse single-case de Crawford & Garthwaite (2002), qu'ils présentaient une amplitude de température relative (entre les heures d'évaluation) et absolue (minimum et maximum) significativement différente de celle appartenant à l'échantillon de participants jeunes. En ce qui concerne le deuxième participant âgé, son amplitude circadienne absolue (la différence entre minimum et maximum du DPG) est significativement plus petite que celle des jeunes (5.163 ± 1.387 °C) tandis que son amplitude entre les deux moments de testing est significativement plus grande que celle des jeunes (0.780 ± 1.596 °C). Le troisième participant âgé présente des amplitudes relative et absolue significativement supérieures à celles des jeunes.

	<i>Amplitude absolue</i>		<i>Amplitude relative</i>	
	<i>Valeur</i>	<i>Significativité</i>	<i>Valeur</i>	<i>Significativité</i>
Âgé 2	3.783°C	$t = -18,376$; $p<0.001$	2.271°C	$t = -8,839$, $p<0.001$
Âgé 3	6.039°C	$t = -3,136$; $p=0.006$	1.529°C	$t = -4,584$; $p<0.001$

Le décours temporel des variations de leur DPG est visible, en traits rouge et vert, sur le graphe ci-dessus. Nous pouvons noter un rebond du DPG aux environs de 14-15h pour le participant âgé 2, ce phénomène n'étant pas attribué à un élément clairement identifiable.

6.2 d2

L'analyse ANOVA à mesures répétées des différentes performances a montré, pour l'échantillon de jeunes participants, qu'une différence significative existait entre les deux moments d'évaluation pour la vitesse de traitement ($F=5.599$; $p=0.023$), l'indice de concentration et de travail accompli ($F=9.724$; $p=0.004$) et le pourcentage d'erreur ($F=4.472$; $p=0.041$), mais pas pour la variabilité de rapidité ($F=1.518$; $p=0.225$). Les performances moyennes par session ont été représentées ci-dessous, dans la Figure 7. De plus, nous avons pris en compte le moment de la première évaluation en tant que facteur inter-sujet. Ce dernier ne montre pas d'effet principal significatif, ni d'effet d'interaction avec le moment d'évaluation, indiquant dès lors un effet test-retest : le taux d'erreur diminue en second testing tandis que les indices de rapidité et de concentration augmentent.

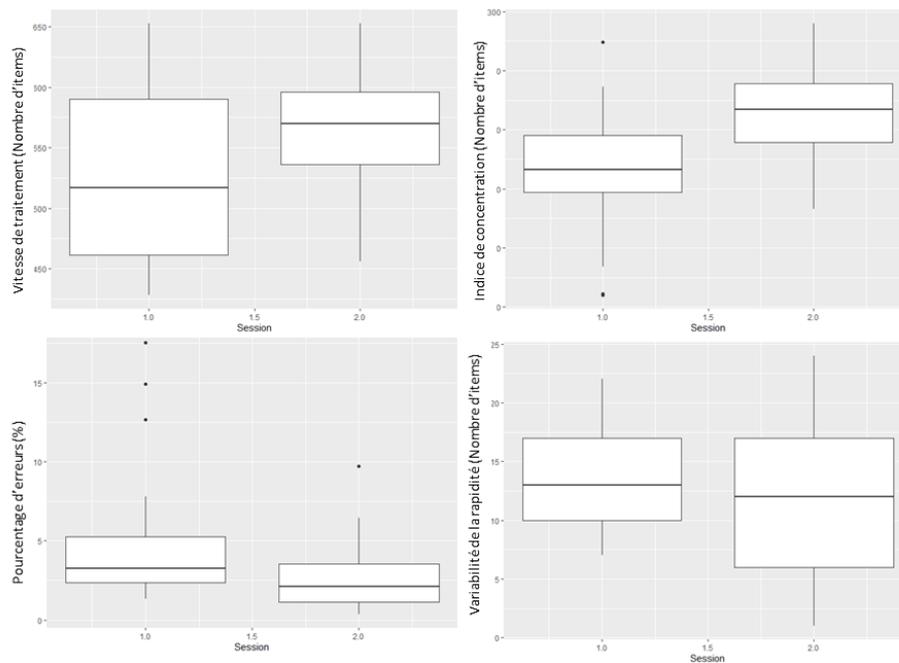


Figure 7. Performances aux différents indices de la tâche d2 chez les participants jeunes.

Une analyse single-case a été menée pour les données des trois participants âgés de notre échantillon. Cela a permis de mettre en évidence qu'en ce qui concerne les participants âgés, et pour chaque indice :

- **Vitesse de traitement** : seul un participant sur trois ne diffère pas significativement du groupe de jeunes (44.952 ± 37.391). Les deux autres participants ont une différence de performance non seulement supérieure à celle des jeunes, mais aussi de sens inverse. Ils performant moins bien à la deuxième session d'évaluation qu'à la première en termes de vitesse.

<i>Âgé 1</i>	-53	t=-3.603 ; p=0.002
<i>Âgé 2</i>	-74	t=-4.119 ; p=0.001
<i>Âgé 3</i>	77	t=-0.07 ; p=0.9451

- **Variabilité de rapidité** : aucun participant âgé ne diffère significativement de la population jeune (-2.143 ± 7.171).

<i>Âgé 1</i>	-2	t=-0.167 ; p=0.869
<i>Âgé 2</i>	10	t=-1.605 ; p=0.126
<i>Âgé 3</i>	6	t=-1.255 ; p=0.226

- **Pourcentage d'erreurs** : deux participants âgés diffèrent significativement de la population jeune (-2.421 ± 3.550), avec une différence de performance n'allant pas dans le même sens. Au contraire des participants jeunes, les deux participants âgés ont un plus grand taux d'erreurs lors de la deuxième passation.

<i>Âgé 1</i>	-8.606%	t=-0.047 ; p=0.963
<i>Âgé 2</i>	1.523%	t=-2.274 ; p=0.036
<i>Âgé 3</i>	3.082%	t=-2.853 ; p=0.011

- **Indice de concentration (travail réalisé)** : deux participants diffèrent significativement de l'échantillon de participants jeunes (47.429 ± 36.170). Le sens de la relation entre leurs deux évaluations n'est pas le même que celui des participants jeunes : ils ont un moins bon indice de concentration lors du deuxième testing.

<i>Âgé 1</i>	64	t=-0.451 ; p=0.657
--------------	----	--------------------

Âgé 2	-27	t=-2.504 ; p=0.0211
Âgé 3	-21	t=-2.367 ; p=0.0281

Enfin, nous avons réalisé une analyse corrélacionnelle afin de déterminer si les différences de performances étaient liées à l'amplitude relative (différence de température corporelle entre les heures d'évaluation) et/ou à l'amplitude absolue (différence entre minimum et maximum du DPG sur la journée). La normalité des scores de chaque test a été évaluée par un test de Shapiro-Wilk. Un test corrélacionnel de Pearson a été réalisé pour les données étant normalement distribuées, tandis que celles qui ne l'étaient pas ont été analysées grâce à une corrélation de Kendall.

Dans un premier temps, nous avons investigué les différences de scores de performances entre matin et soir, en lien avec la température mesurée à ces moments précis. Les analyses ont montré que la différence de pourcentage d'erreur entre les deux sessions est négativement corrélée au DPG des heures d'évaluation ($r_{\tau} = -0.272$; $p=0.017$) : plus le DPG est haut, moins l'individu réalise d'erreurs (cf. Figure 8 ci-contre). Cela reflète le fait suivant : les participants se trompent le moins lorsque la température distale est haute et la température proximale basse. Cela est souvent associé à un signal circadien plus fort, reflété par une augmentation de la température corporelle (Burke et al., 2015 ; Gaggioni et al., 2014). En revanche, la mesure de travail réalisé, reflétant la concentration, n'est pas corrélée à la différence de gradient de température entre matin et soir ($r=0.174$; $p=0.297$). La vitesse de traitement ($r=0.001$; $p=0.994$), et la variabilité de rapidité ($r=0.133$; $p=0.425$) ne sont pas corrélées à la différence de DPG entre matin et soir.

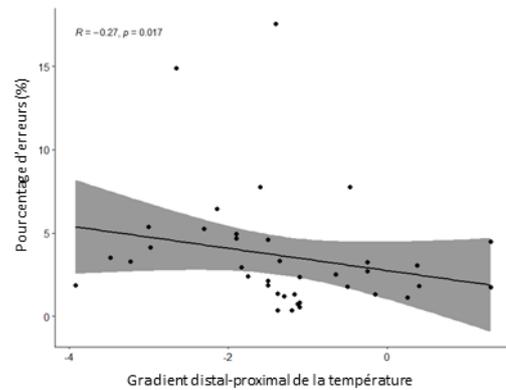


Figure 8. Corrélation entre le pourcentage d'erreurs commises et le gradient de température chez les jeunes participants

Ensuite, les analyses de corrélation entre la différence des scores aux indices de la tâche d2 et la différence entre le maximum et minimum du DPG n'ont montré aucun effet significatif. Nous ne pouvons dès lors pas conclure en l'existence d'un lien entre l'amplitude de la variation thermique du corps, reflétant le rythme circadien, et les performances attentionnelles du d2.

6.3 Pertzov

6.3.1 Identification

L'ANOVA à mesures répétées a montré des effets principaux significatifs de l'intervalle entre la présentation des stimuli et le choix ($F=13.323$; $p<0.001$) et du nombre d'items ($F=37.009$; $p<0.001$), contrairement au moment du testing qui ne présente pas d'effet ($F=0.796$; $p=0.374$). L'identification est moins bonne quand le délai est long, et quand le nombre d'items augmente. Cette analyse met également en évidence un effet d'interaction entre l'intervalle et le nombre d'items ($F=17.112$; $p<0.001$), de sorte que la performance se dégrade d'autant plus si on associe un long intervalle à la présentation de 3 items. Enfin, un effet d'interaction entre le moment du testing et l'intervalle est observé ($F=15.313$; $P<0.001$). La performance aux intervalles plus longs est plus basse lors de l'évaluation matinale, tandis que la performance aux intervalles plus courts n'est pas modulée par le moment du testing.

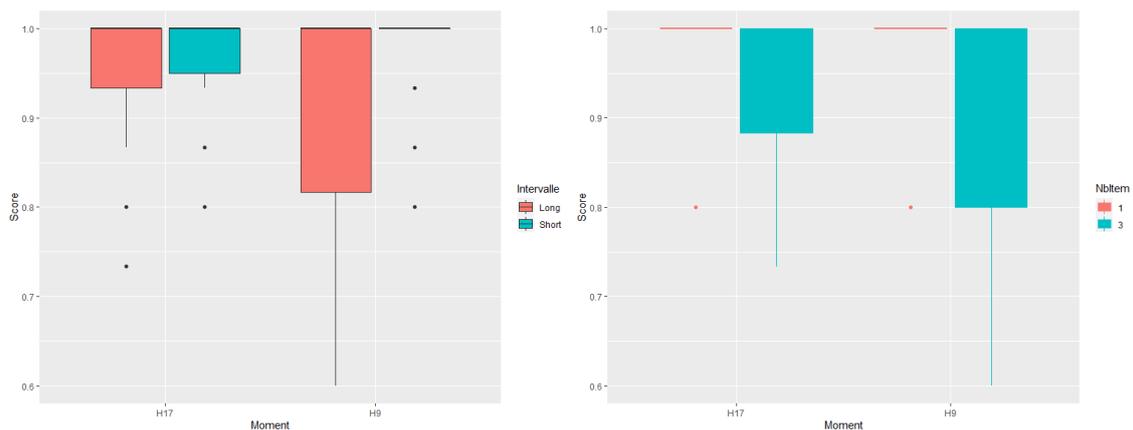


Figure 9. Score d'identification à la tâche de Pertzov selon l'intervalle de rétention de l'information (gauche) et du nombre d'items présentés (droite), chez le groupe de participants jeunes.

L'analyse DIFFLIM n'a pu être réalisée que pour 2 des 3 participants âgés. En effet, les données relatives à la deuxième évaluation de la tâche Pertzov n'a pas pu être enregistrée adéquatement pour le sujet âgé 2. L'analyse des données des deux autres participants a révélé qu'ils ne diffèrent significativement des sujets jeunes que lorsque le délai court est appliqué à la présentation de 3 items (0.006 ± 0.076) : ils ont une différence de performance supérieure (âgé 1 = 0.267 ; âgé 2 = 0.200).

	Délai court		Délai long	
	1 item	3 items	1 item	3 items
Âgé 1	$t=-1.721$; $p=0.1$	$t=-2.707$; $p=0.014$	$t=-0.06$; $p=0.95$	$t=-1.516$; $p=0.145$

Âgé 3	t=-0.116 ; p=0.91	t=-2.280 ; p=0.034	t=-1.355 ; p=0.19	t=-0.221 ; p=0.827
-------	-------------------	--------------------	-------------------	--------------------

6.3.2 Localisation

L'ANOVA à mesures répétées montre un effet principal significatif de l'intervalle ($F=11.464$; $p<0.001$) et du nombre d'items présentés ($F=107.511$; $p<0.001$) sur les performances de localisation, mais pas d'effet principal du moment du testing ($F=0.141$; $p=0.707$). Les participants produisaient plus d'erreurs de localisation lorsque le délai était long, mais également si nous leur présentions 3 items plutôt qu'un seul. Nous observons, à l'instar des performances d'identification, un effet d'interaction entre l'intervalle et le nombre d'items ($F=10.102$; $p=0.002$). La performance se dégrade davantage pour 3 items que pour un seul, quand l'intervalle est long.

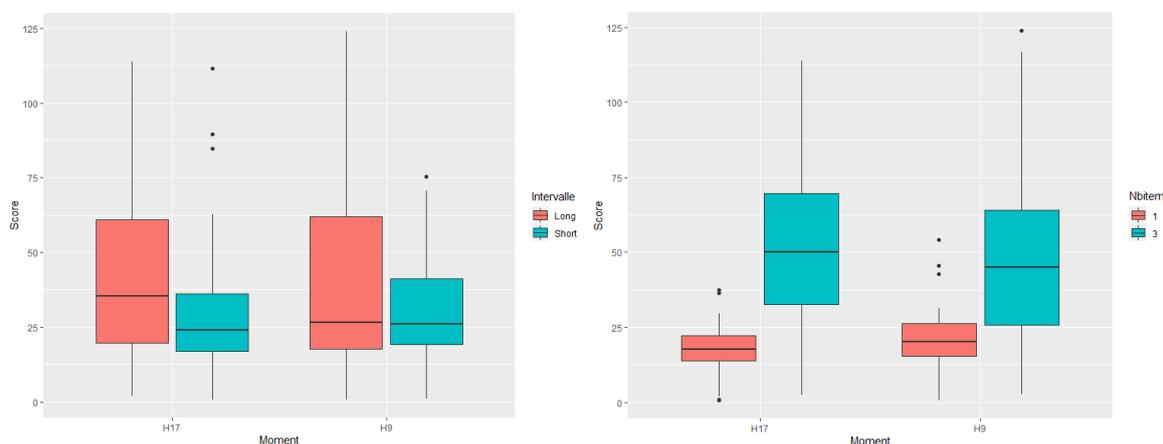


Figure 10. Score de localisation (erreurs) selon l'intervalle de rétention de l'information (gauche) et le nombre d'items présentés (droite), chez le groupe de jeunes participants.

La différence de performance entre les deux sessions de testing des participants âgés est significativement inférieure à celle des sujets jeunes pour l'application d'un délai long à la présentation de 3 items (-10.351 ± 27.816). Aussi, seule la présentation de 3 items avec un délai court ne produit aucune différence significative avec l'échantillon de participants jeunes. Pour le délai court avec 1 item, le premier participant âgé présente une différence de performance significativement supérieure à l'échantillon de sujets jeunes. Nous observons également, chez le même participant, une différence significative pour le délai long appliqué à 1 item : la relation est inversée, à savoir qu'il performe mieux à la première session qu'à la deuxième.

	Délai court		Délai long	
	1 item	3 items	1 item	3 items
<i>Âgé 1</i>	t=-3.012 ; p=0.007	t=-1.953 ; p=0.065	t=-3.211 ; p=0.004	t=-2.857 ; p=0.01
<i>Âgé 3</i>	t=-0.487 ; p=0.632	t=-0.97 ; p=0.344	t=-1.575 ; p=0.13	t=-2.657 ; p=0.015

6.3.3 Swap Error

Nous avons mis en évidence, grâce à une ANOVA à mesures répétées, un effet principal de l'intervalle sur le nombre de « swap errors » ($F=5.056$; $p=0.028$). Plus d'erreurs sont commises lorsque l'intervalle est court. Aucun autre effet significatif n'a été observé. Pour rappel, ce sont les erreurs de localisation sans prendre en compte l'identité de l'item.

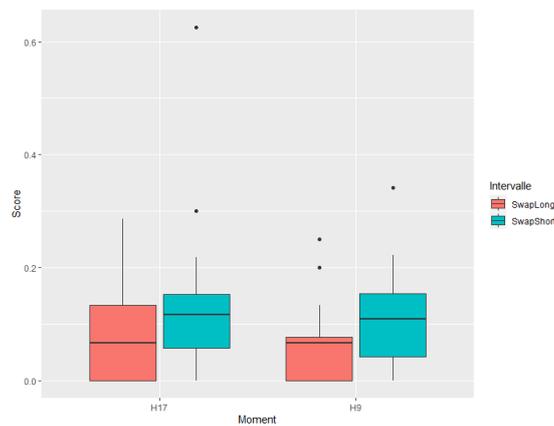


Figure 11. Nombre de "swap errors" à la tâche de Pertzov, selon l'intervalle de rétention de l'information, chez les participants jeunes.

Les personnes âgées, selon l'analyse single-case, ne diffèrent pas significativement des participants jeunes pour le nombre de « swap errors » : la différence de performance entre les deux sessions d'évaluation n'est pas significative.

	Délai court	Délai long
<i>Âgé 1</i>	t=-0.017 ; p=0.987	t=-0.370 ; p=0.716
<i>Âgé 3</i>	t=-0.492 ; p=0.628	t=-1.529 ; p=0.142

6.3.4 Lien avec la température

Des analyses corrélationnelles ont été réalisées sur RStudio afin de déterminer le lien entre performances et amplitude absolue et/ou relative de température corporelle (DPG).

Comme pour les analyses de corrélation réalisées sur les performances au d2, la normalité des données a été évaluée par un test de Shapiro-Wilk et le type de corrélation appliquée a été adaptée en fonction de cette information.

Pour la plupart, les différences de performances à la tâche de Pertzov ne sont pas corrélées à la différence de température corporelle entre les deux moments de testing. Seules les performances de localisation pour 3 items avec long intervalle sont négativement corrélées à la différence du DPG entre les moments d'évaluation ($r = -0.355$; $p = 0.029$), ainsi que les swapping errors pour les courts intervalles ($r_{\tau} = -0.239$; $p = 0.04$). Cela reflète la tendance qu'ont eu nos participants à réaliser moins d'erreurs lorsque leur DPG augmente : une température distale supérieure à la température proximale permettrait d'avoir de meilleures performances (cf. Figure 12).

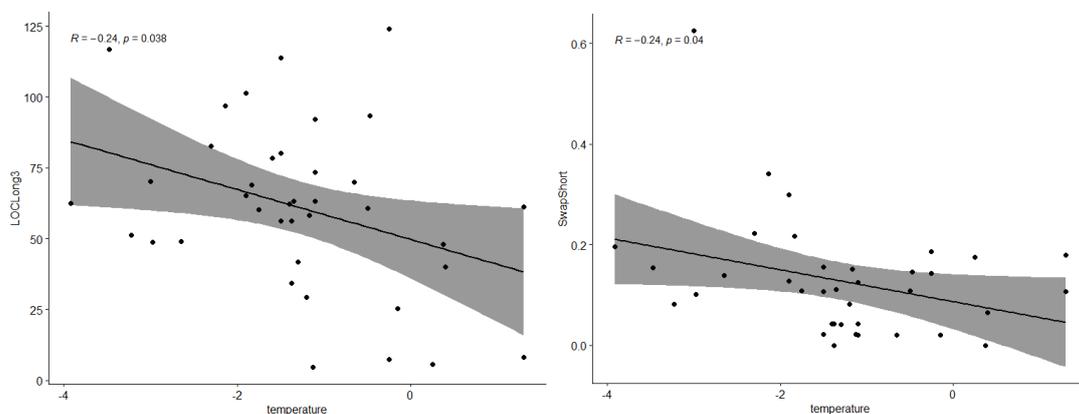


Figure 12. Corrélation entre le gradient distal-proximal de température et la performance de localisation pour 3 items et long intervalle (gauche), et pour le nombre de "swap errors" avec intervalle court (droite), chez les jeunes participants.

Les analyses corrélationnelles ont pu montrer un lien entre l'amplitude absolue du gradient de température corporelle (différence entre minimum et maximum du DPG au cours de la journée) et la performance de localisation pour 1 item avec un intervalle court ($r_{\tau} = 0.394$; $p = 0.019$) et long ($r = 0.529$; $p = 0.02$). Pour ces deux indices, nous observons qu'au plus la différence entre le minimum et le maximum du gradient de température corporelle est élevée, meilleures sont les performances. Tous les autres indices de performances de cette tâche ont révélé des corrélations non significatives avec l'amplitude absolue de température.

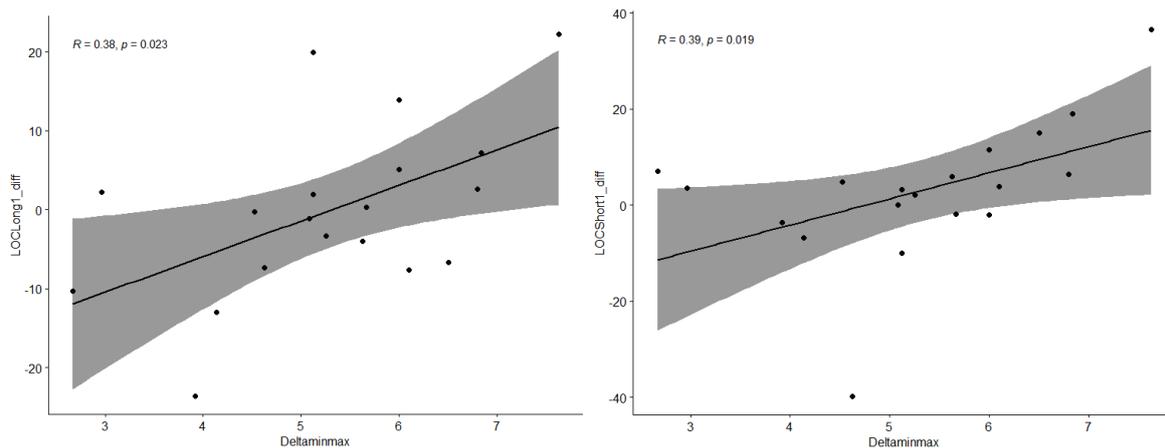


Figure 12. Corrélation entre l'amplitude absolue du gradient distal-proximal de la température et la différence de performance à la localisation d'1 item avec intervalle long (gauche) et intervalle court (droite), chez les participants jeunes.

7 Discussion

7.1 Rappel des objectifs de l'étude et de l'hypothèse

Dans cette étude, nous avons examiné l'impact du rythme circadien, traduit par les variations de température corporelle, sur les capacités attentionnelles et les capacités de mémoire de travail visuo-spatiale. Cette dernière était évaluée pour la capacité à se rappeler l'identité d'items abstraits et leur localisation dans l'espace, mais aussi pour l'association de ces deux informations. Pour ce faire, nous avons mesuré les températures corporelles distale (poignet controlatéral) et proximale (zone claviculaire controlatérale) en tout temps entre 3 et 5 jours. La tâche d2 (Brinkenamp & Zillmer, 1998) et la tâche de Pertzov (Pertzov et al., 2015) ont été administrées à deux reprises, sur deux jours distincts, pour évaluer la différence de performance entre un gradient de température distal-proximal haut (9H00) et bas (17H00). De plus, nous voulions investiguer l'impact qu'aurait le vieillissement sur la relation entre les performances de mémoire de travail visuelle et le rythme circadien. Cela n'a été possible qu'à titre exploratoire, étant donné le fait que la crise de COVID-19 n'a permis de recruter que 3 participants âgés sur les 20 initialement espérés.

Nos hypothèses stipulaient que nous observerions un rythme circadien via les mesures de températures, et plus précisément grâce à l'utilisation du gradient de température distal-proximal. Dans ce cas, la différence entre le DPG des deux moments de tests, ainsi que l'amplitude absolue du DPG, serait significative. Nous prévoyions que l'amplitude circadienne

des participants âgés serait réduite par rapport à celle des sujets jeunes. Aussi, les performances, tant au niveau de la tâche d2 que de la tâche de Pertzov, seraient meilleures à 17H qu'à 9H, suivant la courbe circadienne de la température : les participants seraient plus rapides et commettraient moins d'erreurs au d2, tandis qu'ils identifieraient et localiseraient plus justement les items à la tâche de Pertzov. Enfin, nos hypothèses proposaient que les performances des âgés seraient, à l'instar de leur rythme circadien, moins variables entre les deux évaluations.

7.2 Interprétation des résultats

7.2.1 Température

La modulation de la température corporelle, représentée par la valeur du gradient proximal-distal de température, présente une modulation circadienne au cours d'une journée de 24h. Le DPG est initialement à son maximum aux alentours de 2h du matin, pour décliner jusqu'à atteindre son minimum aux environs de 15h. Cela traduit la tendance corporelle à avoir une température corporelle (proximale) en fin de journée, signe que le signal circadien est plus fort et contrecarre la pression de sommeil qui s'accumule. Aussi, nous pouvons observer clairement le phénomène de réchauffement distal, la chaleur se dissipant par vasodilatation dans les membres, au cours de la nuit. Cela est une caractéristique typique et nécessaire au sommeil et à l'endormissement. A but illustratif, nous pouvons voir le décours temporel du gradient distal-proximal d'un de nos participants jeunes au cours de 24h, ci-dessous (cf. Figure 14).

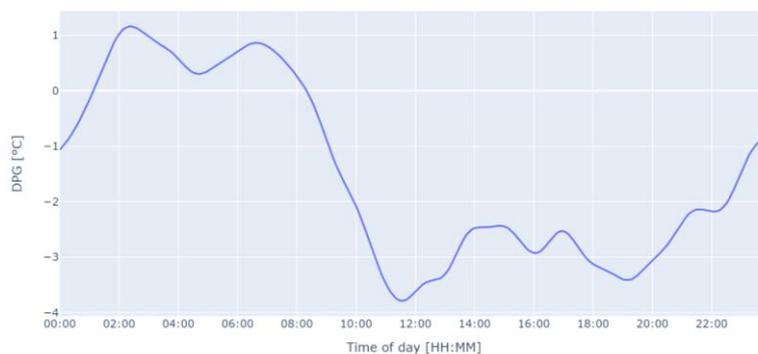


Figure 13. Illustration du décours temporel du gradient distal-proximal de la température d'un jeune participant (RCAM 24), sur une journée de 24h.

En ce qui concerne les personnes âgées, notre faible échantillon semble présenter une amplitude circadienne supérieure à celle de nos participants jeunes. Cela va à l'encontre de la littérature, qui stipule, à contrario, que le vieillissement s'accompagne d'une diminution de l'amplitude circadienne (Refinetti & Menaker, 1992 ; Weinert & Waterhouse, 2007). Cela devrait se traduire dès lors par une différence amoindrie entre les températures maximale et minimale. Par ailleurs, le décours temporel d'un de nos participants âgés présentait un rebond aux environs de 14-15h. Il est tout à fait probable que celui-ci soit dû à une sieste (bien que proscrite par la procédure expérimentale), une activité physique plus grande, le phénomène de « post-lunch dip », un changement de température ambiant extrême, ou autre. Les présentes analyses ne permettent pas d'investiguer plus profondément ce phénomène, de l'expliquer ou d'en vérifier la généralisation. Cependant, l'analyse effectuée sur base des données de nos participants âgés ne comprend pas un échantillon valable en termes statistiques, ce qui ne permet pas de tirer de conclusions concernant les éléments relevés ici. Un échantillon de puissance suffisante (initialement estimé à 20) serait nécessaire pour infirmer ou confirmer une tendance de modification d'amplitude circadienne.

7.2.2 Tâche d2

Au terme de nos analyses statistiques, il ressort que la performance globale à la tâche de d2 n'est pas soumise à une influence du moment d'évaluation. En revanche, nous observons un effet test-retest : nos participants performant significativement mieux lors de leur deuxième évaluation, quelle que soit l'heure à laquelle celle-ci a lieu. Cela va à l'encontre de nos hypothèses, selon lesquelles nos participants auraient eu de meilleures performances au cours de l'évaluation en soirée. Qui plus est, nous n'observons pas non plus une différence de performance entre les indices de vitesse de traitement et de précision, comme nous l'avions initialement supposé. Il reste tout à fait probable qu'aucun effet de la modulation circadienne n'ait été observé par manque de puissance de nos échantillons statistiques, ou parce que la tâche n'est pas suffisamment sensible pour rendre compte de modifications plus subtiles de l'attention chez nos jeunes participants.

Les participants âgés semblaient, bien qu'analysés de façon exploratoire, présenter des relations opposées entre leurs deux testings par rapport à nos sujets jeunes. En effet, ceux-ci performaient mieux à la première session qu'à la deuxième. Il est d'ailleurs intéressant de noter que tous nos participants âgés étaient premièrement testés à 17h, et deuxièmement à 9h. Cela

irait dès lors dans le sens de nos hypothèses : de meilleures performances seraient observées en soirée qu'en matinée, au cours de laquelle le signal circadien est plus fort. Cela est corroboré par le fait que nos participants âgés semblaient présenter une amplitude circadienne supérieure à celle de nos participants jeunes, chez qui aucun effet du moment du testing n'a été observé. Cependant, les sujets âgés de cette étude se levaient en moyenne à 8h36. Il est possible que cette baisse de performance lors du deuxième testing, à 9h du matin, soit imputable à l'inertie de sommeil. Il a effectivement été démontré que cette dernière a un effet délétère sur les performances cognitives, y compris les processus attentionnels (Burke et al., 2015). Néanmoins, rappelons que ces données restent à but purement exploratoire et ne permettent pas de confirmer un réel effet. Il serait intéressant de confirmer cette tendance avec un échantillon de personnes âgées plus fourni.

7.2.3 Tâche de Pertzov

L'analyse des performances à la tâche de Pertzov a montré que le nombre d'items et l'intervalle de rétention d'information étaient significatifs pour les performances d'identification (choisir quelle cible était présente à l'écran) et de localisation (replacer la cible à son emplacement initial sur l'écran). Cela montre la tendance selon laquelle l'augmentation de la charge mentale (nombre d'items à retenir) et le temps de rétention (intervalle) affectent négativement la performance au calepin visuo-spatial. Qui plus est, l'association d'un long intervalle et d'un nombre supérieur d'informations à retenir faisaient significativement baisser la performance. Cela mène à conclure que plus la tâche se complique, plus les performances des participants diminuent. Toutefois, il est intéressant de remarquer que le moment de l'évaluation interagit avec l'intervalle de rétention, pour les performances d'identification : les performances d'identification de la cible étaient meilleures à 17h qu'à 9h, pour les longs intervalles de rétention d'informations. Cela va dans le sens de nos hypothèses, bien que cela n'implique qu'une partie des résultats de la tâche. En effet, nous avions prédit une meilleure identification le soir que le matin. Dès lors, il semblerait qu'il faille augmenter la difficulté de la tâche (cf. augmenter l'intervalle de temps au cours duquel le participant doit retenir l'information en mémoire) pour qu'un effet du moment de la journée puisse être observé. Aucun effet similaire n'a été démontré concernant les performances de localisation.

A nouveau, nos participants âgés ont montré une relation inverse entre leurs deux sessions d'évaluation cognitive comparément à nos participants jeunes, et cela principalement

pour la performance de localisation de la cible. Cela renforce la tendance observée préalablement au d2 : les sujets âgés de cette étude performant mieux à 17h. La même logique peut être appliquée pour esquisser une explication de ce phénomène, à savoir que notre échantillon est loin d'être représentatif et statistiquement pertinent. De plus, il pourrait également s'agir d'un effet d'inertie du sommeil, le délai entre le début de l'évaluation et le réveil moyen étant inférieur à 30 minutes.

7.2.4 Lien entre performances aux tâches cognitives et température

Les corrélations entre performances cognitives et température corporelle ne suivent pas tout à fait le sens de nos hypothèses. En effet, nous n'avons pas pu clairement démontrer un lien certain entre les deux, encore moins le fait que les performances attentionnelles et au calepin visuo-spatial suivent la courbe de température de nos participants comme nous l'avions initialement prévu dans nos hypothèses.

Concernant la tâche du d2, nous observons un éventuel effet du signal circadien sur le taux d'erreurs commises. En effet, cet indice est corrélé négativement au DPG. Selon cette relation, nos participants commettent moins d'erreurs lorsque le DPG augmente. Les performances seraient dès lors meilleures en début de journée (DPG haut), par rapport à la fin de journée (DPG bas). Cela va à l'encontre de nos hypothèses et ne s'explique pas par le fait qu'en fin de journée, le signal circadien augmente pour contrecarrer la pression de sommeil (Dijk et al., 1992 ; Gaggioni et al., 2014 ; Schmidt & Collette, 2016). Cela se traduit par une augmentation de la chaleur du corps, principalement dans les zones proximales.

De plus, la tâche de Pertzov révèle des corrélations intéressantes entre le gradient de température et les indices de performance. Au plus le DPG augmente, meilleures sont les performances de localisation : les participants font moins d'erreurs de localisation (uniquement valable pour l'intervalle long appliqué à 3 items) et moins de « swap errors » (pour l'intervalle court). Comme la logique précédemment proposée, nous ne pouvons pas expliquer cela par un effet du signal circadien augmentant la température basale en fin de journée et permettant de contrecarrer le besoin de sommeil grandissant, aboutissant dès lors pour l'évaluation de 17h, à une amélioration de ces performances. Il se pourrait que cela soit plutôt dû à l'absence de pression de sommeil d'une part, et/ou d'une vigilance intacte en début de journée. Des analyses plus poussées seraient nécessaires pour expliquer ce phénomène. Il serait tout à fait judicieux d'investiguer la corrélation des performances avec de la température distale, d'une part, et

d'autre part, la température proximale. Le DPG, bien qu'utile, reste une mesure globale qui ne permet pas une analyse fine des interactions entre les différents sites de la température.

Il nous semble également très intéressant de mentionner la corrélation significative entre les performances de localisation (intervalle court et long, appliqués à 1 item) et l'amplitude absolue de température. Selon ces résultats, il semblerait qu'avoir une plus grande amplitude de température serait bénéfique pour les performances de localisation à la tâche de Pertzov. L'amélioration de la performance entre les deux sessions serait fonction de l'ampleur de l'amplitude de température. Cela ouvre des perspectives intéressantes de recherche. Si nous suivons la logique selon laquelle le vieillissement s'accompagne d'une diminution de l'amplitude circadienne, il serait judicieux de confirmer ce constat de la littérature par un échantillon de participants âgés adéquats, et d'en investiguer la corrélation avec les performances aux tâches utilisées dans le présent travail.

7.3 Limites de l'étude et critiques de la méthode

Notre paradigme expérimental nous a permis d'avoir une bonne validité écologique, étant donné que les participants portaient les outils et étaient testés à domicile. Cependant, ce testing à distance ne permettait pas de contrôler parfaitement le bon respect du protocole expérimental et des conditions de passation. En outre, il n'était pas possible de vérifier le cycle réel de veille-sommeil et nous devons considérer comme vrai le calendrier de veille-sommeil qu'ils nous rendaient. Il n'était toutefois pas envisageable de conduire cette expérience, au vu de sa longueur, dans un laboratoire ; et ce pour des raisons évidentes de moyens. De plus, il n'est, à notre sens, pas nécessaire de le faire, puisque des mesures supplémentaires de contrôle suffiraient à garantir la bonne compliance de nos participants : par exemple, il serait loisible d'utiliser un système de contrôle de leur activité, l'actimétrie, pour contrôler leur niveau d'activité diurne et approximer leur temps de sommeil nocturne. L'étude de l'activité, rendue possible grâce au port d'une montre dotée d'un accéléromètre, permet la mesure du niveau d'activité en continu de nos participant. Cela permettrait aussi de détecter d'éventuelles siestes, interdites au cours de l'étude. Cela admet non seulement le contrôle du respect des conditions expérimentales, mais également l'analyse corrélationnelle entre cycle d'activité et cycle de température. Quant autres conditions expérimentales telles que l'interdiction de consommer de l'alcool et/ou des substances énergisantes, la confiance devra rester de mise. Notons que nos

participants portaient un actimètre au cours de notre étude, mais que l'analyse de ces données sortait du cadre de la présente étude. Une seconde étude, prenant en compte l'analyse des données d'actimétrie, pourrait être envisageable pour répondre à cette première limite. Toutefois, gardons à l'esprit que le présent protocole ne permet pas de mettre entièrement en lumière l'effet du rythme circadien sur les performances cognitives, celui-ci interagissant continuellement avec d'autres processus tels que la pression homéostatique, l'inertie de sommeil et la qualité de sommeil (Burke et al., 2015). Seule une procédure de désynchronie forcée permet de les identifier séparément, mais cela n'est pas le but de cette étude qui se veut écologique et reflétant la vie quotidienne de nos participants.

De plus, une limite certaine de la présente étude est que nous n'avons pu recruter que 3 participants âgés. Cela a rendu impossible tout un pan d'analyse, à savoir une comparaison valide du rythme circadien d'une part, et des performances aux tests d'autre part, entre nos deux groupes. Cela ouvre une voie d'investigation pour une étude subséquente, dans laquelle le nombre de participants requis serait atteint et rendrait faisable une réelle analyse des différences entre âgés sains et jeunes.

Enfin, une limite supplémentaire réside dans le fait que les deux évaluations étaient conduites à un seul jour d'écart. Pour les participants ayant leur premier test à 17H, cela ne représentait donc qu'un écart de 16 heures. Pour mieux faire, bien que cela ne fut pas possible dans cette expérience étant donné le temps limité pour les acquisitions, il aurait été préférable que les évaluations soient espacées d'au moins plusieurs jours afin de limiter l'effet test-retest.

7.4 Perspectives futures

La reproduction de la présente étude, en prenant en considération la correction des limites méthodologiques observées, serait intéressante. Il serait tout à fait pertinent de la reproduire en recrutant un nombre suffisant d'individus pour intégrer le groupe de « sujets âgés », afin d'investiguer réellement l'impact du vieillissement sur l'interaction entre rythme circadien et mémoire de travail visuelle. Il pourrait également être pertinent d'ajouter des évaluations supplémentaires au paradigme expérimental, comme l'actimétrie, ainsi que des évaluations plus précises de la somnolence et de la vigilance, souvent utilisées en étude du sommeil, telles que la KSS (Karolinska Sleepiness Scale ; évaluant la somnolence subjective) et/ou la PVT (Psychomotor vigilance task ; évaluant la vigilance). Aussi, il conviendrait d'établir un seuil de

correction pour les comparaisons multiples, voire d'appliquer des statistiques multivariées à la base de données, ce qui n'a pas été réalisé dans le présent travail. Qui plus est, la reproduction de la présente étude avec une analyse statistique plus poussée et détaillée serait d'un évident bénéfice. En effet, investiguer par exemple le lien entre performances et températures distales et proximales individuellement pourrait rendre compte de phénomènes et tendances non reflétées par l'utilisation du gradient de température distal-proximal, bien que celui-ci ait été validé par la littérature (Kräuchi et al., 2006).

Une perspective d'étude future, au-delà du fait de reproduire la présente expérience, serait d'investiguer le lien entre rythmicité circadienne de la température et performances en mémoire de travail chez des individus âgés sains, mais également chez des personnes âgées ayant un MCI (Mild Cognitive Impairment) et une maladie d'Alzheimer. En effet, il est reconnu que cette pathologie est associée à une altération importante du rythme circadien (van Someren et al., 1996). Il serait dès lors intéressant d'investiguer les possibles variations de performances en lien avec ce rythme circadien ; certains moments de la journée étant peut-être plus propices que d'autres à l'évaluation des réelles capacités cognitives du participant atteint de MCI ou de la maladie d'Alzheimer.

8 Conclusion

Le calepin visuo-spatial n'est pas impacté dans sa globalité par la modulation circadienne de la température corporelle. Les performances de localisation semblent partiellement liées au moment de la journée durant lequel l'évaluation prend cours, mais également à l'amplitude absolue de la variation de température. Les processus attentionnels mesurés par le test d2 ne sont, quant à eux, pas influencés par le rythme circadien de la température, mais sont soumis à un effet de test-retest, selon notre étude. Si nous avons toutefois démontré quelques effets de la température sur certaines performances, ils pourraient s'expliquer par des limites méthodologiques ou par un manque de sensibilité des tâches cognitives choisies, d'où l'intérêt de reproduire cette étude en prenant en considération les propositions d'amélioration abordées dans la discussion. Qui plus est, aux effets intéressants que nous avons pu relever s'ajoutent les prémisses de différences entre participants âgés et jeunes, qui ouvrent la voie à une étude subséquente, approfondissant l'ampleur de l'impact du vieillissement sur le rythme circadien et les performances en mémoire de travail visuo-spatiale.

9 Bibliographie

- Baker, F. C., & Driver, H. S. (2007). Circadian rhythms, sleep, and the menstrual cycle. *Sleep Medicine*, 8(6), 613-622. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2006.09.011>
- Baker, F. C., Sattari, N., de Zambotti, M., Goldstone, A., Alaynick, W. A., & Mednick, S. C. (2019). Impact of sex steroids and reproductive stage on sleep-dependent memory consolidation in women. *Neurobiology of Learning and Memory*, 160, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2018.03.017>
- Borbély, A. A. (1982). A two process model of sleep regulation. *Human Neurobiology*, 1(3), 195-204.
- Burke, T. M., Scheer, F. A. J. L., Ronda, J. M., Czeisler, C. A., & Wright, K. P. (2015). Sleep inertia, sleep homeostatic and circadian influences on higher-order cognitive functions. *Journal of Sleep Research*, 24(4), 364-371. <https://doi.org/10.1111/jsr.12291>
- Buysse, D. J., Reynolds, C. F., Monk, T. H., Berman, S. R., & Kupfer, D. J. (1989). The Pittsburgh Sleep Quality Index : A new instrument for psychiatric practice and research. *Psychiatry Research*, 28(2), 193-213. [https://doi.org/10.1016/0165-1781\(89\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0165-1781(89)90047-4)
- Crawford, J. R., & Garthwaite, P. H. (2002). Investigation of the single case in neuropsychology : Confidence limits on the abnormality of test scores and test score differences. *Neuropsychologia*, 40(8), 1196-1208. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00224-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00224-X)
- Dijk, D.-J., Duffy, J. F., & Czeisler, C. A. (1992). Circadian and sleep/wake dependent aspects of subjective alertness and cognitive performance. *Journal of Sleep Research*, 1(2), 112-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.1992.tb00021.x>

- Dijk, D.-J., & von Schantz, M. (2005). Timing and Consolidation of Human Sleep, Wakefulness, and Performance by a Symphony of Oscillators. *Journal of Biological Rhythms*, 20(4), 279-290. <https://doi.org/10.1177/0748730405278292>
- Gaggioni, G., Maquet, P., Schmidt, C., Dijk, D.-J., & Vandewalle, G. (2014). Neuroimaging, cognition, light and circadian rhythms. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00126>
- Gevers, W., Deliens, G., Hoffmann, S., Notebaert, W., & Peigneux, P. (2015). Sleep deprivation selectively disrupts top-down adaptation to cognitive conflict in the Stroop test. *Journal of Sleep Research*, 24(6), 666-672. <https://doi.org/10.1111/jsr.12320>
- Groeger, J. A., Lo, J. C. Y., Burns, C. G., & Dijk, D.-J. (2011). Effects of sleep inertia after daytime naps vary with executive load and time of day. *Behavioral Neuroscience*, 125(2), 252-260. <https://doi.org/10.1037/a0022692>
- Hammad, G., Reyt, M., Beliy, N., Baillet, M., Deantoni, M., Lesoinne, A., Muto, V., & Schmidt, C. (2020). pyActigraphy : Open-source python package for actigraphy data visualisation and analysis [Preprint]. *Bioinformatics*. <https://doi.org/10.1101/2020.12.03.400226>
- Heyde, I., Kiehn, J.-T., & Oster, H. (2018). Mutual influence of sleep and circadian clocks on physiology and cognition. *Free Radical Biology and Medicine*, 119, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2017.11.003>
- Hirshkowitz, M., Whiton, K., Albert, S. M., Alessi, C., Bruni, O., DonCarlos, L., Hazen, N., Herman, J., Katz, E. S., Kheirandish-Gozal, L., Neubauer, D. N., O'Donnell, A. E., Ohayon, M., Peever, J., Rawding, R., Sachdeva, R. C., Setters, B., Vitiello, M. V., Ware, J. C., & Adams Hillard, P. J. (2015). National Sleep Foundation's sleep time duration recommendations : Methodology and results summary. *Sleep Health*, 1(1), 40-43. <https://doi.org/10.1016/j.sleh.2014.12.010>

- Horne, J. A., & Ostberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *International Journal of Chronobiology*, 4(2), 97-110.
- Johnson, M. P., Duffy, J. F., Dijk, D. J., Ronda, J. M., Dyal, C. M., & Czeisler, C. A. (1992). Short-term memory, alertness and performance: A reappraisal of their relationship to body temperature. *Journal of Sleep Research*, 1(1), 24-29. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.1992.tb00004.x>
- Kräuchi, K., Knoblauch, V., Wirz-Justice, A., & Cajochen, C. (2006). Challenging the sleep homeostat does not influence the thermoregulatory system in men: Evidence from a nap vs. sleep-deprivation study. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 290(4), R1052-R1061. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00381.2005>
- Kyriacou, C. P., & Hastings, M. H. (2010). Circadian clocks: Genes, sleep, and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(6), 259-267. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.03.007>
- Lewandowska, K., Wachowicz, B., Marek, T., Oginska, H., & Fafrowicz, M. (2018). Would you say “yes” in the evening? Time-of-day effect on response bias in four types of working memory recognition tasks. *Chronobiology International*, 35(1), 80-89. <https://doi.org/10.1080/07420528.2017.1386666>
- Lo, J. C., Groeger, J. A., Santhi, N., Arbon, E. L., Lazar, A. S., Hasan, S., von Schantz, M., Archer, S. N., & Dijk, D.-J. (2012). Effects of Partial and Acute Total Sleep Deprivation on Performance across Cognitive Domains, Individuals and Circadian Phase. *PLoS ONE*, 7(9), e45987. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045987>
- Ly, J. Q. M., Gaggioni, G., Chellappa, S. L., Papachilleos, S., Brzozowski, A., Borsu, C., Rosanova, M., Sarasso, S., Middleton, B., Luxen, A., Archer, S. N., Phillips, C., Dijk, D.-J., Maquet, P.,

- Massimini, M., & Vandewalle, G. (2016). Circadian regulation of human cortical excitability. *Nature Communications*, 7(1), 11828. <https://doi.org/10.1038/ncomms11828>
- Majerus, S., Heiligenstein, L., Gautherot, N., Poncelet, M., & Linden, M. V. der. (2009). Impact of auditory selective attention on verbal short-term memory and vocabulary development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(1), 66-86. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.07.004>
- McMahon, W. R., Ftouni, S., Drummond, S. P. A., Maruff, P., Lockley, S. W., Rajaratnam, S. M. W., & Anderson, C. (2018). The wake maintenance zone shows task dependent changes in cognitive function following one night without sleep. *Sleep*, 41(10). <https://doi.org/10.1093/sleep/zsy148>
- Münch, M., Knoblauch, V., Blatter, K., Schröder, C., Schnitzler, C., Kräuchi, K., Wirz-Justice, A., & Cajochen, C. (2005). Age-related attenuation of the evening circadian arousal signal in humans. *Neurobiology of Aging*, 26(9), 1307-1319. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2005.03.004>
- Muto, V., Jaspard, M., Meyer, C., Kusse, C., Chellappa, S. L., Degueldre, C., Balteau, E., Shaffii-Le Bourdieu, A., Luxen, A., Middleton, B., Archer, S. N., Phillips, C., Collette, F., Vandewalle, G., Dijk, D.-J., & Maquet, P. (2016). Local modulation of human brain responses by circadian rhythmicity and sleep debt. *Science*, 353(6300), 687-690. <https://doi.org/10.1126/science.aad2993>
- Pertzov, Y., Heider, M., Liang, Y., & Husain, M. (2015). Effects of healthy ageing on precision and binding of object location in visual short term memory. *Psychology and Aging*, 30(1), 26-35. <https://doi.org/10.1037/a0038396>
- Puttaert, D., Adam, S., & Peigneux, P. (2019). Subjectively-defined optimal/non-optimal time of day modulates controlled but not automatic retrieval processes in verbal memory. *Journal of Sleep Research*, 28(4), e12798. <https://doi.org/10.1111/jsr.12798>

- Ramírez, C., Talamantes, J., García, A., Morales, M., Valdez, P., & Menna-Barreto, L. (2006). Circadian rhythms in phonological and visuospatial storage components of working memory. *Biological Rhythm Research*, 37(5), 433-441. <https://doi.org/10.1080/09291010600870404>
- Refinetti, R., & Menaker, M. (1992). The circadian rhythm of body temperature. *Physiology & Behavior*, 51(3), 613-637. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(92\)90188-8](https://doi.org/10.1016/0031-9384(92)90188-8)
- Reichert, C. F., Maire, M., Gabel, V., Viola, A. U., Götz, T., Scheffler, K., Klarhöfer, M., Berthomier, C., Strobel, W., Phillips, C., Salmon, E., Cajochen, C., & Schmidt, C. (2017). Cognitive brain responses during circadian wake-promotion: Evidence for sleep-pressure-dependent hypothalamic activations. *Scientific Reports*, 7(1), 5620. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05695-1>
- Romeijn, N., & Van Someren, E. J. W. (2011). Correlated Fluctuations of Daytime Skin Temperature and Vigilance. *Journal of Biological Rhythms*, 26(1), 68-77. <https://doi.org/10.1177/0748730410391894>
- Rosenwasser, A. M., & Turek, F. W. (2015). Neurobiology of Circadian Rhythm Regulation. *Sleep Medicine Clinics*, 10(4), 403-412. <https://doi.org/10.1016/j.jsmc.2015.08.003>
- Santhi, N., Lazar, A. S., McCabe, P. J., Lo, J. C., Groeger, J. A., & Dijk, D.-J. (2016). Sex differences in the circadian regulation of sleep and waking cognition in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(19), E2730-E2739. <https://doi.org/10.1073/pnas.1521637113>
- Sattari, N., Whitehurst, L. N., Ahmadi, M., & Mednick, S. C. (2019). Does working memory improvement benefit from sleep in older adults? *Neurobiology of Sleep and Circadian Rhythms*, 6, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.nbscr.2019.01.001>

- Scheer, F. A. J. L., Shea, T. J., Hilton, M. F., & Shea, S. A. (2008). An Endogenous Circadian Rhythm in Sleep Inertia Results in Greatest Cognitive Impairment upon Awakening during the Biological Night. *Journal of Biological Rhythms*, 23(4), 353-361. <https://doi.org/10.1177/0748730408318081>
- Schmidt, C. (2019, novembre): *Sommeil et cognition : une approche chronobiologique*. Communication présentée au colloque du Collège Belgique : Sommeil, rythmes biologiques, cognition, apprentissage et développement, Bruxelles.
- Schmidt, C., & Collette, F. (2016). Impact du moment de la journée et du rythme de veille-sommeil sur les performances cognitives. *Revue de neuropsychologie*, 8(3), 173. <https://doi.org/10.3917/rne.083.0173>
- Schmidt, C., Collette, F., Cajochen, C., & Peigneux, P. (2007). A time to think : Circadian rhythms in human cognition. *Cognitive Neuropsychology*, 24(7), 755-789. <https://doi.org/10.1080/02643290701754158>
- Schmidt, C., Collette, F., Leclercq, Y., Sterpenich, V., Vandewalle, G., Berthomier, P., Berthomier, C., Phillips, C., Tinguely, G., Darsaud, A., Gais, S., Schabus, M., Deseilles, M., Dang-Vu, T. T., Salmon, E., Balteau, E., Degueldre, C., Luxen, A., Maquet, P., ... Peigneux, P. (2009). Homeostatic Sleep Pressure and Responses to Sustained Attention in the Suprachiasmatic Area. *Science*, 324(5926), 516-519. <https://doi.org/10.1126/science.1167337>
- Schmidt, C., Peigneux, P., & Cajochen, C. (2012). Age-Related Changes in Sleep and Circadian Rhythms : Impact on Cognitive Performance and Underlying Neuroanatomical Networks. *Frontiers in Neurology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fneur.2012.00118>
- Schmidt, C., Peigneux, P., Cajochen, C., & Collette, F. (2012). Adapting Test Timing to the Sleep-Wake Schedule : Effects on Diurnal Neurobehavioral Performance Changes in Young Evening

and Older Morning Chronotypes. *Chronobiology International*, 29(4), 482-490.

<https://doi.org/10.3109/07420528.2012.658984>

Seron, X. & Van der Linden, M. (2014). *Traité de neuropsychologie clinique de l'adulte : Tome 1 – Evaluation* (2^{ème} édition). De Boeck – Solal : Louvain-la-Neuve.

Slotten, H. A., & Krekling, S. (1996). Does melatonin have an effect on cognitive performance? *Psychoneuroendocrinology*, 21(8), 673-680. [https://doi.org/10.1016/S0306-4530\(96\)00027-3](https://doi.org/10.1016/S0306-4530(96)00027-3)

Steinborn, M. B., Langner, R., Flehmig, H. C., & Huestegge, L. (2018). Methodology of performance scoring in the d2 sustained-attention test : Cumulative-reliability functions and practical guidelines. *Psychological Assessment*, 30(3), 339-357.

<https://doi.org/10.1037/pas0000482>

Taillard, J., Philip, P., Chastang, J.-F., & Bioulac, B. (2004). Validation of Horne and Ostberg Morningness-Eveningness Questionnaire in a Middle-Aged Population of French Workers. *Journal of Biological Rhythms*, 19(1), 76-86. <https://doi.org/10.1177/0748730403259849>

Valdez, P. (2019). Circadian Rhythms in Attention. *The Yale Journal of Biology and Medicine*, 92(1), 81-92.

Valdez, P., Ramírez, & García, A. (2012). Circadian rhythms in cognitive performance : Implications for neuropsychological assessment. *ChronoPhysiology and Therapy*, 81. <https://doi.org/10.2147/CPT.S32586>

van Someren, E. J. W., Hagebeuk, E. E. O., Lijzenga, C., Scheltens, P., de Rooij, S. E. J. A., Jonker, C., Pot, A.-M., Mirmiran, M., & Swaab, D. F. (1996). Circadian rest—Activity rhythm disturbances in alzheimer's disease. *Biological Psychiatry*, 40(4), 259-270.

[https://doi.org/10.1016/0006-3223\(95\)00370-3](https://doi.org/10.1016/0006-3223(95)00370-3)

Weinert, D., & Waterhouse, J. (2007). The circadian rhythm of core temperature : Effects of physical activity and aging. *Physiology & Behavior*, 90(2), 246-256.
<https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.09.003>

West, R., Murphy, K. J., Armilio, M. L., Craik, F. I. M., & Stuss, D. T. (2002). Effects of Time of Day on Age Differences in Working Memory. *The Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, 57(1), P3-P10.
<https://doi.org/10.1093/geronb/57.1.P3>

10 Annexes

10.1 Morningness-Eveningness Questionnaire (MEQ)

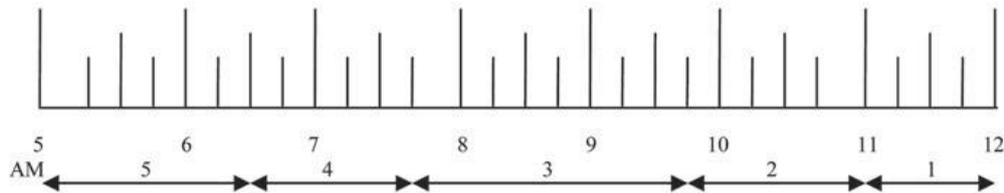
Morningness-Eveningness Questionnaire

Instructions:

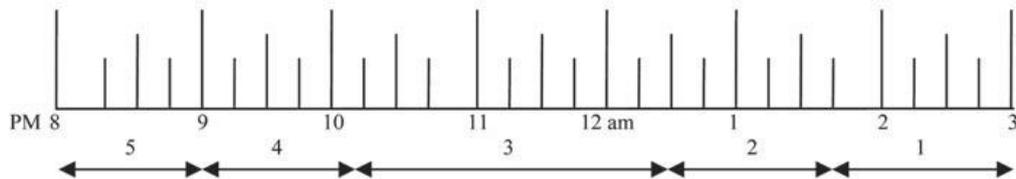
1. Please read each question very carefully before answering.
2. Answer ALL questions
3. Answer questions in numerical order.
4. Each question should be answered independently of others. Do NOT go back and check your answers.
5. All questions have a selection of answers. For each question place a cross alongside ONE answer only. Some questions have a scale instead of a selection of answers. Place a cross at the appropriate point along the scale.
6. Please answer each question as honestly as possible. Both your answers and the results will be kept, in strict confidence.
7. Please feel free to make any comments in the section provided below each question.

The Questionnaire with scores for each choice

1. Considering only your own "feeling best" rhythm, at what time would you get up if you were entirely free to plan your day?



2. Considering only your own "feeling best" rhythm, at what time would you go to bed if you were entirely free to plan your evening?



3. If there is a specific time at which you have to get up in the morning, to what extent are you dependent on being woken up by an alarm clock?

- Not at all dependent 4
 Slightly dependent 3
 Fairly dependent 2
 Very dependent 1

4. Assuming adequate environmental conditions, how easy do you find getting up in the mornings?

- Not at all easy 1
 Not very easy 2
 Fairly easy 3
 Very easy 4

5. How alert do you feel during the first half hour after having woken in the mornings?

- Not at all alert 1
 Slightly alert 2
 Fairly alert 3
 Very alert 4

6. How is your appetite during the first half-hour after having woken in the mornings?

- Very poor 1
 Fairly poor 2
 Fairly good 3
 Very good 4

7. During the first half-hour after having woken in the morning, how tired do you feel?

- Very tired 1
- Fairly tired 2
- Fairly refreshed 3
- Very refreshed 4

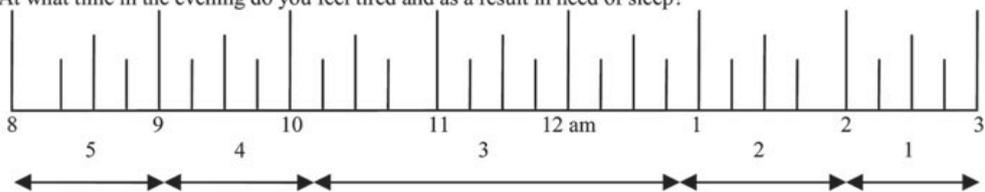
8. When you have no commitments the next day, at what time do you go to bed compared to your usual bedtime?

- Seldom or never later 4
- Less than one hour later 3
- 1-2 hours later 2
- More than two hours later 1

9. You have decided to engage in some physical exercise. A friend suggests that you do this one hour twice a week and the best time for him is between 7:00-8:00 a.m. Bearing in mind nothing else but your own "feeling best" rhythm, how do you think you would perform?

- Would be on good form 4
- Would be on reasonable form 3
- Would find it difficult 2
- Would find it very difficult 1

10. At what time in the evening do you feel tired and as a result in need of sleep?



11. You wish to be at your peak performance for a test which you know is going to be mentally exhausting and lasting for two hours. You are entirely free to plan your day and considering only your own "feeling best" rhythm which ONE of the four testing times would you choose?

- 8:00-10:00 a.m. 6
- 11:00 a.m.-1:00 p.m. 4
- 3:00-5:00 p.m. 2
- 7:00-9:00 p.m. 0

12. If you went to bed at 11 p.m. at what level of tiredness would you be?

- Not at all tired 0
- A little tired 2
- Fairly tired 3
- Very tired 5

13. For some reason you have gone to bed several hours later than usual, but there is no need to get up at any particular time the next morning. Which ONE of the following events are you most likely to experience?

- Will wake up at usual time and will NOT fall asleep 4
- Will wake up at usual time and will doze thereafter 3
- Will wake up at usual time but will fall asleep again 2
- Will NOT wake up until later than usual 1

14. One night you have to remain awake between 4-6 a.m. in order to carry out a night watch. You have no commitments the next day. Which ONE of the following alternatives will suit you best?

- Would NOT go to bed until watch was over 1
- Would take a nap before and sleep after 2
- Would take a good sleep before and nap after 3
- Would take ALL sleep before watch 4

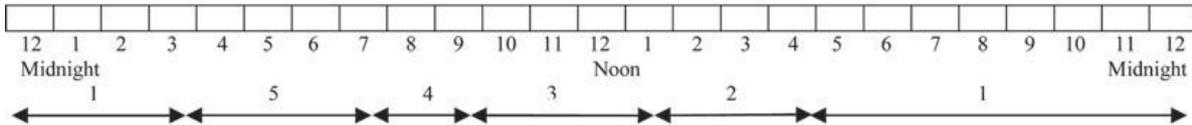
15. You have to do two hours of hard physical work. You are entirely free to plan your day and considering only your own "feeling best" rhythm which ONE of the following times would you choose?

- 8:00-10:00 a.m. 4
- 11:00 a.m.-1:00 p.m. 3
- 3:00-5:00 p.m. 2
- 7:00-9:00 p.m. 1

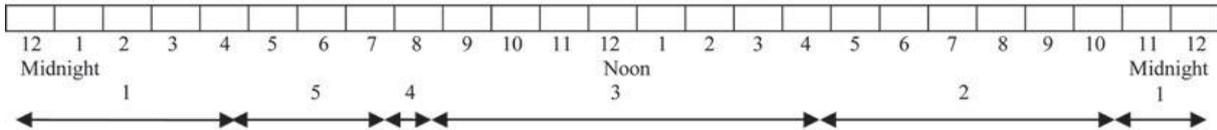
16. You have decide to engage in hard physical exercise. A friend suggests that you do this for one hour twice a week and the best time for him is between 10-11 p.m. Bearing in mind nothing else but your own "feeling best" rhythm how well do you think you would perform?

- Would be on good form 1
- Would be on reasonable form 2
- Would find it difficult 3
- Would find if very difficult 4

17. Suppose that you can choose your own work hours. Assume that you worked a FIVE hour day (including breaks) and that your job was interesting and paid by results. Which FIVE CONSECUTIVE HOURS would you select?



18. At what time of the day do you think that you reach your "feeling best" peak?



19. One hears about "morning" and "evening" types of people. Which ONE of these types do you consider yourself to be?

- Definitely a "morning" type 6
- Rather more a "morning" than an evening type 4
- Rather more an "evening" than a "morning" type 2
- Definitely an "evening" type 0

10.2 PSQI

CENTRE DU SOMMEIL ET DE LA VIGILANCE HÔTEL-DIEU, PARIS



Index de Qualité du Sommeil de Pittsburgh (PSQI)

Test effectué le :/...../..... (Jour/mois/année)

Les questions suivantes ont trait à vos habitudes de sommeil pendant le dernier mois seulement. Vos réponses doivent indiquer ce qui correspond aux expériences que vous avez eues pendant la majorité des jours et des nuits au cours du dernier mois. Répondez à toutes les questions.

1/ Au cours du mois dernier, quand êtes-vous habituellement allé vous coucher le soir ?

➤ Heure habituelle du coucher :

2/ Au cours du mois dernier, combien vous a-t-il habituellement fallu de temps (en minutes) pour vous endormir chaque soir ?

➤ Nombre de minutes :

3/ Au cours du mois dernier, quand vous êtes-vous habituellement levé le matin ?

➤ Heure habituelle du lever :

4/ Au cours du mois dernier, combien d'heures de sommeil effectif avez-vous eu chaque nuit ?

(Ce nombre peut être différent du nombre d'heures que vous avez passé au lit)

➤ Heures de sommeil par nuit :

Pour chacune des questions suivantes, indiquez la meilleure réponse. Répondez à toutes les questions.

5/ Au cours du mois dernier, avec quelle fréquence avez-vous eu des troubles du sommeil car ...

	Pas au cours du dernier mois	Moins d'une fois par semaine	Une ou deux fois par semaine	Trois ou quatre fois par semaine
a) vous n'avez pas pu vous endormir en moins de 30 mn				
b) vous vous êtes réveillé au milieu de la nuit ou précocement le matin				
c) vous avez dû vous lever pour aller aux toilettes				
d) vous n'avez pas pu respirer correctement				
e) vous avez toussé ou				

ronflé bruyamment				
f) vous avez eu trop froid				
g) vous avez eu trop chaud				
h) vous avez eu de mauvais rêves				
i) vous avez eu des douleurs				
j) pour d'autre(s) raison(s). Donnez une description :				
Indiquez la fréquence des troubles du sommeil pour ces raisons	Pas au cours du dernier mois	Moins d'une fois par semaine	Une ou deux fois par semaine	Trois ou quatre fois par semaine

6/ Au cours du mois dernier, comment évalueriez-vous globalement la qualité de votre sommeil ?

- Très bonne Assez bonne Assez mauvaise Très mauvaise

7/ Au cours du mois dernier, combien de fois avez-vous pris des médicaments (prescrits par votre médecin ou achetés sans ordonnance) pour faciliter votre sommeil ?

- Pas au cours du dernier mois Moins d'une fois par semaine Une ou deux fois par semaine Trois ou quatre fois par semaine

8/ Au cours du mois dernier, combien de fois avez-vous eu des difficultés à demeurer éveillé(e) pendant que vous conduisiez, preniez vos repas, étiez occupé(e) dans une activité sociale ?

- Pas au cours du dernier mois Moins d'une fois par semaine Une ou deux fois par semaine Trois ou quatre fois par semaine

9/ Au cours du mois dernier, à quel degré cela a-t-il représenté un problème pour vous d'avoir assez d'enthousiasme pour faire ce que vous aviez à faire ?

- Pas du tout un problème Seulement un tout petit problème Un certain problème Un très gros problème

10/ Avez-vous un conjoint ou un camarade de chambre ?

- Ni l'un, ni l'autre.
 Oui, mais dans une chambre différente.
 Oui, dans la même chambre mais pas dans le même lit.
 Oui, dans le même lit.

11/ Si vous avez un camarade de chambre ou un conjoint, demandez-lui combien de fois le mois dernier vous avez présenté :

	Pas au cours	Moins d'une	Une ou deux	Trois ou quatre
--	--------------	-------------	-------------	-----------------

CENTRE DU SOMMEIL ET DE LA VIGILANCE HÔTEL-DIEU, PARIS

	du dernier mois	fois par semaine	fois par semaine	fois par semaine
a) un ronflement fort				
b) de longues pauses respiratoires pendant votre sommeil				
c) des saccades ou des secousses des jambes pendant que vous dormiez				
d) des épisodes de désorientation ou de confusion pendant le sommeil				
e) d'autres motifs d'agitation pendant le sommeil				

Score global au PSQI :

10.3 Tableau des données brutes

10.3.1 Tableau des performances aux tâches cognitives

ID	Données démographiques										Tâche d2				Tâche de Pertzov									
	Age	PSQI	Chronotype	NSC	Sexe	BMI	1er test	Groupe d'âge	Résolution iButtons	Session	Vitesse de traitement (GZ)	Variabilité de rapidité (SD)	Pourcentage d'erreur	Quantité de travail (KL)	Identification				Localisation				Swap Errors	
															Court 1	Court 3	Long 1	Long 3	Court 1	Court 3	Long 1	Long 3	Long	Court
RCAM 01	18	4	Matin	2	F	23,6	17h	Jeune	Faible	1	512	19	4,4921875	179	1	1	1	0.867	18.07	41.90	24.08	61.28	0.06667	0.10638
										2	563	12	1,7761989	226	1	0.933	1	0.8	21.57	50.71	26.30	60.71	0.07143	0.1087
RCAM 02	21	5	Soir	3	F	18,8	17h	Jeune	Faible	1	429	7	1,8648018	166	1	1	1	0.867	0.881	32.12	24.41	62.50	0.06667	0.19565
										2	510	6	1,7647058	197	1	1	1	1	15.97	53.40	17.75	8.264	0.2	0.18
RCAM 03	28	5	Matin	3	F	21,7	17h	Jeune	Haute	1	653	7	1,3782542	274	1	1	1	0.933	0.776	21.10	2.057	56.32	0.06667	0
										2	653	1	0,7656967	290	1	1	1	0.933	0.872	26.55	0.924	4.584	0	0.02128
RCAM 04	24	4	Matin	3	F	21,3	17h	Jeune	Faible	1	598	10	2,5083612	236	1	1	1	1	10.72	29.83	25.01	69.90	0	0.02083
										2	605	24	1,3223140	256	1	1	1	0.933	17.70	40.54	14.75	25.37	0.06667	0.02041
RCAM 05	26	3	Matin	3	F	24	17h	Jeune	Faible	1	604	8	4,8013245	216	1	1	1	0.933	24.27	30.72	15.91	32.16	0	0.0625
										2	650	3	2,4615384	266	1	0.933	1	1	21.31	22.72	14.80	59.36	0	0.02083
RCAM 06	19	7	Soir	3	F	17,5	17h	Jeune	Haute	1	475	10	2,9473684	158	1	0.8	1	0.933	29.64	37.31	19.46	69.03	0.08333	0.21739
										2	536	18	1,1194029	217	1	1	1	0.933	27.79	36.47	19.75	5.788	0	0.175
RCAM 07	23	2	Matin	3	F	14,2	17h	Jeune	Haute	1	461	16	4,1214750	154	1	1	1	1	0.763	39.08	1.811	48.72	0.06667	0.10204
										2	559	13	0,5366726	234	1	0.933	1	0.933	12.34	41.36	15.72	63.29	0.07143	0.02
RCAM 08	25	7	Soir	3	M	27,1	17h	Jeune	Faible	1	527	12	1,3282732	203	1	1	1	0.733	17.64	61.54	13.67	58.32	0.06667	0.15217
										2	570	17	0,3508771	239	1	1	1	0.867	10.80	24.57	0.735	29.45	0	0.08163

RCAM 09	24	3	Soir	3	F	24,7	9h	Jeune	Haute	1	616	8	17,532467	61	1	0.933	0.8	0.933	27.35	47.76	16.50	62.24	0.07143	0.04255
										2	580	9	3,2758620	217	0.8	1	1	0.933	17.39	24.60	36.38	51.30	0	0.08163
RCAM 10	22	6	Matin	3	F	18,6	9H	Jeune	Faible	1	436	10	1,8348623	162	1	1	1	0.733	10.71	37.93	29.37	40.18	0.06667	0.06522
										2	518	11	2,1235521	189	1	0.933	1	1	15.46	43.89	29.11	56.15	0.21429	0.02174
RCAM 11	22	6	Matin	2	F	24,2	9h	Jeune	Faible	1	456	22	5,2631579	147	0.8	0.8	1	0.867	25.55	75.34	27.97	82.75	0.25	0.22222
										2	502	18	5,3784860	159	1	0.933	1	0.933	29.35	111.6	20.39	70.29	0.28571	0.625
RCAM 12	24	3	Matin	3	F	22	9h	Jeune	Faible	1	517	16	2,7079303	195	1	1	1	0.8	18.61	57.16	17.44	7.48	0.13333	0.14286
										2	568	12	0,3521126	238	0.8	1	0.8	0.8	20.71	49.12	14.10	34.33	0.13333	0.04255
RCAM 13	21	4	Soir	3	F	19,8	17h	Jeune	Haute	1	497	21	14,889336	60	1	0.933	1	0.867	17.80	84.68	2.537	49.00	0.14286	0.13953
										2	584	14	4,9657534	188	1	1	1	0.933	54.29	2.768	24.72	65.20	0	0.12766
RCAM 14	28	4	Matin	2	M	25,4	9h	Jeune	Haute	1	429	11	1,8648019	164	1	0.933	1	1	11.82	21.79	18.22	80.17	0	0.10638
										2	478	6	0,8368201	190	1	0.933	1	0.933	15.04	24.09	20.16	92.06	0.07143	0.125
RCAM 15	33	4	Matin	2	M	22,2	17h	Jeune	Faible	1	555	17	4,6846847	191	1	1	1	0.867	28.45	62.69	37.55	101.4	0.13333	0.3
										2	596	6	3,5234899	214	1	0.867	1	0.8	26.34	65.49	42.65	116.9	0.07692	0.15385
RCAM 16	19	2	Matin	2	M	24,2	9h	Jeune	Haute	1	428	13	3,2710280	140	1	0.867	0.8	0.6	45.48	42.42	21.56	123.9	0.07692	0.18605
										2	456	18	4,6052632	152	0.8	0.867	1	0.8	5.581	89.51	14.26	113.9	0.15385	0.15556
RCAM 17	23	6	Soir	3	M	25,4	9h	Jeune	Haute	1	522	17	3,0651341	192	1	1	1	0.733	20.48	21.04	26.16	47.98	0	0
										2	623	7	2,4077047	252	1	1	1	0.867	16.78	23.96	2.517	60.26	0	0.1087
RCAM 18	22	3	Matin	3	M	22,9	9h	Jeune	Faible	1	590	14	2,3728814	233	1	0.933	1	0.8	13.49	21.82	21.31	73.51	0	0.04255
										2	653	1	1,2251149	285	1	1	1	1	19.50	27.35	17.35	41.74	0	0.04082
RCAM 19	21	5	Matin	3	M	22,7	17h	Jeune	Haute	1	527	18	7,7798862	146	1	0.933	1	0.933	21.81	43.83	22.47	93.41	0.07143	0.14634
										2	575	9	6,4347826	177	1	1	1	0.8	15.37	70.44	19.84	96.83	0.2	0.34146
RCAM 20	74	3	Matin	2	F	26,3	17h	Âgé	Haute	1	431	18	17,865429	23	1	0.667	1	0.733	45.28	15.42	66.19	170.2	0.2	0.13514
										2	378	16	9,2592593	87	0.8	0.933	1	0.667	3.887	75.83	36.85	96.49	0.28571	0.15

RCAM														Enregistrement corrompu											
RCAM 21	70	5	Matin	3	M	24,5	17h	Âgé	Haute	1	451	8	7,7605322	116											
										2	377	18	9,2838196	89	1	1	1	0.8	19.20	76.14	38.29	9.608	0.06667	0.10638	
RCAM 22	28	2	Matin	3	F	19,1	17h	Jeune	Haute	1	514	16	12,645914	84	1	1	1	0.867	20.53	2.401	17.02	94.85	0	0.14894	
										2	546	12	9,7069597	133	1	1	1	0.8	31.23	33.94	27.37	64.25	0.06667	0.11364	
RCAM 23	69	7	Matin	3	F	32,5	17h	Âgé	Haute	1	358	5	7,2625698	110	1	0.8	0.6	0.667	25.10	94.70	20.70	232.4	0.16667	0.18605	
										2	435	11	10,344828	89	1	1	0.8	0.733	20.22	79.01	39.64	179.9	0.06667	0.06122	
RCAM 24	27	2	Matin	3	F	20,6	17h	Jeune	Haute	1	606	8	7,7557756	172	1	0.933	1	0.933	2.132	5.098	19.69	78.48	0.14286	0.2	
										2	571	18	3,3274956	210	1	1	1	1	21.14	40.37	26.86	63.15	0.06667	0.11111	

10.3.2 Tableau des températures

ID	9H	17H	Amplitude relative ¹	Minimum	Maximum	Amplitude absolue ²
RCAM01	-0.500	1.300	-1.800	1.167	1.800	2.967
RCAM02	1.300	-3.917	5.217	-5.200	1.300	6.500
RCAM03	-1.125	-1.375	0.250	-4.33	0.750	5.083
RCAM04	-0.150	-0.650	0.500	-1.233	1.433	2.667
RCAM05	iButton défectueux					
RCAM06	0.250	-1.833	2.083	-4.000	1.667	5.667
RCAM07	-1.100	-2.975	1.875	-3.975	2.025	6.000
RCAM08	-1.200	-1.667	-0.033	-3.300	0.833	4.133
RCAM09	-1.400	-3.225	1.825	-4.225	0.900	5.125
RCAM10	0.400	-1.500	1.900	-2.400	2.125	4.525
RCAM11	-2.300	-3.000	0.700	-5.000	1.100	6.100
RCAM12	-0.250	-1.375	1.125	-2.125	3.125	5.250
RCAM13	-1.900	-2.650	0.750	-5.150	2.475	7.625
RCAM14	-1.500	-1.100	-0.400	-3.000	2.125	5.125
RCAM15	-3.475	-1.500	-1.575	-3.725	2.275	6.000
RCAM16	-0.250	-1.500	1.250	-3.000	1.625	4.625
RCAM17	0.375	-1.750	2.125	-2.250	1.667	3.917
RCAM18	-1.100	-1.300	0.200	-3.525	2.100	5.625
RCAM19	-2.140	-0.471	-1.668	-4.214	2.587	6.801
RCAM20	iButton défectueux					
RCAM21	-0.828	-3.099	2.271	-3.472	0.311	3.783
RCAM22	iButton défectueux					
RCAM23	-1.964	-3.492	1.529	-4.491	1.538	6.029
RCAM24	-1.350	-1.600	0.250	-4.933	1.900	6.833

¹ Amplitude relative = différence de température entre les deux moments de testing, à savoir 17H et 9H.

² Amplitude absolue= différence entre la température minimale et la température maximale, au cours d'une journée de 24H.

