

Effet de la charge mentale sur la fatigue cognitive dans une population middle-aged : étude comportementale et mesure de paramètres oculaires

Auteur : Wilkens, Gaëlle

Promoteur(s) : Collette, Fabienne

Faculté : Faculté de Psychologie, Logopédie et Sciences de l'Éducation

Diplôme : Master en sciences psychologiques, à finalité spécialisée en psychologie clinique

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16216>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Effet de la charge mentale sur la fatigue cognitive dans une population middle-aged : étude comportementale et mesure de paramètres oculaires

Promotrice : Madame Fabienne Collette

Lecteurs : Coline Gregoire et David Stawarczyk

Mémoire présenté par **Gaëlle WILKENS** en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Psychologiques à finalité spécialisée en Psychologie Clinique, filière Neuropsychologie Clinique

Année académique 2021-2022

Remerciements

Je tenais à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail ;

Ma promotrice, madame Fabienne Collette pour sa bienveillance, sa gentillesse et ses conseils ;

Les doctorantes, Maëlle Charonitis, Camille Guillemain et Florence Requier pour m'avoir guidée, encouragée et soutenue tout au long de ce projet ;

Gregory Hammad pour son aide dans le traitement des données de pupillométrie ;

L'ensemble des volontaires qui ont accepté de me donner de leur temps et de leur énergie et sans qui ce mémoire n'aurait pu voir le jour ;

Maud et Edouard, pour leur relecture et leur soutien ;

Coline Gregoire et David Stawarczyk, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail ;

Mes parents, pour leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours et sans qui je n'aurais pas pu réaliser ces études.

Liste des abréviations principales

CES-DS	Center for Epidemiologic Studies-Depression Scale
ESS	Epworth Sleepiness Scale
HCL	Haute charge mentale
IRMf	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
KSS	Karolinska Sleepiness Scale
LC	Locus coeruleus
LCL	Faible charge mentale
PSQI	Pittsburgh Sleep Quality Index
STD	Stimulus Time Duration
TDLB	Time Load Dual Back
TEA	Test of Everyday Attention
TR	Temps de réaction
VAS	Visual Analogue Scale

Index des tableaux et figures

TABLEAUX

Tableau 1. <i>Table de fréquence selon la variable niveau d'études, par groupe</i>	58
Tableau 2. <i>Table de fréquence selon la variable chronotype, par groupe</i>	59
Tableau 3. <i>Moyennes et écart-types des différentes variables métriques, par groupe</i>	59
Tableau 4. <i>Tests t de Student et tests de Mann-Withney sur les différentes variables métriques</i>	61
Tableau 5. <i>Moyennes globales sur les performances obtenues à la tâche comportementales en fonction du groupe</i>	63
Tableau 6. <i>Moyennes globales sur les performances obtenues à la tâche comportementale en fonction de la condition</i>	63
Tableau 7. <i>Moyennes des différences de scores au temps 1 et au temps 2 ($\Delta = T2-T1$), en fonction de la condition</i>	67
Tableau 8. <i>Moyennes et écarts-types de l'écartement des paupières en fonction du groupe</i>	69
Tableau 9. <i>Moyennes et écarts-types de l'écartement des paupières en fonction de la condition</i>	69
Tableau 10. <i>Moyennes et écarts-types de la dilatation pupillaire en fonction du groupe</i>	70
Tableau 11. <i>Moyennes et écarts-types de la dilatation pupillaire en fonction de la condition</i>	70

FIGURES

Figure 1. <i>Première version du modèle de contrôle compensatoire</i>	17
Figure 2. <i>Deuxième version du modèle de contrôle compensatoire</i>	18
Figure 3. <i>Troisième version du modèle de contrôle compensatoire</i>	19
Figure 4. <i>Représentation de la double tâche</i>	50
Figure 5. <i>Résumé du design expérimental</i>	54
Figure 6. <i>Performances moyennes à la tâche comportementale en fonction de la condition et du groupe</i>	64
Figure 7. <i>Corrélation entre la performance moyenne au fil de la tâche (T1-T4) et le Δ somnolence chez les sujets middle-aged</i>	72
Figure 8. <i>Corrélation entre l'évolution de l'ouverture palpébrale et l'évolution de la fatigue subjective (ΔVAS), groupes confondus</i>	74

Table des matières

I. INTRODUCTION THEORIQUE.....	10
1. Fatigue cognitive.....	11
1.1 Définitions.....	11
1.1.1 Fatigue cognitive et sentiments associés.....	13
1.2 Modèles.....	14
1.2.1 Hypothèse de l'épuisement de l'énergie.....	15
1.2.2 Le modèle de contrôle compensatoire.....	16
1.2.3 Fatigue mentale et circuit de la récompense.....	20
1.3 Causes.....	22
1.3.1 Modulation de la durée de la tâche.....	22
1.3.2 Modulation de la charge cognitive.....	24
1.3.1.1 Manipulation de la difficulté.....	25
1.3.1.2. Procédure en double tâche.....	26
1.4 Evaluation.....	28
1.4.1 Mesures subjectives.....	28
1.4.2 Mesures objectives.....	28
1.4.3 Mesures physiologiques.....	29
2. Données oculaires.....	30
2.1 Pupille.....	30
2.2 Paupière.....	32
2.3 Relation entre paramètres oculaires et fatigue mentale.....	33
3. Population middle-aged.....	35
3.1 Définition.....	35
3.2 Modifications cognitives.....	35
3.3 Effets de la fatigue cognitive.....	37
II. OBJECTIFS GENERAUX ET HYPOTHESES.....	42
III. METHODOLOGIE.....	44
1. Participants.....	44

2. Protocole expérimental.....	45
3. Mesures et tests.....	47
3.1 Tests neuropsychologiques.....	47
3.2 Questionnaires.....	48
3.3 Time Load Dual Back.....	50
3.4 Sensations subjectives.....	52
3.5 Paramètres oculaires.....	53
IV ANALYSES STATISTIQUES.....	55
1. Données démographiques.....	55
2. Données comportementales.....	55
3. Sensations subjectives.....	56
4. Données oculaires.....	56
5. Analyses corrélationnelles.....	57
V. RESULTATS.....	58
1. Analyses des données démographiques.....	58
2. Analyses de la tâche comportementales : TLDB.....	62
2.1 Analyses sur les STD aux pré-tests.....	62
2.2 Analyses sur les performances moyennes à la TLDB.....	62
2.3 Analyses sur les écarts-types des performances moyennes à la TLDB.....	65
3. Analyses des échelles subjectives : KSS et VAS.....	66
3.1 Fatigue et somnolence subjectives au départ de la tâche.....	66
3.2 Fatigue et somnolence subjectives à travers la tâche.....	66
3.3 Motivation au départ de la tâche.....	67
4. Analyses des données oculaires.....	68
4.1 Analyses de la fréquence des clignements.....	68
4.2 Analyses de la durée des clignements.....	68
4.3 Analyses de l'écartement des paupières.....	68
4.4 Analyses de la dilatation pupillaire.....	69

5. Analyses corrélationnelles.....	71
5.1 Corrélation entre performance à la TLDB et sensations subjectives.....	71
5.1.1 Liens entre performance au fil du temps et sensations subjectives.....	71
5.2 Corrélation entre performance à la TLDB et données oculaires.....	72
5.3 Corrélation entre données oculaires et sensations subjectives.....	73
VI DISCUSSION.....	75
1. Mesures comportementales (TLDB).....	75
1.1 Performances moyennes à la tâche.....	76
1.2 Variabilité des performances moyennes à la tâche.....	79
2. Echelles subjectives : KSS et VAS.....	80
3. Données oculaires.....	81
3.1 Clignements des paupières.....	81
3.1.1 Fréquence et durée.....	81
3.1.2 Ecartement.....	82
3.2 Dilatation pupillaire.....	83
4. Analyses corrélationnelles.....	84
4.1 Performances à la tâche et sensations subjectives.....	84
4.2 Performances à la tâche et données oculaires.....	84
4.3 Sensations subjectives et données oculaires.....	85
5. Limites de l'étude.....	86
6. Recommandations.....	87
VII CONCLUSION.....	89
VIII BIBLIOGRAPHIE.....	90

I. INTRODUCTION THEORIQUE

Dans nos sociétés modernes prônant toujours plus de productivité et de compétitivité, la fatigue représente un phénomène d'intérêt majeur. En effet, bien que maintenir des niveaux de performance et de productivité suffisants soit essentiel au bon fonctionnement des systèmes organisationnels, l'exécution d'un travail de manière prolongée peut induire de la fatigue cognitive.

Ce phénomène est particulièrement observé dans certaines professions nécessitant de longues heures de travail dans des environnements exigeants et demandant une vigilance accrue afin d'éviter les accidents ou les blessures. Parmi ces professions, les secteurs des transports (Wise et al., 2019) et de la santé (Nielsen et al., 2019) peuvent être cités. Par exemple, Maltese et al. (2016) ont démontré une altération de la vigilance et des performances chez des intensivistes après une garde de nuit. Il est également reconnu que la fatigue mentale provoque des accidents de travail (McCormick et al., 2012) ainsi qu'une réduction du bien-être et de la qualité de vie.

Dans les cas les plus extrêmes, la fatigue cognitive peut devenir permanente comme chez les patients atteints du syndrome de fatigue chronique ou mener à l'épuisement professionnel. Ainsi, étant donné ses conséquences délétères, une meilleure compréhension de la fatigue et de son impact sur le plan cognitif s'avère particulièrement nécessaire.

Actuellement, peu de données sont disponibles dans la littérature concernant cette notion. Ce manquement est d'autant plus important chez les sujets d'âge moyen, et ce, alors même qu'une diminution de l'efficacité cognitive a été démontrée dans cette population. En effet, si le déclin cognitif chez les personnes middle-aged est moins reconnu que chez les âgés, des réductions cognitives en terme de vitesse de traitement, de raisonnement et de fonctionnement exécutif ont, tout de même, été objectivées à la période d'âge moyen. Toutefois, il semblerait qu'il n'existe pas de consensus à propos de la vulnérabilité des sujets middle-aged face aux effets néfastes de la fatigue.

De plus, l'étude de la fatigue cognitive se heurte à un problème majeur concernant son évaluation objective. Généralement, la fatigue est évaluée au travers de questionnaires et d'échelles fournissant des mesures dites subjectives. Cependant, le lien entre la fatigue subjective et le déclin des performances reste encore mal compris. De fait, Krupp & Elkins (2000) ont révélé une absence de corrélation entre scores subjectifs et mesures comportementales. Par conséquent, l'obtention de données objectives dans l'étude de la fatigue cognitive est devenue une priorité.

1. Fatigue cognitive

1.1 Définitions

Actuellement, dans notre société occidentale, la fatigue représente un problème récurrent dans la population générale de même que dans la population active. Elle doit être comprise comme un continuum allant de plaintes légères, fréquemment observées, d'une part, à une fatigue sévère et invalidante, telle que la fatigue chronique, d'autre part (Huibers et al., 2002).

Cet état peut donc être perçu régulièrement chez tout individus en bonne santé mais également se retrouver, de façon plus pathologique, dans diverses maladies psychiatriques ou neurologiques (Penner & Paul, 2017).

Ainsi, la notion de fatigue peut être classée selon son association avec un état sous-jacent en fatigue physiologique et pathologique. La première est indépendante de tout diagnostic médical et représente un état transitoire engendré par une activité intense et pouvant être atténué par une période de repos (Kluger, Krupp & Enoka, 2013). A l'inverse, la seconde survenant dans certaines pathologies médicales telles que la sclérose en plaques ou la dépression est souvent insidieuse et peut s'avérer chronique (Chaudhuri & Behan, 2004; Kluger et al., 2013).

De plus, la plupart des auteurs font état de la notion d'effort volontaire¹ comme dénominateur commun du concept de fatigue. En effet, Chaudhuri et Behan (2004) décrivent la fatigue comme « un sentiment résultant d'une difficulté à initier ou à maintenir un effort volontaire ». De même, Mizuno et al (2011) la définissent comme une difficulté à entreprendre ou à poursuivre des activités volontaires. Ainsi, qu'il soit physique ou cognitif, l'effort entraîne une fatigue. Dès lors, celle-ci peut être perçue selon deux classifications principales, à savoir physique ou mentale. Alors que la fatigue physique résulte d'une activité musculaire répétée, la fatigue mentale (ou cognitive) constitue une incapacité à accomplir des tâches mentales nécessitant une motivation et des repères personnels (Hockey, 2013).

Considérée comme un phénomène multidimensionnel revêtant diverses définitions selon l'approche et le domaine qui l'étudient, la fatigue est une notion difficilement définissable et/ou objectivable.

¹ L'effort volontaire est un acte mental qui se porte sur l'objet d'une idée.

De plus, la majorité des études réalisées à son propos se sont portées sur une analyse détaillée de patients souffrants de sclérose en plaques ou encore de traumatismes crâniens (Johansson et al., 2010). Ainsi, il n'existe actuellement aucun consensus concernant la fatigue cognitive chez des individus sains. Néanmoins, en raison d'une société toujours plus exigeante, la littérature a vu apparaître ces dernières années, l'émergence d'un intérêt grandissant pour l'étude du phénomène de fatigue. En effet, notre mode de vie actuel a entraîné un accroissement de la surcharge cognitive² et par conséquent de la fatigue mentale (Wickens, 2008). De fait, selon Mizuno et al. (2011), cette dernière est induite par une augmentation de la charge cognitive, au travers d'une hyper-activité sympathique. Autrement dit, ces auteurs ont démontré qu'une augmentation de l'activité sympathique et une diminution de l'activité parasympathique étaient induites par la réalisation de tâches mentales provoquant la fatigue.

Ainsi, afin d'étudier et de définir davantage la fatigue cognitive ou fatigue mentale, différentes approches ont été envisagées.

Historiquement, certains auteurs se sont concentrés sur les aspects subjectifs impliquant des notions de motivation et de volonté, de la fatigue cognitive. En effet, selon sa conception la plus courante, la fatigue mentale (ou cognitive) peut être définie comme la perception subjective par un individu, d'un manque d'énergie mentale interférant avec ses activités habituelles et souhaitées (DeLuca et al., 2009). Elle consiste donc en un sentiment subjectif d'épuisement entraînant une moindre motivation à s'engager dans la tâche et à poursuivre celle-ci. Dès lors, la fatigue cognitive apparaît lors d'activités prolongées et répétées.

D'un point de vue quantitatif, elle peut également être envisagée en tant que diminution des performances à une tâche cognitive (Lorist et al., 2005 ; Van Der Linden & Eling, 2006). Selon une conceptualisation similaire, Holtzer et al. (2011) ont défini la fatigue cognitive « comme une incapacité exécutive à contrôler la performance au cours d'un effort cognitif aigu mais soutenu, ce qui entraîne un déclin et une performance plus variable que la capacité optimale de l'individu ». De fait, de manière générale, la fatigue impacte négativement les performances d'un individu ainsi que sa vitesse de traitement de l'information.

² La surcharge cognitive est un état mental où un individu est engagé dans la réalisation d'une tâche extrêmement exigeante pour lui et pour laquelle il ne possède pas les ressources cognitives suffisantes.

Lorsqu'il y a présence d'une quelconque fatigue mentale, maintenir un niveau d'attention suffisant sur les éléments pertinents sans se laisser distraire par ceux qui ne le sont pas, s'avère complexe.

1.1.1 Fatigue cognitive et sentiments associés

Comme mentionné auparavant, la fatigue est difficilement définissable et/ou objectivable, notamment en raison de son association avec certains autres sentiments subjectifs.

L'ennui³ est une notion particulièrement controversée par les chercheurs et sa distinction avec la fatigue a longtemps fait débat. En effet, si certains auteurs reconnaissent que ces deux concepts impactent de manière semblable les performances d'un individu, d'autres s'appliquent à les différencier.

Ainsi, Myers (1937), notamment, a défini l'ennui comme "le résultat d'une incapacité à trouver des centres d'intérêt susceptibles de maintenir l'attention spontanée ou volontaire" (p. 298) et la fatigue comme étant "une impuissance générale à concentrer son attention et à agir de manière ciblée, intelligente et créative" (p. 299).

Outre l'ennui, la fatigue peut également apparaître en association avec l'anxiété, l'apathie et la dépression.

Selon Hockey (2013), si fatigue et anxiété participent toutes deux à l'état de tension provoqué à la suite d'un travail couteux et exigeant, établir une distinction entre ces deux notions s'avère utile. Dès lors, si l'anxiété est une réponse à une menace perçue, provoquée par des demandes élevées et inattendues; la fatigue mentale apparaît lorsqu'un effort soutenu est demandé afin d'y répondre adéquatement (Hockey, 2013).

³ Les chercheurs s'accordent sur le fait que l'ennui est un état subjectivement désagréable survenant dans des situations monotones.

Kuppuswamy (2017) souligne, quant à lui, que la fatigue, la dépression et l'apathie consistent en la réduction d'une action volontaire dite auto-initiée⁴ mais qu'il existe, toutefois, une distinction subtile entre ces trois concepts. La fatigue est considérée comme un symptôme, émergeant lorsque les individus, désireux d'agir, ne se sentent pas capables de le faire; tandis que la dépression et l'apathie sont représentées comme des signes, observés quand des patients ne sont plus motivés à réaliser des actions alors qu'ils en sont capables (Kuppuswamy, 2017).

En considérant la définition de Trejo et al. (2005)⁵, il est également essentiel de distinguer fatigue mentale de somnolence. En effet, cette dernière étant bien souvent un des marqueurs d'une fatigue cognitive, toutes deux tendent fréquemment à être confondues. Un état de somnolence chez un individu peut effectivement avoir une influence sur ses sensations de fatigue subjective. Néanmoins, fatigue et somnolence constituent deux réalités extrêmement différentes. Alors que la somnolence annonce la nécessité de dormir et disparaît donc après le sommeil, la fatigue, quant elle, s'estompe après une simple période de repos (Mairesse & Neu, 2016).

Selon une conception davantage neurobiologique, Shen et al. (2006) définissent la somnolence comme étant la cause d'une altération ou d'un déséquilibre du cycle circadien. Ainsi, contrairement à la fatigue, l'apparition d'un état de somnolence sera nécessairement conditionnée par un déséquilibre des mécanismes veille/sommeil.

1.2 Modèles

Bien que faisant l'objet de nombreuses recherches depuis près d'un siècle, peu de modèles théoriques permettent de comprendre la fatigue, ses origines et ses fonctions d'un point de vue scientifique.

Cette incompréhension théorique semble trouver racine dans les premières considérations de la fatigue. En effet, selon une conception héritée du contexte d'industrialisation et datant de la fin du XIX^{ème}, elle constitue une perte des ressources énergétiques. Cette hypothèse est également appelée « hypothèse de l'épuisement de l'énergie ».

⁴ L'action volontaire fait appel à deux systèmes : le système motivationnel qui l'initie et le système exécutif (sensorimoteur) qui la réalise.

⁵ La fatigue cognitive consiste en la diminution des ressources cognitives se développant avec le temps via les demandes excessives d'une tâche, et indépendamment de la somnolence.

Par la suite, une proposition alternative a fourni une image plus complète de cette notion de fatigue en s'intéressant davantage aux mécanismes motivationnels orientant les objectifs et régulant le déploiement de l'effort.

Dans cette section, nous proposons donc de retracer l'histoire de la fatigue cognitive en envisageant, dans un premier temps, « l'hypothèse de l'épuisement de l'énergie » avant de présenter les modèles les plus récents et les plus influents s'intéressant au rôle central de la fatigue cognitive dans le système motivationnel.

1.2.1 Hypothèse de l'épuisement de l'énergie

Lors de la révolution industrielle à la fin du XIX^{ème} siècle, la tendance était de considérer la fatigue comme une défaillance énergétique. En effet, cette période reposant principalement sur la production mécanique a mis en évidence l'importance de la notion d'énergie dans la compréhension du fonctionnement des machines d'abord et de la fatigue ensuite. En d'autres mots, le lien production-épuisement énergétique utilisé comme base de compréhension du fonctionnement mécanique s'est ensuite généralisé au travail (physique et mental) de l'Homme.

Ainsi, un manque de productivité dans une activité qu'elle soit physique ou mentale pourrait résulter d'un épuisement de l'approvisionnement en carburant utilisé par le corps ou l'esprit (Rabinbach, 1990). En accord avec ce point de vue, la fatigue serait le résultat direct de l'exécution du travail, indépendamment d'un manque de volonté ou de désir.

A l'inverse, Holding (1983) identifie la fatigue comme « une aversion pour les activités exigeant des niveaux d'effort élevés ». Dans le même ordre d'idées, Bartley et Chute (1947) définissent la fatigue comme un indicateur du besoin de fuir une situation. Lorsqu'un individu ressent de la fatigue cela ne signifie donc pas qu'il est incapable de poursuivre le travail mais plutôt qu'il tente de s'échapper de la situation.

Dès lors, l'argument énergétique ne semble pas être approprié dans l'appréhension de la fatigue et particulièrement de la fatigue mentale. De fait, bien que l'utilisation de glucose par le cerveau lors d'activités mentales diverses ne fait aucun doute, quantifier l'oxydation de ce glucose lors de tâches cognitivement exigeantes, s'avère complexe. Alors que certaines études mettent en évidence une augmentation de la consommation cérébrale de glucose au cours d'activités mentales exigeantes (Fairclough & Huston, 2004), d'autres n'indiquent aucune différence, et ce, même lors de demandes accrues (Marcora, Staiano, & Manning, 2009). Ainsi, il semblerait qu'un niveau plus élevé d'oxydation du glucose dans certaines conditions représente davantage un marqueur d'intégrité des opérations cérébrales qu'un indicateur de fatigue. Autrement dit, aucune preuve ne permet d'affirmer que la fatigue est le résultat d'une déplétion en glucose.

1.2.2 Le modèle de contrôle compensatoire

La première version du modèle de contrôle compensatoire a été développée pour expliquer la stabilité de performance sous stress (Hockey, 1993, 1997, 2005). Elle met en évidence l'existence d'une protection de la performance par priorisation des tâches et intègre donc la présence d'un système de supervision pour le contrôle de l'effort. Ainsi, selon ce modèle, l'exécution des objectifs est maintenue pour les tâches hautement prioritaires par régulation de l'effort. En revanche, cette exécution est davantage négligée pour toutes les autres activités à priorité plus faible.

Bien que cette première approche représente le fondement de la théorie du contrôle motivationnel de la fatigue, son objectif initial était de mieux comprendre la performance à la tâche ainsi que la notion d'effort. Dans ce modèle, la fatigue n'est donc pas directement envisagée mais est perçue comme résultant de l'augmentation de l'effort.

Ce modèle basé sur la notion de contrôle s'appuie sur un postulat particulier : la performance est le résultat de la comparaison entre ce qui doit être effectivement réalisé (l'objectif) et le feedback de ce que l'individu est en train d'effectuer actuellement (le comportement). Il s'agit donc d'un principe de « rétroaction négative » c'est-à-dire que la différence entre ce qu'on attend et ce qui est fait détermine le contrôle. Cette différence peut également être appelée signal d'erreur. Ainsi, afin que ce signal soit nul ou du moins acceptable, les objectifs indiquent à l'individu les critères de performance à atteindre, à savoir, les éléments auxquelles il faut réagir, la vitesse d'exécution requise, le niveau de précision attendu ...; et les modifient.

Dans cette conceptualisation originelle, le contrôle était donc perçu selon deux niveaux.

Un premier niveau inférieur (Loop A, dans **Figure 1**) comprenant les activités routinières pour lesquelles il existe des schémas d'actions appris et un deuxième niveau supérieur (Loop B, dans **Figure 1**) reprenant les activités non-routinières nécessitant l'intervention du fonctionnement exécutif (contrôleur de supervision). Dès lors, la boucle A n'occasionne pas de régulation de l'effort tandis que la boucle B est activée lorsque l'écart entre la performance effectivement exécutée et ce qui est réellement demandé est trop important. En effet, dans ce cas de figure, le moniteur d'effort qui perçoit l'augmentation des demandes et ainsi, le changement d'effort nécessaire, s'active.

Cette activation engendre à son tour la mise en oeuvre du contrôleur de supervision faisant passer le contrôle à un niveau supérieur.

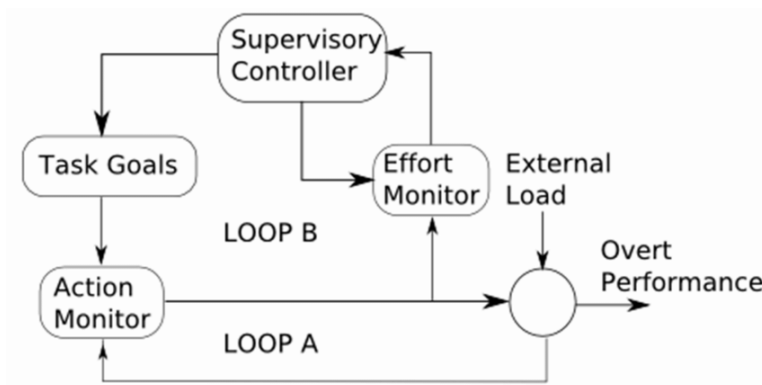


Figure 1. Première version du modèle de contrôle compensatoire. La boucle A représente les activités routinières non basées sur l'effort et la boucle B représente les activités non-routinières basées sur la régulation de l'effort et l'activation du contrôleur de supervision.

Autrement dit, lors de l'exécution d'une tâche aux demandes accrues, selon ce modèle, le système permettrait à l'individu de choisir entre deux stratégies distinctes : (1) augmenter son effort et ainsi, maintenir sa performance à la tâche ; (2) maintenir ou réduire le niveau d'effort actuel et ainsi, diminuer sa performance à la tâche. Dans ce second choix, les objectifs seront alors revus à la baisse afin de répondre adéquatement à ce qui demandé.

Hockey a ensuite étendu ce modèle afin de mieux comprendre les liens entre les fonctions exécutives et de localiser clairement la fatigue. Ainsi, cette seconde version du modèle de contrôle compensatoire met en évidence que l'exécution d'un objectif (G dans la **Figure 2**) est maintenue via des mécanismes de rétroactions positives provenant de la performance effectuée.

De manière similaire à la première version du modèle, les fonctions exécutives sont nécessaires lorsque l'écart entre l'objectif et la performance effectuée est trop important. Dans ce cas, le contrôleur d'effort est activé et mobilise deux types de solutions. La première serait d'augmenter le niveau d'effort afin de maintenir la performance, ce qui aurait pour conséquence une augmentation des coûts. La seconde consisterait à maintenir l'effort aux dépens de la performance, ce qui minimiserait les coûts associés. Lorsque cette dernière solution est choisie, la composante de sélection des objectifs est recrutée afin de maintenir les objectifs ou changer ces objectifs en fonction des besoins motivationnels considérés hiérarchiquement (g1, g2, ..., dans **Figure 2**).

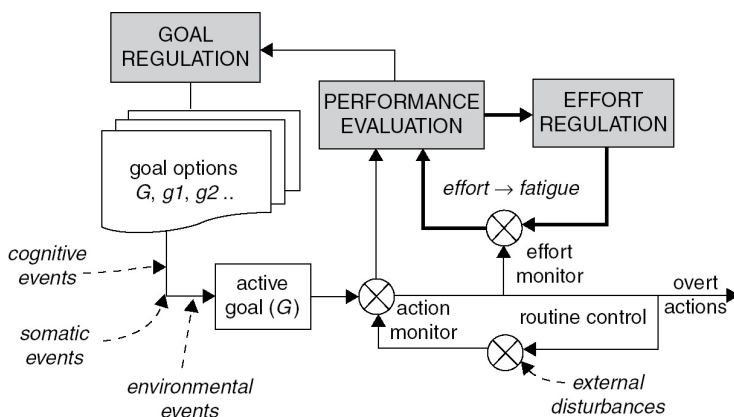


Figure 2. Deuxième version du modèle de contrôle compensatoire de la fatigue. Ce modèle met en évidence le contrôleur de l'effort et la sélection des objectifs.

Contrairement à la première version du modèle, ce modèle revisité s'attarde à distinguer deux composantes distinctes, à savoir, le contrôleur de l'effort et la sélection des objectifs. Il met également en évidence que l'effort accru est facultatif et n'est donc nécessaire que lorsque l'atteinte des objectifs de la tâche est menacée. Dans ce contexte, la fatigue serait le simple résultat de cet effort accru et disparaîtrait une fois le déséquilibre entre performance et objectif résolu.

Afin de considérer la fatigue comme une caractéristique centrale et générale du modèle du contrôle compensatoire, Hockey envisage une troisième et dernière version de ce modèle. En opposition au précédent, qui considérait la fatigue comme une propriété de l'activité régulatrice (Hockey, 2011), celui-ci la considère comme « un sentiment d'inconfort cognitif » apparaissant lors de la présence d'objectifs en concurrence avec les objectifs initiaux de la tâche. En effet, selon cette nouvelle conceptualisation, la fatigue peut se produire dès le début de la tâche. Si un tel sentiment peut être présent avant même que le moindre effort soit nécessaire, cela signifie que la conception ultérieure de la fatigue est obsolète et insuffisante.

Selon cet ultime modèle, l'objectif initial de la tâche est maintenu par la régulation du but. Cette composante constitue le premier processus exécutif. En cas de déséquilibre mineur entre le but et la performance exécutée, le moniteur d'action est activé et reçoit un rétro-contrôle négatif permettant, ainsi, la gestion de ce déséquilibre par des procédures de routine (niveau inférieur). A l'inverse, en cas de conflit majeur, la deuxième composante exécutive, à savoir, l'évaluation de la performance est activée (niveau supérieur). Cette dernière détecte toutes menaces pouvant anéantir la réalisation des objectifs et envoie un signal régulateur à la composante de régulation du but afin de rétablir le but initial. Ce type de déséquilibre majeur peut être engendré par deux sources différentes : (1) les objectifs en concurrence (g1,g2, ... **dans Figure 3**) ; (2) les événements cognitifs, les événements somatiques et les événements environnementaux.

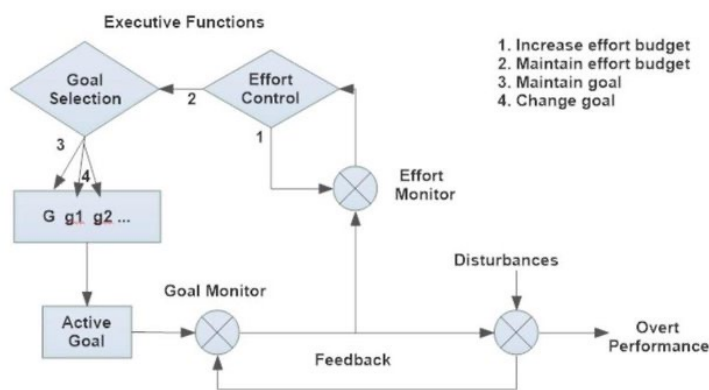


Figure 3. Troisième version du modèle de contrôle compensatoire de la fatigue.

Ce modèle met également en évidence le rôle détenu par l'individu dans la gestion du niveau d'effort initial pour la réalisation de la tâche. Si ce niveau d'effort reste dans les limites de la quantité d'effort disponible, l'activation des fonctions exécutives n'est pas nécessaire. Par contre, si ce niveau dépasse la quantité d'effort disponible, la composante d'évaluation de la performance active le système de régulation de l'effort afin d'accroître le niveau d'effort utilisable. Ce système de régulation de l'effort représente le troisième processus exécutif. Si les coûts à mobiliser sont évalués comme étant supérieurs aux bénéfices attendus, le budget d'effort ne sera pas alloué par la composante de régulation de l'effort et cela aura deux types de conséquences possibles : maintenir ou réduire l'effort aux dépens de la performance ou abandonner l'objectif initial pour favoriser un objectif concurrent.

Alors que la version précédente mettait en avant deux processus exécutifs distincts (contrôleur de l'effort et sélection des objectifs), ce nouveau modèle postule l'existence de trois composantes exécutives : régulation du but, évaluation de la performance et régulateur de l'effort. De plus, il prend en compte les événements cognitifs, somatiques et environnementaux susceptibles de provoquer un conflit majeur entre le but et la performance.

1.2.3 Fatigue mentale et circuit de la récompense

De nombreuses études mettent en évidence le rôle majeur de la dopamine dans la compréhension de la fatigue cognitive (Li, Lindenberger & Bäckman, 2010 ; Li et al., 2009). En effet, étant donné son implication dans les circuits cérébraux de l'évaluation de la récompense et de la motivation (mésencéphale et cortex préfrontal ventral), ce neurotransmetteur permet d'appréhender davantage la fatigue mentale. Par exemple, Chaudhuri et Behan (2000) ont mis en avant que la fatigue cognitive pouvait résulter d'un déséquilibre de la neurotransmission dopaminergique dans le réseau cortico-striatal.

Il a également été envisagé que la fatigue apparait lors d'une production d'effort et d'une évaluation des résultats inappropriées. En d'autres termes, la fatigue mentale résulterait d'une perception inadéquate de l'individu entre les coûts nécessaires à l'action (c'est-à-dire, l'effort) et les bénéfices qui en découlent (c'est-à dire, la récompense). Cette erreur de perception serait due au fonctionnement anormal d'une ou plusieurs régions du réseau cortico-striatal (Boksem & Tops, 2008 ; Chaudhuri & Behan, 2004).

De plus, des études de neuro-imagerie ont montré qu'une diminution de la disponibilité dopaminergique dans les ganglions basaux entraînait une réduction de l'activation neuronale dans la région du striatum, ce qui pouvait engendrer la fatigue (Dobryakova et al., 2013). De même, Nakagawa et al. (2013), ont également détecté une hypoactivité de la région mésencéphalique dopaminergique et dans une moindre mesure du putamen droit chez des sujets sains.

A l'inverse, Moeller et al. (2012) ont démontré que la fatigue mentale pouvait entraîner une augmentation de l'activité du mésencéphale dopaminergique. En effet, ces auteurs se sont intéressés à l'influence du méthylphénidate (médicament favorisant la libération de dopamine) sur les performances à une tâche induisant de la fatigue, chez des sujets sains et chez des toxicomanes. Les participants n'ayant pas reçu le médicament ont montré une réduction de l'activité dans le cortex cingulaire antérieur (impliqué dans la régulation de l'effort) et une augmentation des indicateurs comportementaux de fatigue. Les patients cocaïnomanes ont également présenté une diminution de ce cortex cingulaire mais l'administration du méthylphénidate a engendré un effet inverse, en augmentant l'activité dans cette région.

La majorité de ces recherches examinent les corrélats neuronaux impliqués dans la fatigue cognitive en étudiant les changements cérébraux fonctionnels et structurels lors de tâches induisant une fatigue, offrant ainsi de nouvelles perspectives dans la compréhension du phénomène. Cependant, aucune d'entre elles ne fournit de preuves solides afin d'affirmer si cette fatigue mentale provient d'un dysfonctionnement d'une région spécifique du réseau cortico-striatal ou au contraire, de l'interaction entre les différentes structures de ce réseau.

En plus des changements d'activation observés dans ce réseau spécifique, plusieurs études ont également mis en évidence des modulations des connexions dans le réseau du mode par défaut (MPD)⁶. Ainsi, la majorité de ces recherches indiquent que le niveau d'activation de ce réseau est inversement corrélé au comportement dirigé vers un but. En d'autres mots, la connectivité du MPD augmente lorsque l'activité dirigée vers un but précis diminue et inversement.

⁶ Réseau constitué de régions cérébrales actives lorsqu'un individu n'est pas focalisé sur le monde extérieur et lorsque le cerveau se trouve au repos mais est tout de même actif. Lors de la réalisation d'une tâche, ce réseau est désactivé et un autre réseau prend le relais.

Dans ce contexte, Esposito et al. (2014) interprètent les changements des connexions du réseau du mode par défaut induits par la fatigue comme des mécanismes compensatoires permettant de réorienter les ressources cognitives vers la tâche.

1.3 Causes

Selon Desmond et Hancock (2001), la fatigue mentale peut être induite par différents niveaux de charge cognitive : une charge cognitive dite faible ou une charge cognitive dite forte. Ces auteurs soulignent, ainsi, qu'il existe une distinction entre fatigue active et fatigue passive, associées à des conditions de charge mentale élevée et à des conditions de charge mentale faible, respectivement. De ce fait, la fatigue active résulte « d'ajustements perceptivo-moteurs continus et prolongés liés à la tâche », tandis que la fatigue passive est issue « d'une surveillance du système avec des exigences de réponses perceptivo-motrices manifestes rares ou inexistantes ». Ainsi, alors que la première peut être induite par une tâche prolongée et exigeante, demandant un ajustement constant du système perceptif ou moteur; la seconde se manifeste lors d'une tâche dépourvue d'exigences, nécessitant une surveillance et une vigilance en continu. En d'autres mots, la fatigue cognitive peut résulter d'une surcharge cognitive associée à la difficulté de la tâche ou d'une sous-charge cognitive associée à la monotonie (Hancock & Desmond, 2000 ; May & Baldwin, 2009).

Dans la littérature, différentes techniques sont utilisées afin d'induire de la fatigue mentale, en voici quelques-unes.

1.3.1 Modulation de la durée de la tâche

Dans la littérature, une diminution de la performance à des tâches comportementales a souvent été associée à un effet du temps. De fait, une technique fréquemment utilisée afin d'explorer les effets de la fatigue est la manipulation de la durée de la tâche. Cette technique également appelée « Time-On-Task » consiste en l'exécution d'une tâche cognitive de manière continue et sur une longue période de temps. L'approche « Time-On-Task » est depuis longtemps mise en lien avec l'hypothèse de l'épuisement de l'énergie, selon laquelle les personnes deviennent cognitivement fatiguées lorsqu'un appauvrissement de leurs ressources limitées a lieu (Hockey, 2013).

Cette méthode a été employée dans de multiples recherches.

Par exemple, Ackerman et al. (2009) ont administré trois types de batteries de durée différente (3 heures, 4 heures et 5 heures) à un échantillon de 239 étudiants universitaires. Ces batteries étaient essentiellement constituées de tâches faisant intervenir les compétences verbales et le raisonnement arithmétique. Comme attendu, le sentiment de fatigue subjective augmentait proportionnellement avec le temps consacré à la tâche. De plus, une réduction plus importante des performances à cette tâche était constatée dans la condition « tests longs » comparativement à la condition « tests courts ».

En 2017, Melo, Nascimento et Takase ont examiné les effets de la durée d'une tâche de type Go/NoGo de 50 minutes sur les performances de sujets âgés de 18 à 24 ans. L'épreuve était divisée en 5 blocs de 250 essais. Chacun de ces essais débutait par la présentation d'une croix au centre de l'écran suivie des stimuli (un cercle rouge ou un cercle vert). Il s'agissait pour les participants d'appuyer sur le bouton gauche en cas de stimuli verts et sur le bouton droit en cas de stimuli rouges. Pour chaque bloc, les auteurs ont récolté différentes mesures, à savoir, les temps de réaction aux stimuli cibles, les temps de réactions aux stimuli non cibles, les omissions et les erreurs. Les résultats ont montré une influence significative de l'effet du temps passé à la tâche sur les performances cognitives. En effet, une augmentation des temps de réaction aux stimuli cibles ainsi qu'un accroissement des omissions ont été constatés lors des blocs 4 et 5 de la tâche.

De manière similaire, une étude cherchant à explorer la fatigue cognitive à travers trois groupes d'âge (jeunes, middle-aged et âgés) a analysé les performances des sujets à une tâche de Stroop de 160 minutes (Gilsoul, Libertiaux et Collette, 2021). La durée de l'épreuve a été divisée en 4 blocs de 40 minutes. Cette recherche a montré que les jeunes et les sujets d'âge moyen augmentaient leurs temps de réaction en fonction du temps passé à la tâche contrairement aux personnes âgées qui ne le faisaient pas. Un effet significatif de l'item a également été constaté : les temps de réaction étaient plus élevés pour les items dits « incongruents où la couleur de l'encre n'est pas similaire au mot imprimé que pour les items « congruents » où la couleur de l'encre est similaire au mot imprimé et les items « neutres » où un symbole « XXXX » est imprimé de l'une des quatre couleurs.

1.3.2 Modulation de la charge cognitive

Un autre paradigme ne nécessitant pas une tâche de longue durée mais proposant plutôt de moduler la charge cognitive imposée au sujet est également employé pour induire la fatigue mentale. La charge mentale ou charge cognitive constitue un facteur pouvant impacter la fatigue cognitive. Elle représente la quantité de capacité de traitement du sujet qui est requise pour l'exécution d'une tâche à un moment donné (Gopher et Donchin, 1986). Selon la conception plus récente de Ayaz et al. (2012), la charge mentale consiste en « l'intensité du travail du cerveau pour répondre aux exigences de la tâche ».

En considérant ces définitions, la qualité des performances d'un individu est donc grandement dépendante de cette charge ainsi que de la motivation d'une personne à réaliser la tâche demandée. En effet, malgré une certaine motivation, lorsque la surcharge est prolongée et trop importante, l'individu se fatigue et devient ainsi, moins performant. Autrement dit, il semble que les baisses de performances s'expliquent par la présence d'exigences surpassant les capacités de traitement limitées du sujet (c'est-à-dire une charge de travail mentale élevée). Selon cette idée, plusieurs chercheurs s'accordent sur le fait que les performances s'amenuisent davantage dans des conditions de charge mentale élevée que lors de conditions de charge mentale faible.

Dans une expérience, Borragán et al. (2017) ont administré la Time Load Dual Back (TDLB) consistant en une double tâche associant une simple tâche de mise à jour en mémoire de travail de type « N-back » (les participants devaient indiquer lorsque la lettre présente à l'écran était la même que la précédente) et une tâche de décision de parité de chiffres. La durée de présentation des stimuli (STD) était modulée pour être soit plus longue soit plus courte et ainsi, induire soit une condition de charge mentale élevée soit une condition de charge mentale faible. Les résultats ont démontré que la performance à la tâche était meilleure en condition de charge mentale faible comparativement à la condition de forte charge.

En opposition, différents auteurs (Manly et al., 1999 ; Robertson et al., 1997) ont également montré un déclin des performances (ralentissement des temps de réaction ou augmentation des erreurs) au cours du temps à des tâches de vigilance dépourvues d'exigences. Ce phénomène est appelé « décrétement de la vigilance ». Ce dernier est attribué à un retrait du système attentionnel de surveillance, entraîné par une sous-activité dans le cadre d'une charge de travail faible.

Par exemple, dans leur étude réalisée chez des sujets sains réalisant une tâche longue de 30 minutes, Shigihara et al. (2013) ont mis en évidence que les participants se montraient ralentis uniquement dans la condition peu exigeante en ressources cognitives.

De plus, l'étude de Pattyn et al. (2008) a confirmé que réaliser une tâche de vigilance était associée à une absence de variation du système sympathique (lié généralement à la surcharge) ainsi qu'à une augmentation de l'activité parasympathique (liée généralement à la sous-charge). Autrement dit, ces résultats indiquent qu'une tâche de vigilance induit un désengagement attentionnel plutôt qu'une surcharge de la capacité d'attention et vont donc dans le sens d'une hypothèse de la sous-charge pour expliquer la baisse de vigilance.

Prenant en considération ces différents éléments, il apparaît que la capacité à maintenir la concentration de l'activité cognitive sur une tâche donnée, c'est-à-dire l'attention soutenue⁷ ou la vigilance⁸, est un facteur déterminant de la performance cognitive. Hancock et Desmond (2001) ont alors proposé que l'attention soutenue est davantage liée à des conditions de surcharge cognitive alors que la sous-charge est quant à elle, en lien avec la vigilance.

1.3.1.1 Manipulation de la difficulté

Une première manière de moduler la charge mentale est de manipuler la difficulté de la tâche. La complexité des tâches a, en effet, été reconnue comme ayant une influence importante sur la charge cognitive des participants à la tâche, et donc, sur leur performance (Jacko & Ward, 1996 ; Zhao, 1992).

Ce paradigme suppose que lors d'exigences cognitives particulièrement élevées, les individus consomment davantage de ressources et atteignent, par conséquent, un plus haut niveau de fatigue, et ce, malgré une épreuve de courte durée (Liu & Li, 2012). Khaksari et al. (2019) ont illustré cette technique dans leur étude durant laquelle une tâche de type n-back était administrée à des sujets sains d'âge moyen.

⁷ L'attention soutenue renvoie à la capacité de maintenir un niveau d'efficacité élevé et stable au cours d'une activité cognitive sur une longue période de temps.

⁸ La vigilance renvoie à la capacité à maintenir un niveau d'efficacité attentionnelle suffisant dans des tâches monotones, de longue durée et au cours desquelles le nombre de stimuli est peu élevé.

Le design se présentait comme suit : les participants réalisaient d'abord la condition « 2- back » pour laquelle il leur était demandé de cliquer lorsque la lettre du stimulus cible était la même que la lettre des 2 étapes précédentes. Ensuite, après une période de repos (une croix était affichée pendant 15 secondes à l'écran), ils effectuaient la condition « 3-back » pour laquelle ils devaient cliquer lorsque la lettre du stimulus cible était la même que la lettre des 3 étapes précédentes. Les résultats ont montré que les performances des sujets étaient considérablement plus élevées pour la tâche de type 2-back comparativement à la condition 3-back, montrant l'importance de la complexité d'une tâche sur la charge mentale, et par conséquent, sur la fatigue cognitive.

1.3.1.2. Procédure en double tâche

Outre la manipulation de la difficulté de la tâche, l'utilisation d'une procédure en double tâche peut également permettre de moduler la charge cognitive. En effet, différentes études neuropsychologiques ont mis en évidence des effets indirects des multitâches (ou double tâche) sur la fatigue cognitive. Celles-ci consistent en une série de sous-tâches faisant appel à des fonctions cognitives simultanées telles que la mémoire de travail, la mise à jour et la perception.

La caractéristique centrale du multitâche est donc qu'il faut gérer plusieurs tâches simultanément dans un temps limité, ce qui entraîne un conflit de ressources dans le traitement de l'information. Dans la littérature, deux cas particuliers sont envisagés pour définir la double tâche : (1) un multitâche dit séquentiel dans lequel les différentes tâches sont réalisées séquentiellement avec un changement de tâche ; (2) un multitâche simultané dans lequel les différentes tâches sont effectuées presque simultanément.

De plus, le lien entre mémoire à court terme et attention n'est plus à faire. En effet, toutes deux interagissent afin de nous permettre de maintenir nos objectifs et de nous concentrer sur les éléments pertinents de la tâche à effectuer. De nombreuses recherches utilisant le paradigme en double tâche ont également établi une influence de la mémoire de travail sur l'attention. Ainsi, en cas de multitâches, les demandes en mémoire de travail augmentent, réduisant considérablement les ressources attentionnelles disponibles. Ces dernières étant limitées, lorsqu'une des tâches devient plus chargée, il restera moins de ressources pour les autres tâches. Cela engendrera une surcharge cognitive qui, à son tour, génèrera une fatigue, responsable d'un compromis dans les différentes performances aux tâches.

Cela peut être appuyé par la théorie des ressources multiples (Wickens, 2002 ; et Wickens, 2008). Elle propose que la multitude de tâches n'est pas en concurrence avec une réserve de ressources unique mais consiste en plusieurs ressources de traitement différenciées.

Une étude cherchant à évaluer les niveaux de charge mentale de 12 sujets lors de l'exécution d'une double tâche, a utilisé le test SIMKAP (Lim et al., 2015). Ce dernier est constitué de trois parties distinctes. La première mesure la vitesse et la précision de l'exécution, la seconde consiste en des tâches intellectuelles présentées oralement et la dernière évalue les capacités simultanées. Dans cette ultime partie, le sujet réalise des tâches similaires à celles effectuées antérieurement mais de manière simultanée (e.g. repérer sur un écran tous les éléments barrés tout en répondant à des questions orales). Les données d'encéphalographie ont montré une meilleure précision durant la réalisation des deux premières parties du test par rapport à la dernière section.

De façon plus spécifique, Xie et Salvendy (2000) ont développé un cadre théorique afin de prédire la charge mentale à la fois dans des environnements de tâches simples et dans des environnements de multitâche tout en prenant en compte les facteurs individuels. Ils ont également proposé de classer et de définir la charge mentale comme suit : la charge de travail instantanée, la charge de travail moyenne, la charge de travail accumulée, la charge de travail maximale et la charge de travail globale. Dans l'objectif de valider leur modèle, ces auteurs ont réalisé une étude expérimentale sur 60 sujets. Cette dernière consistait en la réalisation de tâches arithmétiques informatisées en simple (e.g. répondre à 20 calculs mentaux simples) ou double tâche (e.g. répondre à 20 calculs mentaux simples tout en répondant à des questions de culture générale en vrai ou faux). Le niveau de charge mentale était modulé par la vitesse de présentation des stimuli. Les résultats ont démontré que la charge mentale pouvait être influencée par les deux types de facteurs, à savoir, les facteurs liés au type de tâche et les facteurs individuels. Ainsi, la charge de travail dans un environnement mono-tâche était inférieure de 29% à la charge dans un environnement multitâche.

1.4 Evaluation

1.4.1 Mesures subjectives

Une première manière d'évaluer la fatigue cognitive consiste en l'utilisation de mesures subjectives récoltées au moyen de différents questionnaires d'auto-évaluation mesurant les sensations d'épuisement. Certains questionnaires permettent d'évaluer la fatigue de trait (le niveau de fatigue général de la personne), d'autres la fatigue d'état (le niveau de fatigue à un moment précis). Il s'agira ensuite de comparer les résultats obtenus à ces questionnaires à des mesures objectives de fatigabilité recueillies via une tâche comportementale. De plus, des échelles mesurant des états de somnolence et de fatigue peuvent également être administrées avant et après la tâche afin d'évaluer l'évolution des participants concernant les effets de la tâche cognitive sur la fatigue ressentie (VAS ; Price et al., 1983).

1.4.2 Mesures objectives

Une seconde manière d'évaluer la fatigue cognitive se fait via la récolte de mesures objectives de fatigabilité. Cette méthode consiste à analyser les performances lors de tâches comportementales. Cette manière de faire est illustrée notamment dans l'étude de Trejo et al. (2005), qui ont quantifié la fatigabilité lors d'une tâche d'arithmétique de 3 heures via l'augmentation des temps de réaction et la diminution de la précision (taux d'erreur).

Une autre manière de quantifier objectivement la fatigue mentale réside dans l'analyse des changements de performances à différents tests neuropsychologiques lors d'un effort mental soutenu.

Plus spécifiquement, certaines études se sont intéressées à comparer les résultats à des tests neuropsychologiques avant et après l'administration d'une tâche comportementale. Par exemple, Barwick et al. (2012) ont comparé les performances de participants en pré et en post-test via une tâche de Stroop. Les résultats de cette étude ont démontré un nombre d'erreurs d'interférence plus important en post-test comparativement au pré-test. Plus récemment, Volker et al. (2016) ont également évalué les performances à une épreuve d'inhibition avant et après une tâche de vigilance psychomotrice chez des sujets jeunes et âgés. Les résultats ont indiqué davantage d'erreurs ainsi qu'une augmentation du temps de réponse durant le post-test.

1.4.3 Mesures physiologiques

Des chercheurs se sont également tournés vers des mesures davantage physiologiques de la fatigue mentale. Parmi elles, l'activité cérébrale mesurée par l'électroencéphalographie (EEG; Gergelyfi et al., 2015) ou l'imagerie cérébrale fonctionnelle (IRMf; Gilsoul, 2020).

Outre ces données neurologiques, des informations davantage périphériques peuvent être récoltées via l'électrocardiographie (ECG; Abbasi et al., 2018) ou encore au travers de l'électro-oculographie (EOG) ou de la pupillométrie (Bafna & Hansen, 2021). Ces différentes technologies permettent une évaluation continue de la fatigue et ne nécessitent donc pas d'arrêts en cours de tâche. De plus, les diverses données récoltées ne sont pas entachées par une potentielle subjectivité.

Parmi toutes les techniques citées ci-dessus, la pupillométrie, désignant l'étude des variations du diamètre pupillaire, est la plus répandue et la plus utilisée dans l'étude de la fatigue mentale. En effet, les modifications de ce diamètre constituent un indice physiologique fiable du fonctionnement cognitif et ainsi, de la fatigue cognitive. La réponse pupillaire est associée à l'activité du locus coeruleus, une structure sous-corticale responsable de la conduction noradrénergique dans le cerveau. Ce locus coeruleus est notamment impliqué dans de nombreux processus tels que la récupération en mémoire, l'attention sélective ou encore dans les variations de stress.

Notons que différentes précautions méthodologiques doivent être envisagées lors de l'utilisation de la pupillométrie. En effet, outre la fatigue, la dilatation pupillaire est provoquée par de nombreux facteurs, modulant les systèmes parasympathique et orthosympathique (Mandrick et al., 2016). Il s'agit notamment de la peur, de l'habitude, du sursaut acoustique, de la lumière... C'est pourquoi il est essentiel de rester attentif à ces différents paramètres pouvant provoquer des fluctuations de diamètre de la pupille indépendamment de l'objectif fondamental de l'étude. De plus, les modifications du diamètre pupillaire étant pourtant généralement involontaires, il est possible que certaines personnes apprennent à induire une dilatation en manipulant leurs pensées (Bafna & Hansen, 2021).

2. Données oculaires

Comme mentionné précédemment, la pupillométrie constitue une des mesures physiologiques les plus utilisées dans l'exploration de la fatigue mentale. Concrètement, cette pupillométrie désigne l'étude des changements du diamètre de la pupille en fonction du traitement cognitif (Sirois et al., 2014). Une dilatation de la pupille est observée lorsque les participants sont dans des conditions d'attention ou de charge cognitive élevée (Reilly et al., 2018). En effet, dans leur expérience portant sur 34 étudiants universitaires et faisant appel à cette technique, Weber et al., (2021) ont démontré des variations du diamètre de la pupille en fonction de la difficulté de la tâche. En d'autres mots, une dilatation pupillaire était constatée chez les sujets lorsqu'ils devaient rappeler davantage de chiffres présentés séquentiellement à l'écran.

Bien que l'association entre le diamètre de la pupille, la charge mentale et la fatigue cognitive a été bien établie, d'autres mesures peuvent être récoltées à partir de l'oeil, à savoir, les saccades et micro-saccades, la dérive oculaire, les clignements yeux et l'ouverture des paupières.

Dans ce présent travail, nous n'aborderons en détails que les paramètres relatifs à la pupille (taille et dilatation) ainsi que les données relatives aux paupières (ouverture, nombre et fréquence des clignements). Dès lors, par souci de clarté, nous ne parlerons pas de « pupillométrie » mais plutôt de « données oculaires ».

2.1 Pupille

La pupille représente la partie centrale de l'oeil. Il s'agit d'un orifice circulaire situé au centre de l'iris. Elle peut donc être considérée comme le diaphragme de l'oeil et joue un rôle central dans la vision. En effet, elle permet la régulation de la quantité de rayons lumineux réfractés par la cornée et acheminés vers la rétine.

La taille de la pupille est définie par la tonicité de deux muscles distincts, à savoir, le muscle dilatateur et le muscle sphincter, tous deux contrôlés par le système nerveux autonome. Ainsi, le dilatateur pupillaire est innervé par des fibres nerveuses sympathiques et sa contraction engendre une augmentation du diamètre de la pupille. Dans ce cas, on parle alors de mydriase. Cette réaction physiologique se produit lorsque l'intensité lumineuse est trop faible, notamment dans la pénombre ou lorsque l'oeil doit observer un objet éloigné.

A l'inverse, on parle de myosis lorsque la contraction du sphincter pupillaire innervé par des fibres parasympathiques entraîne une diminution du diamètre pupillaire. Ce phénomène de myosis apparaît lorsque la quantité de lumière est trop importante, notamment lorsqu'il s'agit d'observer un objet proche. En résumé, alors que le muscle dilatateur provoque une dilatation de la pupille; le muscle sphincter, lui, génère une contraction.

Outre l'intensité de la lumière, d'autres facteurs sont susceptibles d'influencer le diamètre pupillaire. Parmi ceux-ci, citons les facteurs émotionnels et psychologiques (e.g. la surprise, la peur), la restriction et la variation de sommeil ou encore l'âge. En effet, il semblerait que le diamètre ainsi que la réactivité pupillaire diminuent au cours de l'avancée en âge. De plus, certains phénomènes davantage cognitifs peuvent également provoquer un changement de ce diamètre. C'est le cas notamment de la fatigue mentale.

Ainsi, de nombreuses études ont utilisé les changements du diamètre de la pupille dans l'objectif de dépeindre la fatigue cognitive. La majorité de ces recherches se sont intéressées aux caractéristiques suivantes : le diamètre de base, la dilatation en fonction du temps, le pic de dilatation, l'amplitude et la latence de constriction. Par exemple, Burke al. (2018) ont montré une diminution du diamètre pupillaire via l'utilisation d'une tâche de Stroop prolongée (supérieure à deux heures) induisant la fatigue. Dans le même ordre d'idées, Marandi et al. (2018) ont examiné la dilatation de la pupille chez des sujets jeunes et chez des sujets plus âgés réalisant une épreuve informatisée de 40 minutes. Les résultats ont mis en évidence une dilatation de la pupille au cours de la tâche dans les deux groupes d'âge, mais particulièrement chez les sujets plus âgés.

En résumé, le fatigue cognitive constitue l'un des facteurs principaux influençant le diamètre pupillaire. En effet, de nombreuses études ont démontré une dilatation de la pupille lors de la réalisation de tâches prolongées, induisant la fatigue.

Outre ces données pupillaires, les paramètres palpébraux peuvent également être un bon indicateur du niveau de fatigue cognitive.

2.2 Paupière

La paupière représente une lame cartilagineuse recouverte de peau qui joue un rôle de protection de la face antérieure de l'oeil contre les agressions extérieures. De plus, elle permet également le blocage ou la diminution de l'intensité lumineuse pénétrant dans les yeux (lors du sommeil, par exemple) ainsi que l'hydratation et le nettoyage de la cornée.

Les mouvements palpébraux sont permis par l'activation de trois types de muscles, à savoir, le muscle orbiculaire, le muscle de Müller et le muscle releveur. Alors que le muscle orbiculaire et le muscle de Müller assurent la fermeture de la paupière, le muscle releveur permet son ouverture.

Comme mentionné auparavant, tout comme la dilatation pupillaire, les données relatives à la paupière (clignements) constituent un indicateur fiable de la fatigue mentale. Ainsi, deux caractéristiques de la catégorie des clignements sont particulièrement étudiées dans le contexte de la fatigue cognitive. Il s'agit du nombre de clignements, de la fréquence⁹ ainsi que de la durée de ceux-ci.

Plusieurs études ont démontré une augmentation du nombre de clignements des yeux lors de l'exécution de tâches cognitives prolongées induisant la fatigue (Borragán et al., 2018; Herlambang et al., 2019 ; Marandi et al., 2018).

En ce qui concerne la durée des clignements, les résultats apparaissent plus mitigés. En effet, Song et al. (2015), ont mis en avant une diminution de la durée moyenne des clignements à mesure que la charge mentale augmente. A l'inverse, une autre étude réalisée sur dix opérateurs contrôlant l'amarrage de véhicules spatiaux n'a montré aucune différence significative entre les deux phases de contrôle c'est-à-dire la phase de contrôle de suivi (condition de faible charge mentale) et la phase de contrôle de la précision (condition de haute charge mentale). Il nous semble important de mentionner que le manque de consensus concernant les données relatives à la durée moyenne des clignements pourrait s'expliquer par la méthodologie employée dans ces études. En effet, ces dernières ont utilisé des tâches de contrôle de conduite pour induire la fatigue alors que celles ayant abouti à des corrélations positives entre fatigue et clignements, ont utilisé des tâches davantage cognitives.

⁹ La fréquence des clignements est définie comme le nombre de clignements par essai.

En résumé, les données relatives à la paupière constituent un indicateur fiable de la fatigue mentale. Particulièrement, il a été admis que le nombre et la fréquence des clignements des yeux étaient positivement corrélés à la charge mentale. Autrement dit, lors de l'exécution de tâches prolongées, un accroissement des clignements en nombre et en fréquence était observé à mesure que la charge cognitive augmente. En revanche, les données relatives à la durée des clignements semblent davantage controversées, notamment, en raison de difficultés méthodologiques.

La dilatation pupillaire et les données palpébrales constituent, incontestablement, des marqueurs physiologiques fiables reflétant la charge mentale, et par conséquent, la fatigue cognitive. Dès lors, ces dernières années, de nombreuses recherches se sont principalement attachées à investiguer et à comprendre les mécanismes sous-jacents aux modifications des caractéristiques oculaires en lien avec la fatigue.

2.3 Relation entre paramètres oculaires et fatigue mentale

« La théorie du gain adaptatif » (Guedj, 2016), développée dans le domaine des neurosciences, a été utilisée afin d'explorer les mécanismes influençant la taille de la pupille. Cette théorie postule un rôle central des neurones du locus coeruleus (LC) dans l'optimisation des performances comportementales par (1) une amélioration de la réponse neuronale pour les stimuli pertinents afin de réaliser l'activité ; (2) une régulation de l'équilibre entre l'exploitation et l'exploration. Autrement dit, ce modèle théorique permet d'expliquer la relation entre l'activité neuronale du locus coeruleus et la motivation et l'éveil à la tâche.

Les neurones du LC agissent selon deux modes d'activité : un mode phasique et un mode tonique. Le premier permet la libération de la norépinéphrine engendrant une augmentation de la dilatation pupillaire durant la tâche. Dans ce cas, une amélioration de la tâche et par conséquent, une optimisation de la performance sont observées. Le second provoque la libération de la noradrénaline entraînant une baisse de performance à la tâche.

En résumé, alors que le mode phasique permet une exploitation des tâches, le mode tonique, quant à lui, génère une exploration de ces tâches.

Hopstaken et al. (2015b) ont envisagé un troisième mode d'activité des neurones du LC, à savoir, le mode de désengagement. Dans ce mode, une dilatation de la pupille ainsi qu'une diminution de son diamètre sont constatées. Ces modifications physiologiques sont accompagnées d'un désengagement pour la tâche en cours et d'un niveau attentionnel plus faible. Ainsi, selon cette conception, le diamètre pupillaire diminue en fonction de la durée de la tâche.

De la même manière, les études s'intéressant aux clignements des yeux ont également montré une augmentation de la durée et de la fréquence en fonction du temps consacré à la tâche. En d'autres termes, alors qu'une réduction de la fréquence des clignements est observée en début d'activité, une augmentation se produit par effet de compensation lors d'expériences de longue durée.

D'un point de vue neurologique, la fréquence des clignements est considérée comme un indicateur du niveau de dopamine. Ce neurotransmetteur joue un rôle central dans les processus de récompense (Gergelyfi, 2021) ainsi que dans la régulation de la cognition (Lou, 2009). Dès lors, lorsque le cerveau détecte un déséquilibre entre les attentes de la tâche et les récompenses obtenues, la dopamine diminue provoquant une sensation de fatigue. De plus, la réduction du niveau dopaminergique est associée à une diminution de la fréquence des clignements.

Notons que ces changements observés dans les caractéristiques palpébrales doivent être approfondis lors de recherches ultérieures.

3. Population middle-aged

3.1 Définition

Classiquement, l'âge moyen est considéré comme la période d'âge qui précède l'apparition de la vieillesse (Britannica, T. Editors of Encyclopaedia, 2007). Bien que la limite le définissant soit quelque peu arbitraire et différente d'un individu à l'autre, il est généralement décrit comme la période allant de 40 à environ 60 ans.

La personne d'âge moyen connaît de nombreux changements psychologiques tels que le départ des enfants, l'arrivée des grand-parents dans le foyer, l'accomplissement professionnel ou encore la prise de conscience de la mortalité. Durant cette période, le sujet se tourne davantage vers le passé et ses souvenirs au détriment de la projection dans le futur.

Toutefois, les plus grandes modifications ont lieu au niveau physiologique et cognitif avec une diminution des capacités physiques et cognitives.

Selon Finch (1991), le milieu de la vie est une période peu étudiée dans la littérature. Cela peut être expliqué par deux raisons principales : la première étant la difficulté à recruter des sujets d'âge moyen, en raison d'une vie professionnelle et familiale extrêmement active ; la seconde constituant la difficulté à saisir adéquatement cette période compte tenu de sa grande variabilité. Ainsi, actuellement, la majorité des recherches se concentrent sur la compréhension du vieillissement cognitif chez l'adulte âgé en comparant cette population à des adultes jeunes. Cependant, l'âge adulte moyen se révèle particulièrement pertinent afin de répondre à cette question: « quand commence le déclin cognitif ? ».

3.2 Modifications cognitives

D'un point de vue cognitif, les sujets d'âge moyen constituent une population dont les performances se situent entre celles des sujets jeunes et celles des personnes âgées (Lachman et al., 1994). Néanmoins, il est admis qu'il existe de grandes variabilités inter-individuelles en ce qui concerne la cognition liée à l'âge. Autrement dit, certains sujets d'âge moyen obtiennent des performances similaires à celles des sujets jeunes et d'autres davantage à celles des individus âgés (Gunstad et al., 2006).

Bien que les connaissances sur l'âge adulte moyen en soit à leurs débuts, la plupart des études s'accordent sur le fait que les capacités numériques et verbales ainsi que les connaissances générales semblent épargnées durant cette période (Bielak et al., 2013 ; Park et al., 2013). En revanche, d'autres compétences comme la vitesse de traitement, le raisonnement, certains aspects mnésiques ou encore les fonctions exécutives s'affaiblissent dès l'âge moyen voire même avant (Ferreira et al., 2014).

Dès lors, en considérant les résultats en neurobiologie, il convient d'accepter que le réseau exécutif semble être un des premiers à décliner avec l'âge (Fuster, 1989 ; Haug et al., 1983 ; Smith, 1984 ; Terry, De Teresa, & Hansen, 1987 ; Woodruff-Pak, 1997). En accord avec cette idée, Zhou et al. (2011) ont mis en évidence des différences cognitives significatives entre les réseaux d'alerte et les réseaux exécutifs. Ces derniers étant davantage affectés par l'âge et déclinant relativement tôt au cours de l'âge adulte moyen.

Plus récemment, une étude ayant évalué différentes fonctions cognitives (fonctions exécutives, vitesse de traitement, attention, mémoire épisodique...) parmi des sujets d'âge moyen (40-50 ans) et des sujets âgés (65 ans) a mis en avant des déficits au niveau exécutif dès l'âge de 50 ans (Ferreira et al., 2015), suivis par la suite d'un ralentissement de la vitesse de traitement.

Outre un ralentissement de la vitesse de traitement de l'information, une augmentation des temps de réaction (TR) est également constatée. Ainsi, il semblerait que les TR complexes (ou de choix, c'est-à-dire lorsqu'il y a plusieurs réponses à différents stimuli) soient plus vulnérables au ralentissement lié à l'âge comparativement aux TR simples (c'est-à-dire lorsqu'il n'y a qu'une seule réponse à un stimulus unique) qui restent stables jusqu'à 50-60 ans environ.

Selon le modèle de perte d'information de Myerson, Hale, Wagstaff, Poon et Smith (1990), les différentes étapes de traitement prennent plus de temps chez les sujets d'âge moyen que chez les sujets jeunes, pour compenser les pertes d'informations. En raison de cette compensation insuffisante chez les adultes moyens, les temps de réaction augmentent proportionnellement au nombre d'étapes et d'informations à traiter.

La théorie de la vitesse de traitement de Salthouse (1996) va également dans ce sens. Les procédures de traitement complexes dépendant des produits d'opérations plus simples, si ces produits sont moins disponibles en raison d'une vitesse de traitement plus faible, il se pourrait que les effets du ralentissement lié à l'âge soient plus importants dans le traitement d'informations complexes.

3.3 Effets de la fatigue cognitive

Comme mentionné précédemment, des déclinis cognitifs peuvent avoir lieu à la période d'âge moyen. Cependant, ces déficits apparaissent moins importants que ceux rencontrés par les sujets âgés. En raison de ces capacités cognitives relativement bien préservées et d'une vie professionnelle et familiale encore très active, les sujets d'âge moyen pourraient donc mieux résister à la fatigue cognitive que les individus plus âgés.

Notons toutefois, que l'hypothèse contraire peut également être envisagée : les personnes d'âge moyen faisant face à de nombreux facteurs de stress (travail, gestion des enfants, prise en charge des parents ...) ainsi qu'à des exigences cognitives intenses au quotidien, elles seraient potentiellement plus susceptibles de subir les effets délétères de la fatigue mentale.

Une étude de De Jong et al. (2018) incluant des participants jeunes (N = 24, 18-30 ans) et d'âge moyen (N = 24, 50-60 ans), s'est intéressé à l'influence de l'âge sur la fatigue cognitive, via l'utilisation d'une tâche de dactylographie et d'une épreuve de détection de cible. Les résultats ont montré que dans les deux groupes, les participants percevaient une fatigue mentale plus importante en fin de tâche qu'en début de tâche. De plus, une augmentation des temps de frappe et des temps de réponse a également été constatée tant chez les sujets jeunes et que chez les adultes moyens. Malgré ces observations dans les deux populations, il semblerait que la fatigue ait influencé la précision uniquement chez les individus jeunes. Ces éléments corroborent des études antérieures (Starns & Ratcliff, 2010 ; Rabbitt, 1979 ; Lucci et al., 2013) signalant que les personnes jeunes se centrent davantage sur la vitesse alors que les personnes plus âgées privilégient plus particulièrement la qualité de performance.

Dans une recherche menée par Gutchess et Morcom (2003), des différences entre sujets jeunes et sujets plus âgés ont été constatées dans les performances mnésiques. Ces différences se marquent principalement par une augmentation des fausses alarmes et une diminution de performance dans les tâches de reconnaissance. Cela suggère que les personnes d'âge moyen doivent mobiliser davantage d'efforts cognitifs afin de maintenir leurs performances au niveau de celles des jeunes adultes (Jacobs et al., 2013 ; Klaassen et al., 2013, 2014). Autrement dit, en condition de charge mentale élevée ou encore lors d'une activité exigeante sur une période de temps prolongée, les individus d'âge moyen auraient plus de difficultés pour maintenir leur niveau de performance.

En 2014, Klaassen et al. ont réalisé une recherche sur 16 enseignants de sexe masculin d'âge moyen et sur 13 enseignants jeunes. Il leur était demandé d'exécuter une tâche en mémoire de travail selon deux sessions distinctes : après une condition contrôle (regarder des documentaires ou lire des magazines) et après une condition de fatigue (effectuer une batterie de tâches exécutives). Dans cette dernière condition, la charge mentale était modulée par le nombre de stimuli présentés par seconde : faible charge (chaîne de 3-4 lettres par secondes) et forte charge (chaîne de 5-6 lettres par seconde). Les résultats ont démontré une augmentation du nombre d'erreurs lors des essais présentant 5 lettres, et ce, tant pour les sujets jeunes que pour les sujets plus âgés. En revanche, un effet de l'âge était constaté sur les temps de réaction. Ces derniers étant globalement plus lents chez les individus d'âge moyen que chez les jeunes.

Durant leur étude, ces auteurs se sont également intéressés à l'activation cérébrale. Ainsi, ils ont mis en évidence que la population middle-aged présentait une activation accrue des régions fronto-pariétales et du cortex pariétal supérieur gauche comparativement aux jeunes adultes. Cette augmentation du réseau fronto-pariétal peut être interprétée comme un moyen de compensation utilisé afin de répondre au déclin cognitif pouvant s'observer lors de la période d'âge moyen. Ces résultats étaient indépendants de la charge mentale induite. Cependant, les données ont également souligné une activation du cortex préfrontal dorsomédial dépendante de la charge. Dès lors, cette activation était plus élevée dans la condition contrôle chez les sujets middle-aged que chez les sujets jeunes. En revanche, l'activation de ce réseau ne différait pas entre les groupes lors de la condition induisant la fatigue.

Ces résultats s'expliqueraient par le fait que les individus plus âgés ont diminué l'activation du cortex préfrontal dorsomédial en condition de fatigue comparativement à la condition contrôle. Les sujets jeunes, quant à eux, ont présenté une augmentation de cette activité entre la condition contrôle et la condition de fatigue.

Pour résumé, l'ensemble de ces données suggèrent que les adultes d'âge moyen ont recourt à des mécanismes de compensation plus fréquemment et plus rapidement que les jeunes ; engendrant un épuisement des ressources plus rapide et plus conséquent.

De manière similaire, Klaassen et al. (2016) ont étudié l'activation cérébrale lors d'une tâche d'encodage et de reconnaissance en mémoire chez des instituteurs jeunes et d'âge moyen. Ces sujets étaient soumis à deux conditions : une condition de fatigue induite par la réalisation d'une tâche aux demandes cognitives exigeantes et une condition contrôle. Les résultats ont démontré une activation corticale plus importante chez les participants d'âge moyen en condition contrôle mais une diminution de cette activité lors de la condition fatigue. En revanche, aucune différence d'activation n'ont été observées entre les deux conditions chez les adultes jeunes. En d'autres mots, cela signifie que les personnes exerçant une profession cognitivement exigeante peuvent subir des effets liés à l'âge, mis en évidence par l'IRMf. Cependant, les performances de reconnaissance et le niveau de confiance attribué à ces reconnaissances par les participants n'étaient ni influencés par l'âge ni par la condition.

Plus récemment, Gilsoul & Collette (2018) ont administré une tâche de Stroop informatisée d'une durée de 160 minutes à des sujets jeunes, d'âge moyen et âgés. Il s'agissait pour les participants de réagir à la couleur de l'encre des stimuli présentés à l'écran le plus précisément et le plus rapidement possible. La fatigue était objectivée par les changements constatés dans les temps de réaction (TR) au cours des 4 blocs de 40 minutes constituant l'épreuve. Afin de contrôler les effets de fatigue subjective, les sujets étaient amenés à compléter l'échelle de somnolence de Karolinska (KSS ; Shahid et al., 2011) allant de 1 (très éveillé) à 9 (très somnolent). Ils ont également évalué leur niveau de motivation, de fatigue et d'effort pour faire la tâche sur une échelle analogique (VAS ; Price et al., 1983).

Les résultats ont mis en évidence une augmentation extrême des TR au fur et à mesure du temps passé à la tâche chez les participants d'âge moyen, révélant ainsi, une fatigue cognitive particulièrement présente dans ce groupe. Les auteurs ont alors émis l'hypothèse que cette population, en raison d'une vie professionnelle toujours active, débiterait la tâche comportementale avec un niveau de charge mentale plus important que les sujets âgés, ayant subi moins de contraintes au cours de la journée. En revanche, les personnes âgées ne se montraient pas plus fatiguées que les autres groupes. Ce constat peut s'expliquer par le fait que les sujets âgés seraient davantage plus résistants à la monotonie de la tâche entraînant, par conséquent, des performances similaires à celles des participants jeunes.

A propos de la fatigue subjective, les trois groupes se sont évalués comme étant davantage somnolents, démotivés et fatigués après qu'avant la tâche.

Dans une seconde étude relativement semblable, Gilsoul, Libertiaux et Collette (2021) ont exploré l'influence des pauses sur les performances à une tâche comportementale effectuée sur une longue période de temps. Ainsi, une tâche de Stroop de 160 minutes a à nouveau été administrée à des sujets jeunes, middle-aged et âgés mais cette fois, chacun des participants étaient affectés soit à une condition « breaks » soit à une condition « no breaks ». Dans la première condition, les sujets réalisaient l'épreuve sans interruption alors que dans la seconde, ces derniers bénéficiaient d'une pause de 5 minutes toutes les 40 minutes. Les échelles KSS et VAS étaient également utilisées. Dès lors, en ce qui concerne la fatigue subjective, les pauses se sont montrées particulièrement avantageuses pour le groupe jeune (moins de fatigue et de somnolence) mais pas pour les personnes âgées (évaluation similaire avant/après dans les deux conditions).

Concernant les performances objectives, une augmentation des temps de réaction a été constatée au fil du temps passé à la tâche chez les jeunes et chez les middle-aged mais pas chez les âgés. De plus, les participants affectés à la condition « no breaks » ont montré une augmentation de leurs temps de réaction comparativement à ceux de la condition « breaks » pour lesquels un profil stable a été constaté.

Afin d'examiner davantage l'activité cérébrale lors de l'exécution d'une tâche fatigante dans ces trois groupes d'âge, Gilsoul et al. (2021) ont réalisé une troisième et dernière étude employant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Dans cette recherche, des participants jeunes, middle-aged et âgés étaient affectés soit à une condition contrôle dans laquelle ils visionnaient simplement des vidéos, soit à une condition fatigue dans laquelle il leur était demandé d'effectuer une tâche de Stroop de 100 minutes (pour les jeunes) et de 80 minutes (pour les middle-aged et les âgés). Après cela, tous les participants étaient invités à réaliser une épreuve de type n-back à 3 niveaux de charge mentale (1-Back, 2-Back, 3-Back) afin de récolter les données IRMf. Notons que le niveau 1-Back était ici utilisé comme ligne de base.

Afin de contrôler la fatigue subjective, les échelles analogiques KSS et VAS ont à nouveau été administrées : au temps 1 (c'est-à-dire à l'arrivée du participant), au temps 2 (c'est-à-dire après la condition contrôle ou la condition fatigue) et au temps 3 (c'est-à-dire après la session d'IRMf).

Au niveau comportemental, les effets de l'âge attendus ont été constatés. Ainsi, les sujets jeunes présentaient des performances supérieures à l'épreuve n-back comparativement aux sujets middle-aged, présentant eux-même, de meilleurs résultats que les âgés. Un effet de la charge cognitive en mémoire de travail a également été observée (1-Back > 2-Back > 3-Back).

Au niveau cérébral, les auteurs ont démontré une diminution de l'activité dans les zones fronto-pariétales bilatérales et une augmentation de l'activité dans les zones cérébrales antérieures gauches chez les participants âgés. En revanche, il ne semble pas y avoir eu de grands changements d'activité cérébrale entre les conditions fatigue et contrôle. Notons cependant, que dans la condition contrôle, une légère augmentation de l'activité dans les zones frontales ainsi qu'une diminution de l'activité des régions antérieures et postérieures ont été révélées chez les personnes âgées par rapport aux jeunes, et ce en particulier, dans la charge 2-Back.

II. Objectifs généraux et hypothèses

Le présent travail s'intéresse à l'étude de la fatigue cognitive chez les sujets d'âge moyen. Actuellement, notre mode de vie nous amène à traiter un nombre grandissant d'informations, et ce, de manière constante. Cela génère, une surcharge mentale, elle-même à l'origine, d'une plainte de fatigue de plus en plus fréquente. Néanmoins, jusqu'à présent, très peu d'études se sont intéressées aux caractéristiques et aux conséquences de cette fatigue au fil de l'avancée en âge. Par conséquent, cette recherche va tenter de comprendre quelle est l'influence de la charge mentale sur la fatigue cognitive dans une population jeune (18-30 ans) et d'âge moyen (40-60 ans). Pour répondre à cette question, deux objectifs principaux ont été définis. Le premier consiste à comparer les effets d'une charge mentale faible ou élevée sur les performances cognitives dans ces deux populations. Le second objectif est de mesurer la fatigue cognitive via la récolte de données physiologiques oculaires. En effet, à l'heure actuelle, la majorité des études portant sur ce phénomène se sont intéressés uniquement à la dilatation pupillaire sans prendre en considération d'autres données relatives aux clignements, par exemple. Dès lors, le deuxième axe de ce mémoire est de déterminer si ces mesures de dilatation pupillaire et de clignements des yeux permettent d'objectiver la présence et l'évolution de la fatigue cognitive.

De ce fait, trois hypothèses principales ont été émises. La première étant que nous nous attendons à un effet de l'âge sur les performances à la tâche comportementale, les participants middle-aged montrant une diminution de performance plus rapide que les sujets jeunes. En effet, différentes études (Jacobs et al., 2013 ; Klaassen et al., 2014) ont suggéré que les personnes d'âge moyen, en raison d'un fonctionnement cognitif moins efficace, notamment en mémoire épisodique, devaient mobiliser davantage d'efforts cognitifs pour maintenir leur niveau de performance. Par conséquent, nous nous attendons également à ce que les sujets middle-aged obtiennent un indice de charge mentale plus élevé que les sujets jeunes.

Deuxièmement, nous nous attendons à observer des modifications oculaires concernant le diamètre de la pupille et les clignements des yeux au fil de la tâche. Ces différents paramètres constituant un marqueur d'apparition de la fatigue, nous supposons également que cette dernière survienne en amont de la dégradation des performances à la tâche, et ce, pour les deux groupes étudiés. De plus, les patterns oculaires se modifiant avec l'avancée en âge, nous nous attendons à constater un effet de l'âge sur ces paramètres oculaires.

Troisièmement, une corrélation entre les données oculaires, les performances à la tâche comportementale et la fatigue subjective est également attendue. Ainsi, nous nous attendons à une augmentation du nombre et de la durée des clignements et à une modification du diamètre pupillaire en fonction de la dégradation de la performance cognitive. Enfin, nous supposons observer davantage de fatigue subjective après la tâche comportementale en condition de charge mentale élevée comparativement à la condition de charge mentale faible.

Les résultats de ce mémoire pourraient venir compléter davantage la littérature concernant la fatigue cognitive dans la population middle-aged mais également en ce qui concerne l'évaluation de cette fatigue via la récolte de données physiologiques oculaires. De plus, ce présent travail inspiré de l'étude de Borragàn et al. (2016), va permettre d'enrichir leurs recherches en répliquant l'emploi de la Time Load Dual Back chez des sujets d'âge moyen et ainsi, de vérifier si la fatigue mentale et ses effets évoluent avec l'âge.

III. Méthodologie¹⁰

Cette étude a été approuvée par le Comité d’Ethique de la Faculté de Psychologie, Logopédie et Sciences de l’Education (FPLSE) de l’Université de Liège.

1. Participants

Deux groupes de 20 participants ont été recrutés via « le bouche-à-oreille », le dépôt de flyers ou encore les réseaux sociaux. Le premier groupe comprenait des sujets jeunes dont l’âge se situait entre 18 et 30 ans et le second était composé de participants middle-aged âgés de 40 à 60 ans. Les critères d’inclusion pour la participation à cette étude étaient les suivants : avoir le français pour langue maternelle, ne pas avoir d’antécédents de traumatisme crânien ni d’antécédents de maladie neurologique ou psychiatrique, pas d’abus de substance, une absence de médication pouvant impacter le système nerveux central et par conséquent, l’efficacité cognitive et le degré de fatigue (i.e. antidépresseurs, anxiolytiques, anticholinergiques).

Afin d’éviter l’effet de variables émotionnelles (ex. humeur dépressive, anxiété importante) ou de sommeil (ex. durée de sommeil insuffisante) sur la fatigue des participants, des cut-offs ont été préalablement fixés avant l’administration des divers questionnaires. Ces cut-offs ont été déterminés comme suit : score ≤ 20 pour l’échelle de dépression (CES-DS), score ≤ 7 pour l’index de qualité de sommeil de Pittsburgh (PSQI) et score ≤ 15 pour l’échelle de somnolence d’Epworth (ESS).

Toutes les données récoltées dans le cadre de cette étude ont été traitées anonymement. De plus, pour écarter un éventuel biais motivationnel, les sujets n’avaient pas connaissance du thème réel de l’étude. En effet, ils pensaient prendre part à une recherche portant sur « le fonctionnement attentionnel au cours de la vie ». Lors de la dernière séance, le réel objectif de l’étude leur était dévoilé.

¹⁰ Pour un résumé du design expérimental voir Figure 5

2. Protocole expérimental

Les participants étaient invités à se rendre au Centre de Recherche du Cyclotron GIGA-CRC In Vivo Imaging, pour trois séances de testing. Le premier rendez-vous se déroulait sur une période d'environ 1h30 et les deux suivants duraient environ 1 heure. Chaque séance était espacée d'un minimum de 48 heures et la participation n'excédait pas 5 semaines. Dans la mesure du possible, les trois rendez-vous étaient fixés au même moment de la journée pour chaque participant.

Avant d'entamer l'étude, un formulaire d'informations décrivant le déroulement des séances et reprenant quelques consignes, c'est-à-dire conserver un rythme veille/sommeil stable et ne consommer ni caféine ni autre stimulant dans les 24 heures précédant l'expérience, était fourni aux participants.

Lors du premier rendez-vous, les participants recevaient, à nouveau, des informations relatives au déroulement de l'étude. Ensuite, ils étaient invités à donner leur consentement de participation à l'expérience. Trois épreuves neuropsychologiques étaient, par la suite, administrées : une tâche d'empan de chiffres (Wechsler, 1997) permettant l'évaluation de leur empan maximal en mémoire de travail et une épreuve informatisée d'alerte phasique (Zimmermann & Fimm, 2009) dont l'objectif était de mesurer leurs temps de réaction. Afin de déterminer leur niveau d'éducation, le test de vocabulaire du Mill Hill (Deltour, 1993) leur était également administré. Après cela, les participants étaient amenés à remplir différents questionnaires démographiques, à savoir, l'échelle de dépression CES-DS (Radloff, 1977), l'index de qualité du sommeil de Pittsburg (Buysse & al., 1989), le chronotype de Horne et Ostberg (Horne & Ostberg, 1976), et l'échelle de somnolence d'Epworth (Johns, 1991). Ces questionnaires ont permis l'identification et le contrôle de divers facteurs pouvant contribuer aux symptômes de fatigue éprouvés par les participants lors de l'administration de la tâche comportementale.

Cette première séance se clôturait par un entraînement à la «Time Load Dual back» (TLDB; Borragán, Slama, Destrebecqz, & Peigneux, 2016), tâche comportementale clé de notre étude. L'objectif de cet entraînement était double : familiariser les participants à l'épreuve et obtenir un premier indice de charge mentale à utiliser comme niveau de base à la tâche comportementale, lors des prochains rendez-vous. Enfin, un agenda de fatigue à remplir quotidiennement durant l'expérience, était fourni aux participants.

Durant la deuxième et la troisième séance, un entraînement à la TLDB (qui serait décrite ultérieurement) suivi d'un pré-test étaient proposés aux participants. Une évaluation de l'effet de la charge mentale sur la fatigue cognitive était, ensuite, effectuée à l'aide de la passation de la TDLB dans sa version longue. Les participants étaient en effet, invités à réaliser cette version longue soit en condition « fatigue » (rapide, à forte charge mentale), soit en condition « non fatigue » (lente, à faible charge mentale). La tâche durait 32 minutes au total et son ordre de passation était contrebalancé.

C'est à ce moment que les participants étaient équipés du dispositif d'enregistrement oculaire. Cet appareil comparable à une paire de lunettes permet d'enregistrer le diamètre pupillaire de l'oeil ainsi que la distance entre les deux paupières. Avant et après la tâche longue, une échelle de somnolence (KSS) ainsi que 7 échelles visuelles analogues (VAS) mesurant différents états : la motivation, l'effort à la tâche, la joie, la fatigue, le rapport aux autres, le stress et l'angoisse étaient administrées afin d'obtenir des mesures concernant l'évolution des sentiments de fatigue subjective.

Notons que le débriefing dévoilant le réel objectif de l'étude était réalisé durant la troisième et dernière séance.

3. Mesures et tests

3.1 Tests neuropsychologiques¹¹

a) Test de mémoire des chiffres (WAIS III)

Le test de Mémoire des chiffres est une des quatorze épreuves constituant l'échelle d'intelligence de Weschler pour adultes (WAIS-III). Il permet l'évaluation des capacités des participants en mémoire de travail et par conséquent, l'estimation de l'effet de la charge mentale chez chacun d'entre eux. Durant cette épreuve, il s'agissait pour les participants de répéter des séries de chiffres énoncées par l'expérimentateur, en ordre direct et en ordre indirect. La procédure était la suivante: l'examineur débutait par le premier essai en lisant chaque chiffre au rythme de un par seconde. Le niveau suivant était administré uniquement si au moins une des deux séries était réussie. L'épreuve prenait donc fin lorsqu'aucun des deux essais n'était pas correctement rappelé. Pour chaque participant, un empan (nombre maximum de chiffres gardés en mémoire et correctement rappelés) était calculé.

b) Test d'alerte phasique (TEA)

Le test d'alerte phasique est une des épreuves informatisées constituant la batterie « Test d'évaluation de l'attention» (TEA, TAP) conceptualisée par Zimmermann et Fimm (2009). Il permet l'évaluation des temps de réaction des participants et par conséquent, de leur vitesse de traitement de l'information. Cette épreuve se déroule en quatre parties.

Dans la première et la dernière partie, le sujet devait réagir le plus rapidement possible à l'apparition d'une croix au centre de l'écran d'ordinateur. Dans la deuxième et troisième partie, le sujet devait à nouveau réagir à l'apparition de la croix mais celle-ci était précédée d'un signal avertisseur sonore censé préparer le participant à réagir plus rapidement.

¹¹ Voir Annexe A

c) Test de vocabulaire de Mill Hill

L'administration de ce test créé par Raven en 1965 et adapté en français par Deltour en 1993 avait pour objectif de déterminer le niveau socio-culturel des participants. Ce test de vocabulaire consiste en la présentation de 34 mots cibles pour lesquels le participant devait choisir parmi 6 propositions le synonyme et/ou le mot se rapprochant le plus du sens du mot cible, sans limite de temps imposée. Notons que le tout premier mot cible proposé constituait un item d'exemple destiné à familiariser le sujet au test. Il s'agissait ici du terme « malaria » pour lequel le participant devait choisir le mot correspondant « paludisme », désignant également cette maladie. La cotation de cette épreuve se faisait via une simple addition des réponses correctes.

3.2 Questionnaires¹²

a) Echelle de dépression (CES-DS)

Cette échelle permettait d'évaluer la présence d'un syndrome dépressif chez le sujet durant la semaine écoulée. Elle est composée de vingt questions, dont quatre items inversés, axées sur 5 dimensions : humeur dépressive, sentiment de culpabilité, ralentissement psychomoteur, perte d'appétit et trouble du sommeil. Sa cotation se faisait via une échelle de Likert allant de 0 (jamais, très rarement) à 3 (fréquemment, tout le temps). Le score global était calculé par la sommation des points obtenus aux 20 questions, le score maximum étant de 60. Notons que les 4 items opposés (positifs) se codaient inversement aux 16 autres. Dans notre étude, un cut-off score arbitraire de 20 était utilisé. Dès lors, tout participant obtenant un score supérieur à ce cut-off se voyait malheureusement être exclu de l'étude.

b) Questionnaire du chronotype de Horne et Ostberg

Ce questionnaire avait pour principal objectif de déterminer le chronotype de chaque participant, c'est-à-dire une manifestation du rythme circadien définissant la préférence d'une personne pour des activités plus matinales ou plus vespérales (du soir), notamment l'heure de coucher et de lever. Ce questionnaire est composé de 14 questions à choix multiples de type Likert et de 5 échelles de temps sur lesquelles le sujet devait indiquer via une croix l'heure qui lui correspondait le mieux. Ces 5 échelles de temps étaient par la suite converties en scores échelonnés. La cotation du questionnaire était réalisée via la pondération de chaque item en un score total représentant un chronotype.

¹² Voir Annexe B

Ainsi, un score supérieur à 70 correspond à « tout à fait du matin », entre 59 et 69 à « du matin modéré », entre 42 et 58 à « neutre », entre 31 et 41 à « du soir modéré », et inférieur à 30 à « tout à fait du soir ».

Notons que les heures de rendez-vous ont été fixées de telle manière à respecter le mieux possible le chronotype du participant (e.g pas de rendez à 8 heures du matin pour un sujet se définissant comme étant du soir).

c) Echelle de Somnolence d'Epworth (ESS)

Cette échelle permettait de mesurer une éventuelle somnolence diurne chez le sujet au cours de la dernière semaine écoulée. Elle évalue donc la probabilité de s'assoupir, c'est à-dire se laisser aller au sommeil au cours de différentes situations relativement usuelles. Elle est composée de 8 échelles de type Likert allant de 0 (jamais d'assoupissement) à 3 (fortes chances d'assoupissement). Le score global, allant de 0 à 24 était obtenu en sommant les scores pour chaque item. Un score seuil de 10 ou plus permettait d'objectiver la présence d'un déficit de sommeil, et une note de 18 ou plus, une somnolence diurne excessive (Monaca, 2008). Dans cette étude, un cut-off score de 15 était utilisé.

d) Index de Qualité du Sommeil de Pittsburgh (PSQI)

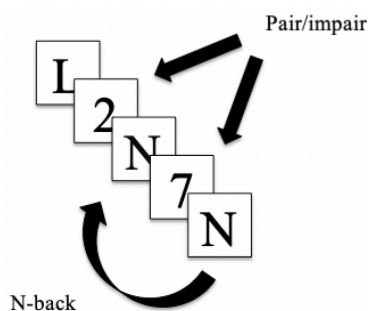
Ce questionnaire permettait d'évaluer la qualité générale du sommeil du participant au cours du dernier mois écoulé. Il est constitué de 24 questions réparties sur 7 composantes (qualité subjective, latence, durée, efficacité, troubles, utilisation de médicaments du sommeil et mauvaise forme durant la journée). Le score global, allant de 0 à 21 était obtenu en sommant les scores pour ces 7 composantes. Un score seuil inférieur ou égal à 5 indiquait une qualité optimale de sommeil alors qu'une note supérieur à 5 suggérait des difficultés de sommeil plus ou moins graves. Dans cette étude, un cut-off score de 8 était utilisé.

3.3 Time Load Dual Back

L'épreuve comportementale «Time Load Dual Back» (TloadDback; Borragán, Slama, Destrebecqz, & Peigneux, 2016) consiste en une double tâche faisant intervenir une tâche de jugement de parité de chiffres et une épreuve de mise à jour de type n-back (voir **Figure 4**). Ainsi, des chiffres et des lettres apparaissent alternativement sur l'écran d'ordinateur. Lorsqu'une lettre est proposée, le sujet doit détecter si cette lettre est identique ou non à la précédente. Dans l'affirmative, le participant doit appuyer sur la touche « espace » du clavier. Lors de la présentation d'un chiffre, il s'agit pour le sujet de choisir si celui-ci est pair ou impair. Pour ce faire, le participant doit appuyer sur la touche « 2 » en cas de nombre pair et sur la touche « 3 » en cas de nombre impair.

Figure 4

Représentation de la double tâche.



Lors du premier rendez-vous, les participants procédaient à 3 entraînements initiaux : aux lettres uniquement, aux chiffres uniquement et enfin, aux lettres et chiffres en alternance. Pour chacun de ces entraînements, la présentation des stimuli était fixée à 1700 msec.

Les deux premiers entraînements permettaient à l'examineur de s'assurer que le sujet effectue correctement la tâche et par conséquent, ne calculaient aucun score de performance. En revanche, l'entraînement en alternance se poursuivait jusqu'à ce que le sujet atteigne un taux de réussite de l'ordre de 85%, seuil arbitraire considérant une maîtrise suffisante de la tâche. Une pause était proposée au participant entre chaque série de 60 stimuli (30 lettres et 30 chiffres) afin d'éviter l'induction de fatigue cognitive.

Après ces 3 entraînements, l'administration d'un pré-test permettait de définir la capacité de traitement maximale (Stimulus Time Duration, STD) de chaque participant. Ainsi, le STD obtenu correspondait à la durée de présentation des stimuli la plus courte à laquelle le participant avait obtenu plus de 85% de réussite dans une série de 60 stimuli. Comparativement à l'entraînement en alternance, la difficulté du pré-test augmentait après chaque série de 60 items réussis. Dès lors, lorsque le taux de performance au bloc était supérieur à 85%, le STD du bloc suivant était diminué de 100 msec. Le temps donné au participant pour le traitement de l'information était donc moins important.

Cette procédure était répétée jusqu'à ce que la performance passe sous le seuil des 85% de réussite, diminution de performance indiquant que le sujet a atteint sa limite de charge mentale. Notons que le STD obtenu à ce pré-test était conservé comme niveau de base pour les deux rendez-vous suivants.

Durant la deuxième et la troisième séance, les participants procédaient à la réalisation d'un court entraînement suivi d'un pré-test. C'est au moment de ce pré-test qu'était introduit le STD obtenu le premier jour, sommé de 300msec et définissant, ainsi, la vitesse de présentation des stimuli au début de ce pré-test. En procédant de cette manière, nous évitions de devoir recommencer l'entraînement initial depuis le début. De plus, nous nous assurons également de garder une certaine marge de manoeuvre en cas de fatigue plus ou moins importante du participant comparativement à sa première participation. En effet, la performance d'un sujet pouvant varier d'un jour à l'autre, il était essentiel de s'assurer que la tâche administrée soit cohérente à l'état actuel du participant. Comparativement au premier jour, le niveau de difficulté du pré-test augmentait de bloc en bloc et se poursuivait jusqu'à l'obtention d'une performance avec un taux de réussite de 85%. Ce pré-test fournissait un nouveau STD qui permettait d'adapter le niveau de charge mentale pour chaque participant lors de la tâche longue. La tolérance à la charge mentale variant d'un individu à l'autre, le même niveau de charge mentale était induit chez tous les participants. De cette manière, le seuil de difficulté de la TLDB était adapté à chaque participant. Ensuite, la tâche longue était administrée. Le sujet était préalablement averti qu'à ce moment, la tâche devenait continue et que par conséquent, il n'y avait plus de pauses possibles. Chaque participant se voyait attribuer de manière contrebalancée une des deux conditions : High Cognitive Load (HCL) ou Light Cognitive Load (LCL).

Notons que le STD introduit n'était pas le même en fonction de la condition appliquée. Ainsi, si la condition était celle à haute charge mentale (HCL), c'est le STD obtenu au pré-test du jour qui était encodé tel quel. En revanche, si la condition appliquée était celle à faible charge mentale (LCL), c'est le score au STD sommé de la moitié de sa valeur ($\text{STD (LCL)} = \text{STD (pré-test)} + 1/2 \text{ STD (pré-test)}$) qui était encodé. Le niveau de difficulté entre les deux conditions étant équivalent c'est le temps disponible pour traiter l'information qui était proportionnellement différent. Durant cette tâche longue, des séries de 60 stimuli étaient présentés sans interruption, et autant de fois que nécessaire jusqu'à ce que la tâche soit achevée. Cette tâche durait 32 minutes mais le sujet n'en était pas averti. Notons que la première série de 60 items étant considérée comme une période d'habitation, celle-ci n'a pas été analysée.

Les performances moyennes et écarts-types des participants étaient respectivement calculés sur 4 blocs correspondant à 4 périodes de temps successives durant environ 8 minutes (t1, t2, t3, t4).

3.4 Sensations subjectives

Deux échelles informatisées mesurant des sensations subjectives (sommolence, fatigue, émotions et humeur) étaient administrées aux participants, avant et après la tâche comportementale. Ces échelles avaient pour but de recueillir des mesures subjectives de l'évolution des sensations des participants après la réalisation de la tâche. Pour répondre à ces échelles, le participant devait déplacer un curseur (en utilisant les flèches gauche et droite du clavier numérique) sur une échelle graduée. La réponse donnée par le sujet était automatiquement transformée en un score numérique.

La première échelle, KSS (Shahid, Wilkinson, Marcu & Shapiro, 2011), était constituée d'une seule question permettant l'évaluation du niveau de somnolence du sujet. Cette échelle était administrée afin de contrôler le niveau de somnolence, pouvant avoir un impact sur la fatigue subjective. Les participants devaient évaluer leur niveau de somnolence au moment immédiat. Plus le participant déplaçait son curseur vers la droite, plus celui-ci s'estimait somnolent au moment de l'évaluation (**voir Annexe C**).

La seconde échelle, VAS (Boogaerts, J. G. et al. , 2000), était composée de 7 questions évaluant les domaines suivants : motivation, effort pour réaliser la tâche, joie, fatigue, rapport aux autres, stress, angoisse. Pour cette échelle, seuls les items se rapportant à la fatigue et à la motivation respectivement étaient inclus dans nos analyses. L’item relatif à la fatigue était utilisé pour mesurer la fatigue subjective. L’échelle de la VAS était conceptualisée comme suit : déplacer le curseur vers l’extrémité gauche de l’échelle signifiait que le sujet se sentait « frais » et placer le curseur vers l’extrémité droite signifiait qu’il se sentait « épuisé » (**voir Annexe C**). Laisser le curseur au milieu de l’échelle signifiait que la personne s’évaluait comme neutre vis- à-vis des deux extrémités. Concernant la dimension « motivation », se diriger vers l’extrémité gauche de l’échelle signifiait que le participant se sentait « motivé » et placer le curseur vers l’extrémité droite signifiait qu’il se sentait « démotivé ».

3.5 Paramètres oculaires

Une mesure objective de la fatigue cognitive était obtenue en utilisant un instrument de mesure nommé « Drowsimeter R100 ® » . Il s’agit d’un appareil ressemblant à une paire de lunettes et muni d’une caméra à haute résolution qui fournit des images de l’œil (droit) à une fréquence de 120 Hz. Ce « Drowsimeter R100® » permet d’obtenir différentes mesures oculaires, à savoir, la dilatation pupillaire, la durée et la fréquence des clignements des paupières ainsi que l’écartement de ces paupières.

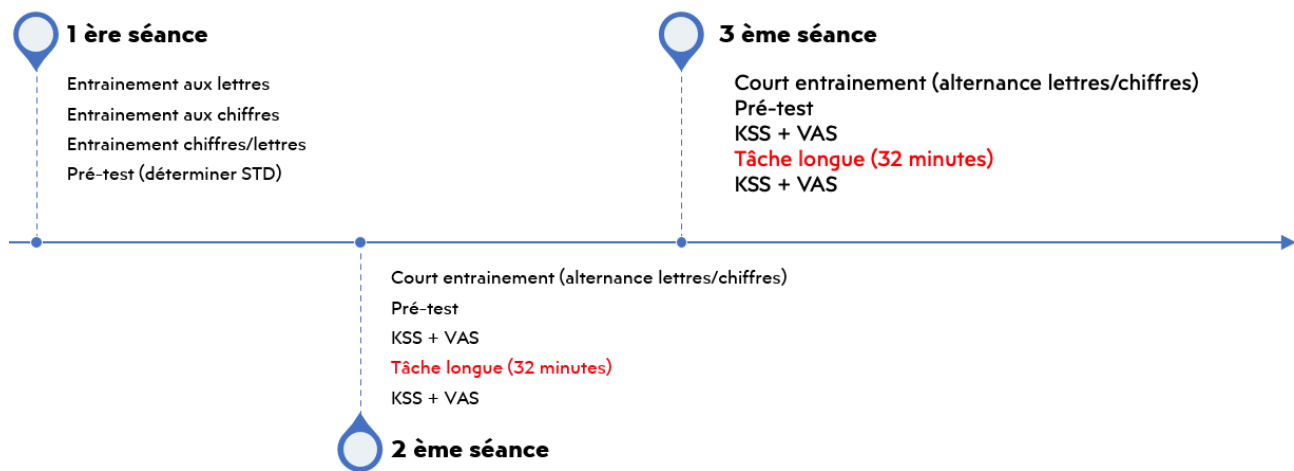
Ce dispositif rendant possible l’ajout d’une correction ophtalmique, les sujets portant des lunettes de vue pouvaient être inclus dans l’étude. Il était demandé aux dames d’éviter de se maquiller les yeux afin de ne pas perturber l’analyse de l’œil par le dispositif oculaire.

Cet appareillage étant utilisé pour l’enregistrement des données oculaires lors de la tâche comportementale longue, les participants ne devaient le porter que lors des deux derniers rendez-vous. Pour chaque sujet, les données oculaires étaient récoltées dans les deux conditions c’est-à-dire une fois en condition de faible charge mentale (LCL) et une fois en condition de haute charge mentale (HCL).

Pour la réalisation des analyses statistiques, les mesures obtenues lors d'un enregistrement ont été divisées en 4 blocs de temps, comparables à ceux constitués dans la tâche comportementale de la TLDB.

Figure 5

Résumé du design expérimental



IV Analyses statistiques

L'ensemble de ces analyses statistiques a été effectué via le logiciel JASP (version 2022). La probabilité de dépassement utilisée a été fixée à $p < .05$ avec un intervalle de confiance fixé à 95%.

1. Données démographiques

Les données démographiques ont été comparées dans les deux groupes d'âge étudiés (sujets jeunes et sujets middle-aged). Des tests Chi Carré ont été réalisés sur les variables nominales afin d'observer la fréquence et de tester l'indépendance de ces différentes variables. Concernant les variables métriques, les moyennes et les écarts-types ont été calculés afin d'avoir une représentation des scores obtenus par les deux populations. La normalité de ces variables a été testée par le test de Shapiro Wilk. Ainsi, en présence de variables normalement distribuées, un test t de Student pour échantillons non pairés a été effectué alors qu'un test non paramétrique de Mann-Withney a été utilisé pour les variables non normalement distribuées.

2. Données comportementales

En ce qui concerne les données comportementales de la Time Load Dual Back (TDLB), plusieurs analyses ont été réalisées. Une première analyse a porté sur les STD (Stimulus Time Duration) aux pré-tests et avait pour objectif de comparer les niveaux de charge mentale tolérés par les deux groupes d'âge. Le test de normalité de Shapiro Wilk ayant révélé une violation des données dans les deux conditions, des tests non paramétriques de Mann-Withney ont été effectués. Ensuite, deux analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées ont été réalisées : l'une a porté sur les performances moyennes (hits c'est-à-dire le pourcentage d'items correctement répondus) obtenues à la tâche et l'autre sur les écart-types, représentant la variabilité observée durant cette même tâche. Les variables dépression (score obtenu à l'échelle CES-DS) et somnolence (score obtenu à l'échelle ESS) ont été contrôlées. Pour les variables montrant un effet significatif, des analyses post-hocs de Holm ont été effectués.

En ce qui concerne les conditions d'application, le test de parallélisme et de sphéricité (Mauchly) ont été préalablement utilisés. Le test de parallélisme permet de s'assurer de l'homogénéité des pentes alors que le test de sphéricité de Mauchly permet de tester l'égalité des variances des différentes mesures. Ainsi, lorsque le parallélisme n'était pas respecté, un test à pentes séparées était effectué. Si la condition de sphéricité n'était pas respectée, une correction de Greenhouse-Geisser était appliquée.

3. Sensations subjectives

Concernant les analyses portant sur les échelles analogiques de fatigue (VAS) et de somnolence (KSS), deux tests t de Student pour échantillons appariés ont d'abord été réalisés sur le score obtenu au temps 1, c'est-à-dire, avant de débuter la tâche. En procédant de cette manière, nous nous assurons que les niveaux de fatigue et de somnolence étaient identiques au départ des deux conditions (HCL et LCL).

Ensuite, des deltas (scores de différence) ont été calculés pour chacune de ces échelles, en soustrayant le score obtenu en fin de tâche (T2) au score obtenu avant la tâche (T1). Un delta positif signifiait que le participant s'est senti plus somnolent et/ou plus fatigué après la tâche. Un delta négatif était synonyme d'une fatigue et/ou d'une somnolence moins élevée après la tâche. Des analyses de variances (ANOVA) ont été réalisées sur ces deltas de somnolence et de fatigue afin d'observer l'effet des deux conditions (HCL et LCL) de la tâche comportementale sur l'évolution de ces deux sensations.

4. Données oculaires

Pour l'analyse des données physiologiques oculaires, une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées a été effectuée avec pour objectif d'observer l'évolution de ces paramètres au fil du temps, tout en contrôlant les effets potentiels de la dépression et de la somnolence. En ce qui concerne les conditions d'application, le test de parallélisme et de sphéricité (Mauchly) ont été préalablement utilisés. Le test de parallélisme permet de s'assurer de l'homogénéité des pentes alors que le test de sphéricité de Mauchly permet de tester l'égalité des variances des différentes mesures. Ainsi, lorsque le parallélisme n'était pas respecté, un test à pentes séparées était effectué. Si la condition de sphéricité n'était pas respectée, une correction de Greenhouse-Geisser était appliquée.

5. Analyses corrélationnelles

Trois analyses corrélationnelles portant sur la fatigue subjective, les données comportementales et les données oculaires ont également été utilisées.

Ainsi, la première de ces analyses a été effectuée sur la relation entre les performances à la tâche et l'évaluation des sensations subjectives. Le test de Shapiro Wilk utilisé pour tester la normalité des données ayant révélé une violation des variables, des corrélations de Spearman ont été effectuées. Une seconde analyse corrélationnelle a porté sur le lien entre les performances à la tâche comportementale, dans les deux conditions, et les données physiologiques oculaires. Cela a permis d'observer si une diminution de performances était corrélée à des changements physiologiques oculaires (dilatation de la pupille et écartement des paupières). Après vérification de la normalité de ces données via un test de Shapiro Wilk, des corrélations de Spearman ont été réalisées. Une troisième et dernière analyse de corrélation a permis d'étudier la relation entre les paramètres oculaires et l'évaluation des sensations subjectives. Cette analyse a permis d'observer si une augmentation des états subjectifs (fatigue et somnolence) était corrélée à l'évolution des données physiologiques oculaires. A nouveau, le test de Shapiro testant la normalité des variables a mis en évidence une violation des données. Des corrélations de Spearman ont donc été employées.

V. Résultats

1. Analyses des données démographiques

Au total, 81 sujets (52 jeunes et 29 middle-aged) ont été recrutés sur deux années différentes (sur la période 2019-2022).

Parmi ces sujets, 65 ont été inclus dans nos analyses statistiques. De fait, 7 participants appartenant au groupe des jeunes ont abandonné l'étude (6 pour indisponibilité et 1 pour cause de confinement) et 4 ont été exclus en raison de score supérieur au cut-off (< 20) à l'échelle de dépression (CES-DS). De plus, 4 participants middle-aged ont mis un terme à leur participation à l'étude (4 pour indisponibilité et 1 pour abandon de la tâche) et 1 a été exclu en raison de la prise de benzodiazépines.

Afin de tester l'homogénéité de nos groupes quant au sexe, niveau d'études et chronotype, des tests Chi-carré d'indépendance ou de Fisher ont été réalisés. L'appariement homogène entre les deux groupes a été confirmé pour les variables sexe ($p = .53$) et chronotype ($\chi^2(4) = 3.28$, $N = 65$, $p = .35$). Cependant, le groupe middle-aged a présenté un niveau d'éducation significativement plus élevé que les jeunes ($\chi^2(4) = 12.93$, $N = 65$, $p = .012$).

Tableau 1

Table de fréquence selon la variable niveau d'études, par groupe

Groupe	Niveau d'études					Total
	Secondaire inférieur	Secondaire supérieur	Bachelier	Master	Master complémentaire	
Jeunes	2	25	11	2	1	41
Middle-aged	1	5	10	7	1	24
Total	3	30	21	9	2	65

Tableau 2

Table de fréquence selon la variable chronotype, par groupe

Groupe	Chronotype				
	Tout à fait du matin	Modérément du matin	Neutre	Soir modéré	Total
Jeunes	2	12	20	7	41
Middle-aged	3	8	12	1	24
Total	5	20	32	8	65

Note. Seuls les chronotypes observés dans notre échantillon ont été conservés.

Ensuite, les moyennes et les écart-types des différentes variables métriques ont été calculés. Cela a permis d'obtenir une vision globale de ces variables dans les deux groupes étudiés.

Tableau 3

Moyennes et écart-types des différentes variables métriques, par groupe

Variables	Jeunes	Middle-aged
Age	22.78 (2.85)	52.92 (6.30)
Empan Endroit	6.41 (0.95)	6.09 (1.02)
Empan Envers	5.00 (1.38)	4.46 (1.10)
Mill Hill	21.37 (4.08)	24.96 (5.20)
PSQI	4.61 (1.69)	4.80 (1.50)
CES_DS	12.78 (4.40)	10.67 (5.00)
ESS	8.41 (2,46)	7.88 (4.25)
Alerte temps SA	265.66 (50.47)	290.17 (90.10)
Alerte ET SA	47.73 (37.89)	52.21 (43.15)

Note. **Empan Endroit** = empan à l'épreuve de Mémoire des Chiffres en ordre direct,

Empan Envers = empan à l'épreuve de Mémoire des Chiffres en ordre indirect, **Mill Hill** = épreuve de vocabulaire, **PSQI** = Pittsburg Scale Quality Index, **CES-DS** = échelle de dépression, **ESS** = Epworth Sleepiness Scale, **Alerte temps SA** = temps médians à l'épreuve d'alerte phasique (TEA) sans signal avertisseur, **Alerte ET SA** = écart-types moyens à l'épreuve d'alerte phasique (TEA) sans signal avertisseur.

La normalité de l'ensemble de ces variables a d'abord été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Dès lors, les variables suivantes : empan endroit ($W = 0.91, p < .001$), empan envers ($W = 0.88, p < .001$), PSQI ($W = 0.94 ; p = .007$), Alerte_temps_SA ($W = 0.83, p < .001$) et Alerte_ET_SA ($W = 0.69, p < .001$) sont non normalement distribuées. Un test non paramétrique de Mann-Whitney pour échantillons indépendants a donc été réalisé sur chacune de ces cinq variables afin de tester l'égalité des moyennes entre les deux groupes. Les autres variables se distribuant normalement, des tests t de Student pour échantillons indépendants ont été effectués.

Les analyses réalisées sur les variables métriques démographiques ont révélé une différence significative entre les groupes pour le score à l'épreuve du Mill Hill, révélant que les middle-aged ont présenté des performances significativement plus élevées en vocabulaire que les jeunes ($t = -3.1, p = .00$). Une différence significative a également été observée pour le score au questionnaire PSQI ($U = 466.50, p < .001$), les sujets d'âge moyen rapportant une moindre qualité de sommeil que les sujets jeunes. Concernant les scores à l'épreuve d'alerte et aux échelles ESS et CES-DS, aucune différence significative n'a été observée (voir **Tableau 4**).

Tableau 4

Tests t de Student et tests de Mann-Withney sur les différentes variables métriques.

Variables	Test t de Student				Mann-Withney	
	Statistique t	df	p	Différence Moyenne (jeunes-middle-aged)	U	p
Empan Endroit	/	/	/	/	600.00	0.12
Empan Envers	/	/	/	/	602.50	0.12
Mill Hill	-3.1	63	0.003*	-3.60	/	/
PSQI	/	/	/	/	466.50	< 0.001*
CES_DS	1.78	63	0.08	2.11	/	/
ESS	0.65	63	0.52	0.54	/	/
Alerte temps SA	/	/	/	/	430.50	0.41
Alerte ET SA	/	/	/	/	460.50	0.67

Note. * $p < 0.05$. **Empan Endroit** = empan à l'épreuve de Mémoire des Chiffres en ordre direct,

Empan Envers = empan à l'épreuve de Mémoire des Chiffres en ordre indirect, **Mill Hill** = épreuve de vocabulaire, **PSQI** = Pittsburg Scale Quality Index, **CES-DS** = échelle de dépression, **ESS** = Epworth Sleepiness Scale, **Alerte temps SA** = temps médians à l'épreuve d'alerte phasique (TEA) sans signal avertisseur, **Alerte ET SA** = écart-types moyens à l'épreuve d'alerte phasique (TEA) sans signal avertisseur.

2. Analyses de la tâche comportementale : TLDB

Afin de réaliser ces analyses statistiques, des performances pour chaque bloc de temps (T1, T2, T3, T4) constituant la tâche ont été calculées, et ce, dans chacune des deux conditions (HCL et LCL).

2.1 Analyses sur les STD aux pré-tests

Dans cette section, deux participants jeunes n'ont pas obtenu de pré-tests à la tâche comportementale, nous amenant à un échantillon de 63 participants.

Les STD (Stimulus Time Duration) obtenus aux pré-tests de la Time Load Dual Back (TLDB) ont été comparés entre les deux groupes. Le test de Shapiro-Wilk a mis en évidence une violation de la normalité de la variable STD dans la condition de faible charge mentale (LCL) et dans la condition de haute charge mentale (HCL). Des tests U de Mann-Whitney pour échantillons indépendants ont donc été employés.

Ces tests ont révélé une différence significative de STD en condition LCL entre les deux groupes d'âge, les sujets middle-aged ($Me = 0.90$) obtenant des STD plus élevés que les jeunes ($Me = 0.85$), ($U = 289.00$, $p = .01$). En condition HCL, une différence significative de STD entre les deux groupes était également observée, les sujets d'âge moyen ($Me = 0.90$) présentant des STD plus élevés que les jeunes ($Me = 0.83$), ($U = 293.00$, $p = .01$).

2.2 Analyses sur les performances moyennes à la TLDB

Une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées a été réalisée sur les performances moyennes à la tâche comportementale (TLDB), en contrôlant la somnolence (ESS) et la dépression (CES-DS).

Cette analyse a mis en évidence un effet principal significatif du **groupe** ($F(1) = 8.40$, $p = .005$, $\eta^2 = .06$) et de la **condition** ($F(1) = 15.13$, $p < .001$, $\eta^2 = .05$). En revanche, l'interaction groupe*condition n'était pas significative ($F(1) = 0.082$, $p = .77$, $\eta^2 = .00$).

Pour l'effet principal du **groupe**, la moyenne des sujets d'âge moyen était significativement supérieure à celle des sujets jeunes (voir **Tableau 5**).

Tableau 5

Moyennes globales sur les performances obtenues à la tâche comportementales en fonction du groupe

	Moyenne (écart-type)
Jeunes	0.81 (0.01)
Middle-aged	0.87 (0.02)

Pour l'effet principal de la **condition**, une moyenne significativement supérieure en condition LCL qu'en condition HCL a été observée (voir **Tableau 6**).

Tableau 6

Moyennes globales sur les performances obtenues à la tâche comportementale en fonction de la condition

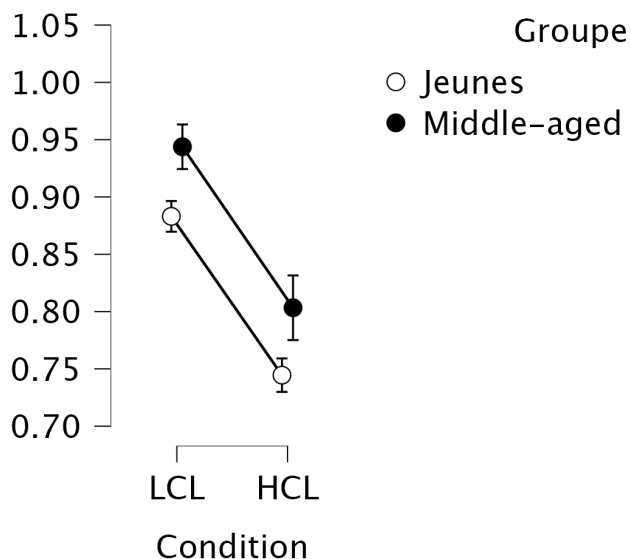
	Moyenne (écart-type)
LCL	0.91 (0.01)
HCL	0.77 (0.01)

Note. **LCL** = faible charge mentale, **HCL** = haute charge mentale.

Autrement dit, de manière générale, les sujets d'âge moyen ont obtenu des performances moyennes plus élevées que les jeunes tandis que l'ensemble des participants a réalisé de meilleures performances en condition de faible charge mentale (LCL) qu'en condition de haute charge mentale (HCL).

Figure 6

Performances moyennes à la tâche comportementale en fonction de la condition et du groupe



Note. HCL = haute charge mentale, LCL = faible charge mentale.

L'effet du bloc de temps ($F(1,86) = .63, p = .53$) ainsi que celui d'interaction bloc*condition ($F(0) = .29, p = .75$) n'étaient pas significatifs. Notons que le test de Mauchly réalisé au préalable a montré une violation des conditions de sphéricité, nous amenant à appliquer une correction de Greenhouse-Geisser.

Les interactions **bloc*groupe** ($F(3) = 4.1, p = .008, \eta^2 = .01$) et **bloc*condition*groupe** ($F(3) = 3.43, p = .02, \eta^2 = .01$) se sont, quant à elles, révélées significatives.

Pour l'effet d'interaction **bloc*groupe**, une analyse post-hoc de Holm (voir Annexe D) a été effectuée. Ce test n'a révélé aucun effet significatif pour le groupe des middle-aged. Cependant, un effet entre les temps 1 et 2, entre les temps 1 et 3 et entre les temps 1 et 4 a été observé dans le groupe des jeunes. En d'autres mots, une diminution des performances au cours du temps a été constatée chez les jeunes. En effet, ce groupe semblait répondre plus adéquatement au temps 1 (Moyenne = 0.84, Ecart-Type = 0.09) comparativement au temps 2 (Moyenne = 0.81, Ecart-Type = 0.10), au temps 3 (Moyenne = 0.79, Ecart-Type = 0.10) et au temps 4 (Moyenne = 0.78, Ecart-Type = 0.11).

2.3 Analyses sur les écarts-types des performances moyennes à la TLDB

Une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées a été effectuée sur les écarts-types des performances moyennes obtenues à la tâche comportementale (TLDB), en contrôlant la dépression (CES-DS) et la somnolence (ESS).

Les résultats de cette analyse ont seulement mis en évidence une interaction significative entre le bloc de temps et la condition ($F(2,41) = 5.03$, $p = .00$, $\eta^2 = 0.02$). Notons que le test de Mauchly réalisé au préalable a montré une violation des conditions de sphéricité, nous amenant à appliquer une correction de Greenhouse-Geisser.

Les tests post-hocs de Holm (voir **Annexe D**) ont fait apparaître une augmentation de la variabilité de la performance à la tâche comportementale au cours du temps, et ce, en condition de faible charge mentale (LCL). En effet, lors de cette condition, les participants étaient moins variables dans leur performance lors du temps 1 (Moyenne = 0.04) comparativement aux temps 2 (Moyenne = 0.05), au temps 3 (Moyenne = 0.06) et au temps 4 (Moyenne = 0.08).

3. Analyses des échelles subjectives : KSS et VAS

Trois participants jeunes et un participant middle-aged présentaient des valeurs manquantes pour les échelles de fatigue (VAS) et de somnolence (KSS), nous amenant à les exclure de notre échantillon. Ce dernier se compose donc de 61 sujets pour cette section.

3.1 Fatigue et somnolence subjectives au départ de la tâche

Deux tests *t* de Student pour échantillons appariés ont été effectués sur les scores obtenus au temps 1 (c'est-à-dire avant de débuter la tâche) aux échelles subjectives (KSS et VAS). En effet, nous voulions nous assurer que les participants n'étaient pas plus fatigués ou somnolents avant d'entamer la tâche pour une condition que pour l'autre (LCL et HCL).

Ces analyses n'ont révélé aucun effet significatif tant à l'échelle de somnolence (KSS) qu'à l'échelle de fatigue (VAS).

3.2 Fatigue et somnolence subjectives à travers la tâche

Ensuite, dans l'objectif d'évaluer l'évolution des sensations de fatigue et de somnolence au fil de la tâche, des analyses de variances (ANOVA) à mesures répétées ont été réalisées sur les deltas (Δ) des scores de fatigue (VAS) et de somnolence (KSS). Ces deltas (Δ) consistaient en une différence des scores bruts obtenus au temps 1 des scores bruts obtenus au temps 2 (T2-T1)¹³.

Concernant l'échelle de somnolence (KSS), l'analyse a mis en évidence un effet principal de la **condition** ($F = 7.48, p = .008, \eta^2 = .04$) uniquement.

Les analyses post-hocs effectuées ont révélé une différence significative ($t = 2.74, p = .008, d = 0.45$) entre la condition de faible charge mentale (LCL) et la condition de haute charge mentale (HCL). Les participants se sentaient plus somnolents après avoir effectué la tâche qu'avant de débuter celle-ci, et ce, davantage en condition HCL qu'en condition LCL (voir **Tableau 7**).

¹³ T1= avant la tâche, T2 = après la tâche

Tableau 7

Moyennes des différences de scores au temps 1 et au temps 2 ($\Delta = T2-T1$), en fonction de la condition

	Moyenne (écart-type)
LCL	0.75 (0.23)
HCL	1.55 (0.23)

Note. **LCL** = faible charge mentale, **HCL** = haute charge mentale

En ce qui concerne la fatigue (VAS), les résultats de l'analyse de variance ne mettent en évidence aucun effet significatif.

3.3 Motivation au départ de la tâche

Outre l'item fatigue, l'échelle subjective (VAS) comprenait également un item évaluant la motivation. Une analyse a donc été effectuée sur ce paramètre. En effet, bien qu'un contre-balancement ait été réalisé afin d'empêcher un éventuel biais de motivation, nous souhaitons nous assurer que le niveau de motivation des participants avant de débiter la tâche ne différerait pas dans l'une ou l'autre des deux conditions (HCL et LCL).

Le test t de Student pour échantillons appariés n'a montré aucun résultat significatif.

4. Analyses des données oculaires

Dans cette section et suite au contrôle qualité effectué sur l'ensemble des données oculaires, nous avons analysé les données issues de 29 sujets (15 jeunes et 14 middle-aged).

Des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées ont été effectuées sur les paramètres oculaires suivants : fréquence et durée des clignements, écartement des paupières et dilatation pupillaire. Les variables somnolence (ESS) et dépression (CES-DS) ont été contrôlées.

4.1 Analyses de la fréquence des clignements

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées n'ont révélé aucun résultat significatif, que cela soit au niveau d'un effet du groupe, de la condition de charge mentale ou du bloc de temps de la tâche.

4.2 Analyses de la durée des clignements

L'analyse de variance réalisée sur la durée moyenne des clignements a mis en évidence uniquement un effet d'interaction significatif entre le bloc de temps, la condition et le groupe ($F(3) = 3.47$, $p = .02$, $\eta^2 = .01$). Cependant, les analyses post-hocs ne permettent pas de confirmer cet effet.

4.3 Analyses de l'écartement des paupières

Les résultats de l'analyse de variance réalisée sur l'écartement moyen des paupières ont révélé un effet principal significatif du **groupe** ($F(1) = 5.39$, $p = .03$, $\eta^2 = .14$) et de la **condition** ($F(1) = 7.2$, $p = .01$, $\eta^2 = .04$). Cette ANOVA ne permet toutefois pas de mettre en évidence une interaction significative entre ces deux facteurs ($F(1) = 0.3$, $p = .58$, $\eta^2 = .00$).

Pour l'effet principal du **groupe** ($F(1) = 5.39$, $p = .03$, $\eta^2 = .14$), nous observons un plus grand écartement des paupières chez les jeunes, et ce, indépendamment de la condition (voir **Tableau 8**).

Tableau 8

Moyennes et écarts-types de l'écartement des paupières en fonction du groupe

	Moyenne (écart-type)
Jeunes	73.31 (3.54)
Middle-aged	62.10 (3.28)

Concernant l'effet de la **condition** ($F(1) = 7.2, p = .01, \eta^2 = .04$), l'ouverture des paupières des participants est plus grande en condition HCL qu'en condition de faible charge mentale LCL (voir **Tableau 9**).

Tableau 9

Moyennes et écarts-types de l'écartement des paupières en fonction de la condition

	Moyenne (écart-type)
LCL	64.85 (2.71)
HCL	70.57 (2.56)

Note. **LCL** = faible charge mentale, **HCL** = haute charge mentale

4.4 Analyses de la dilatation pupillaire

Les analyses de variance réalisées sur la dilatation pupillaire moyenne ont montré un effet principal significatif du **groupe** ($F(1) = 20.03, p < .001, \eta^2 = .39$) et de la **condition** ($F(1) = 6.03, p = .02, \eta^2 = .02$). L'interaction entre ces deux facteurs n'était toutefois pas significative ($F(1) = 0.01, p = .91, \eta^2 = .00$).

Concernant l'effet principal du **groupe** ($F(1) = 20.03, p < .001, \eta^2 = .39$), la dilatation de la pupille est significativement moindre chez les sujets d'âge moyen (voir **Tableau 10**).

Tableau 10

Moyennes et écarts-types de la dilatation pupillaire en fonction du groupe

	Moyenne (écart-type)
Jeunes	49.02 (2.13)
Middle-aged	36.00 (1.98)

Pour l'effet de la **condition** ($F(1) = 6.03$, $p = .02$, $\eta^2 = .02$), la dilatation pupillaire est significativement plus importante en condition HCL qu'en condition LCL (voir **Tableau 11**).

Tableau 11

Moyennes et écarts-types de la dilatation pupillaire en fonction de la condition

	Moyenne (écart-type)
LCL	40.93 (1.49)
HCL	44.09 (1.69)

Note. **LCL** = faible charge mentale, **HCL** = haute charge mentale

5. Analyses corrélationnelles

5.1 Corrélation entre performance à la TLDB et sensations subjectives

Dans cette section, notre échantillon était composé de 61 sujets. De fait, 3 participants jeunes et 1 participant middle-aged ont été exclus de nos analyses en raison de données manquantes aux échelles subjectives (KSS et VAS).

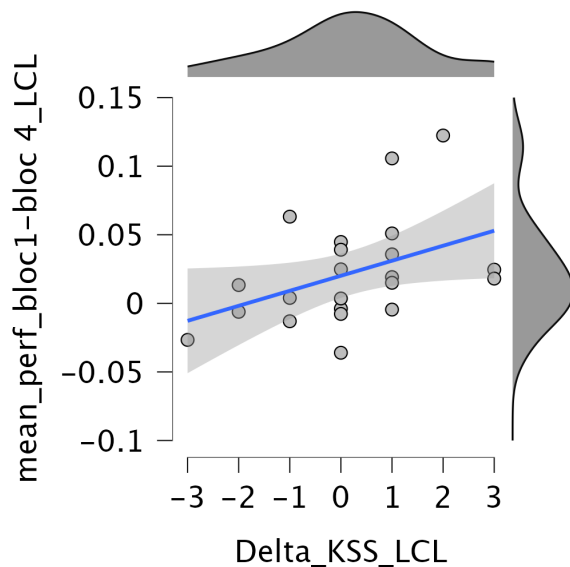
5.1.1 Liens entre performance au fil du temps et sensations subjectives

L'objectif était, ici, d'explorer le lien entre la performance à la tâche au fil du temps et les Δ aux échelles subjectives (KSS et VAS). Pour ce faire, un score de différence entre les performances moyennes obtenues au temps 1 et celles obtenues au temps 4 a été calculé, et ce, dans chacune des conditions (HCL et LCL). Notons que la différence a été effectuée dans le sens T1-T4. La normalité des données a été vérifiée via le test de Shapiro-Wilk. Ce dernier a montré que les variables étaient non normalement distribuées. Par conséquent, des corrélations de Spearman ont été réalisées.

En condition de faible charge mentale (LCL), chez les sujets middle-aged, la corrélation entre la performance au fil de la tâche et le Δ somnolence ($rs = 0.47, p = .03$) était significative. Cela signifie que lorsque les participants middle-aged s'estimaient plus somnolents à la fin de la tâche, ils obtenaient également de moindres performances au fil de cette tâche en condition de faible charge mentale (voir **Figure 7**). En revanche, la corrélation entre l'évolution de la performance et le Δ fatigue ($rs = 0.15, p = .50$) était non significative. Dans le groupe des jeunes, la corrélation entre l'évolution de la performance et le Δ somnolence ($rs = -0.04, p = .79$) était non significative et la corrélation entre la performance au fil de la tâche et le Δ fatigue ($rs = 0.12, p = .47$) était également non significative.

Figure 7

Corrélation entre la performance moyenne au fil de la tâche (T1-T4) et le Δ somnolence chez les sujets middle-aged



Note. **Mean_perf_bloc1-bloc4_LCL** = performances moyennes à travers le temps en LCL, **Delta_KSS_LCL** = différence entre le score au post-test et au pré-test (T2-T1).

En condition de haute charge mentale (HCL), dans le groupe d'âge moyen, la corrélation entre l'évolution de la performance et le Δ somnolence ($r_s = -0.11$, $p = .61$) était non significative et la corrélation entre la performance au fil du temps et le Δ fatigue ($r_s = 0.27$, $p = 0.22$) était également non significative. De même, chez les jeunes, la corrélation entre la performance au fil de la tâche et le Δ somnolence ($r_s = 0.11$, $p = .50$) était non significative et la corrélation entre la performance au fil de la tâche et le Δ fatigue ($r_s = 0.06$, $p = .71$) était également non significative.

5.2 Corrélation entre performance à la TLDB et données oculaires

Dans cette section, l'objectif était d'étudier le lien entre le déclin des performances à la tâche comportementale (T4-T1) et le déclin des paramètres oculaires à travers le temps (T4-T1). Pour ce faire, des corrélations ont été effectuées. Les analyses réalisées sur la fréquence et la durée des clignements n'ayant montré aucun effet significatif, seuls la dilatation pupillaire et l'écartement des paupières ont été pris en compte.

Le test de Shapiro Wilk, vérifiant la normalité des données, a mis en évidence que l'ensemble des variables était non normalement distribué, excepté les différences du diamètre pupillaire en HCL et en LCL. Des corrélations de Spearman ont donc été employées.

En raison du faible échantillon pour les données oculaires, les deux groupes n'ont pas été comparés entre eux.

En condition de haute charge mentale (HCL), la corrélation entre le déclin des performances à la tâche (T4-T1) et l'évolution de l'écartement palpébral ($r_s = -0.06, p = .79$) était non significative. La corrélation entre le déclin des performances et l'évolution de la dilatation pupillaire ($r_s = -0.16, p = .43$) était également non significative.

Concernant la condition de faible charge mentale (LCL), la corrélation entre le déclin des performances à la tâche (T4-T1) et l'évolution de l'ouverture des paupières ($r_s = 0.02, p = .93$) était non significative. La corrélation entre le déclin des performances et l'évolution du diamètre de la pupille ($r_s = -0.06, p = .76$) était également non significative.

5.3 Corrélation entre données oculaires et sensations subjectives

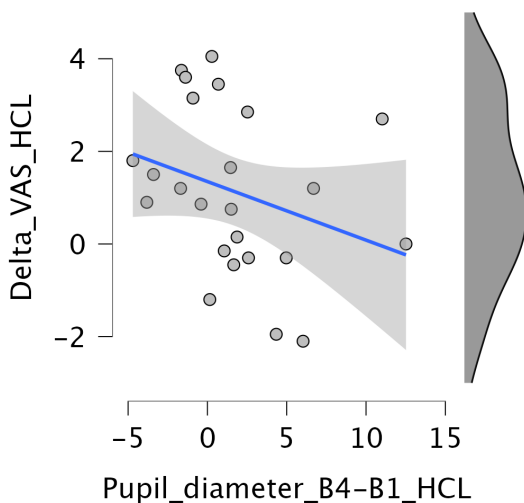
L'objectif était, ici, d'explorer le lien entre l'évolution des paramètres oculaires (T4-T1) et l'évolution des sensations subjectives (ΔKSS et ΔVAS). Des corrélations ont donc, à nouveau, été réalisées. Les tests réalisés sur la durée et la fréquence des clignements ne montrant aucun résultat significatif, seuls l'écartement palpébral et la dilatation pupillaire ont été inclus dans nos analyses. La normalité des données a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro Wilk. Ce test a révélé que l'ensemble des variables était normalement distribué, excepté, la variable ouverture des paupières en LCL et en HCL et le ΔKSS en LCL. Des corrélations de Spearman ont donc été effectuées.

En raison du faible échantillon pour les données oculaires, les deux groupes n'ont pas été comparés entre eux.

En condition de haute charge mentale (HCL), la corrélation entre l'évolution de l'ouverture palpébrale et l'évolution de la fatigue (VAS ; $r_s = -0.39$, $p = .06$) était non significative. En revanche, la corrélation entre l'évolution de la dilatation pupillaire et l'évolution de la fatigue ($r_s = -0.44$, $p = .03$) était, quant à elle, significative. Cette corrélation significative montre que les participants s'estimant plus fatigués après la tâche en condition HCL, présentaient une augmentation du diamètre de leur pupille au fil du temps (voir **Figure 8**).

Figure 8

Corrélation entre l'évolution de l'ouverture palpébrale et l'évolution de la fatigue subjective (ΔVAS), groupes confondus.



Note. **Delta_VAS_HCL** = différence entre le score au post-test et au pré-test (T2-T1) en HCL,
Pupil_diameter_B4-B1_HCL = différence du diamètre pupillaire entre le temps 4 et le temps 1 (T4-T1) en HCL.

En condition de faible charge mentale (LCL), la corrélation entre l'évolution de l'ouverture palpébrale et l'évolution de la fatigue (VAS ; $r_s = -0.20$, $p = .34$) était non significative. La corrélation entre l'évolution de la dilatation pupillaire et l'évolution de la fatigue ($r_s = -0.12$, $p = .56$) était également non significative.

La corrélation entre l'évolution de l'écartement des paupières et l'évolution de la somnolence (KSS ; $r_s = -0.01$, $p = .96$) était non significative. De même, la corrélation entre l'évolution du diamètre pupillaire et l'évolution de la somnolence ($r_s = -0.08$, $p = .70$) était également non significative.

VI Discussion

Ce présent travail avait pour objectif d'explorer l'effet de la charge mentale sur la fatigue cognitive dans une population jeune (18-30 ans) et d'âge moyen (40-60 ans). En effet, actuellement, peu d'études se sont intéressées aux caractéristiques et aux conséquences de la fatigue mentale au fil de l'avancée en âge.

Pour ce faire, nous avons utilisé une épreuve faisant intervenir à la fois un jugement de parité de chiffres et une composante de mise à jour en mémoire de travail. Lors de cette tâche, la modulation du temps de présentation des stimuli était possible, permettant d'obtenir deux conditions distinctes : l'une présentant une charge mentale élevée et l'autre présentant une charge mentale faible. Outre cette tâche comportementale, nous avons également analysé des variables telles que la dépression, la somnolence ou la qualité du sommeil, évalué les sensations de fatigue via des échelles subjectives et mesuré des paramètres oculaires.

1. Mesures comportementales (TLDB)

L'objectif premier de ce mémoire était d'explorer l'effet de la charge mentale sur la fatigue cognitive au fil de l'avancée en âge. Ainsi, différentes hypothèses avaient été émises. La première faisait référence au niveau de charge mentale toléré dans chacun des deux groupes. En effet, nous nous attendions à ce que l'indice de charge mentale (mesuré via le STD) présenté par les sujets d'âge moyen soit plus élevé que celui des jeunes. Le test U non paramétrique de Mann-Whitney réalisé sur ces STD en condition LCL et HCL a permis de confirmer notre hypothèse, le STD moyen des participants middle-aged étant plus élevé que celui des jeunes. Ces résultats sont en accord avec la littérature. De fait, plusieurs auteurs (Zhou et al., 2011; Ferreira et al., 2015) ont mis en évidence un ralentissement de la vitesse de traitement dès l'âge moyen. Ainsi, le STD représentant, dans notre étude, la vitesse minimale à laquelle le sujet obtient une performance fixée à 85% de réussite, cette observation de STD plus élevé chez les adultes moyens que chez les jeunes apparaît cohérente.

La seconde hypothèse concernait un effet de l'âge sur les performances à la tâche comportementale. En effet, nous nous attendions à ce que les sujets d'âge moyen montrent une diminution des performances plus rapide que les sujets jeunes.

De fait, Klaassen et al. (2014) ont démontré que les personnes middle-aged présentaient un déclin des performances en mémoire de travail lorsque les exigences de la tâche étaient augmentées en condition de fatigue. Plus récemment, d'autres auteurs (Gilsoul & Collette, 2018) ont mis en évidence une diminution extrême des performances chez des individus d'âge moyen, lors d'une tâche de Stroop prolongée.

Cette hypothèse a été vérifiée en réalisant deux analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées : une sur les performances moyennes à la tâche comportementale et une sur la variabilité des performances à cette tâche. Les variables dépression (Polosan et al. 2016 ; Clark & Sahakian, 2022) et somnolence (Lo et al. , 2016 ; Rabat, 2022) pouvant potentiellement impacter les performances cognitives, ont été contrôlées.

1.1 Performances moyennes à la tâche

L'analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées réalisée sur les performances moyennes a mis en évidence deux effets principaux significatifs. Le premier concernait un effet du **groupe**. Les sujets d'âge moyen obtenaient des performances significativement plus élevées que les jeunes. Cela va à l'encontre de notre hypothèse postulant que les individus middle-aged présenteraient de moins bonnes performances que les jeunes. Bien que ce résultat soit surprenant, il peut être expliqué de différentes manières.

Une première explication serait liée à la notion de compromis vitesse/précision (Lucci et al., 2013). En effet, selon plusieurs auteurs (Starns & Ratcliff, 2010 ; Rabbitt, 1979 ; Lucci et al., 2013), les adultes jeunes se centrent davantage sur la vitesse de performance alors que les middle-aged se focalisent sur la qualité de performance. Starns et Ratcliff (2010) ont illustré ce phénomène dans leur étude explorant les différences liées à l'âge dans la production de réponses optimales lors d'une tâche cognitive. Ces auteurs ont mis en évidence que les jeunes adultes obtenaient des TR plus faibles que les adultes d'âge moyen, les amenant, toutefois, à commettre davantage d'erreurs. Ces observations font référence au modèle de diffusion représentant les processus cognitifs impliqués dans la prise de décision (Ratcliff et McKoon, 2008). Dans ce modèle, la largeur des frontières dans la prise de décision représente la quantité de preuves nécessaires en faveur d'une réponse alternative avant que la décision ne soit prise. Des frontières larges mènent à une réponse lente mais précise et des frontières étroites mènent à une réponse rapide mais imprécise. Conformément à cela, nous pouvons supposer que, dans notre étude, les participants jeunes ont privilégié la vitesse au détriment de la précision, les menant à produire plus de mauvaises réponses.

Ces dernières menant à des performances moyennes moindres que celles observées chez les sujets d'âge moyen.

Deuxièmement, les résultats de nos analyses statistiques réalisées sur les tâches d'empan et d'alerte phasique (TEA) n'ont révélé aucune différence entre les deux groupes d'âge. Ces observations vont à l'encontre de ce qui est normalement attendu. En effet, selon Zhou et al. (2011), un déclin des réseaux d'alerte et de traitement est constaté très tôt au cours de l'âge moyen. Ainsi, dans le cadre de notre étude, nous pouvons affirmer que les participants middle-aged ne présentaient pas ce déclin cognitif normalement attendu. Cependant, les analyses effectuées sur les STD obtenus aux pré-tests ont mis en évidence des STD moyens plus élevés chez les middle-aged que chez les jeunes. Ces résultats peuvent être expliqués de deux manières : soit par une difficulté cognitive ou soit par un effort cognitif amoindri lors des pré-tests. Supposant une préservation des capacités cognitives chez les sujets d'âge moyen, nous pouvons présumer que les STD plus élevés chez ces sujets leur ont laissé davantage de temps afin de mieux performer lors de la tâche comportementale comparativement aux jeunes. Autrement dit, il s'agirait là d'une supposée stratégie adaptative employée par les adultes moyens afin d'obtenir de meilleures performances à la tâche comportementale principale. Cette stratégie peut être comprise par la théorie de Baltes (1997). Selon cette théorie, l'avancée en âge est synonyme de gains et de pertes cognitives. Néanmoins, avec l'âge les pertes surpassent les gains. Dès lors, afin de maintenir un équilibre satisfaisant, les individus se voient contraints de privilégier la minimisation des pertes par rapport au maintien des gains. Lorsque les ressources ne suffisent plus pour atteindre les objectifs, les individus doivent adapter leur comportement pour compenser les pertes. Dans notre étude, les sujets middle-aged auraient donc préféré obtenir un STD plus élevé aux pré-tests afin de minimiser au maximum les pertes durant la tâche longue.

Une autre piste pour expliquer les meilleures performances des sujets d'âge moyen serait l'hypothèse de l'enrichissement cognitif (Maillot et Perrot, 2012). Cette hypothèse suggère qu'au fil de l'avancée en âge, l'ensemble des expériences et des comportements d'un individu pourront impacter positivement son efficacité cognitive. En d'autres mots, selon ce concept, le développement cognitif n'est pas nécessairement stable et peut être influencé par des comportements ou des événements. Dans notre cas, il se pourrait donc que les adultes moyens ont vécu davantage d'expériences et d'événements de vie que les jeunes, leur permettant d'impacter positivement leur fonctionnement cognitif.

Une autre explication serait que, selon la littérature, les sujets d'âge moyen constituent une population dont les performances se situent entre celles des jeunes et des âgés. Cependant, il est également admis qu'il existe une grande variabilité inter-individuelle en ce qui concerne les effets de l'âge sur la cognition. De cette manière, si la majorité des individus middle-aged voient leur efficacité cognitive quelque peu déclinée, d'autres performant aussi bien que les sujets jeunes. Cela apparaît être le cas dans notre étude étant donné que les adultes moyens obtiennent de meilleures performances que les adultes jeunes.

Enfin, une dernière explication serait liée à la conception de la tâche comportementale, elle-même. En effet, la TLDB permet une adaptation du temps de présentation des stimuli pour chaque participant en fonction de sa capacité de traitement maximale (STD). Supposant que la théorie de la vitesse de traitement (Salthouse, 1996) soit vraie lorsqu'elle affirme que les effets du ralentissement lié à l'âge sont plus importants dans le traitement d'informations complexes. Alors, nous pourrions présumer que si nous avions soumis les deux groupes à la même vitesse, les adultes moyens auraient obtenus de moins bonnes performances que les adultes jeunes. Néanmoins, l'étude de Borragàn (2017) employant l'épreuve de la TLDB n'était pas réalisée sur ces deux groupes d'âge, ne nous offrant donc aucun point de comparaison.

Pour en revenir à nos analyses, le second effet principal significatif mis en évidence était un effet de la **condition**. Les performances des participants étaient meilleures en condition de faible charge mentale (LCL) qu'en condition de haute charge mentale (HCL). Ce résultat était attendu. En effet, selon l'étude de Borragàn et al.(2017) et le modèle TBRS (Time-Based Resource Sharing model ; Barrouillet, 2004), l'augmentation de la charge mentale, via une diminution du temps disponible pour traiter l'information, induit de la fatigue cognitive. Cette fatigue se traduira alors par une altération des performances à la tâche. Cette observation permet de confirmer qu'en condition de charge mentale élevée, les participants sont plus fatigués et donc moins performants, et ce, indépendamment de leur âge.

Outre ces effets principaux du groupe et de la condition, nos analyses ont également révélé deux effets d'interaction significatifs. Le premier entre le bloc et le groupe et le second entre le bloc, le groupe et la condition.

Concernant l'interaction **bloc*groupe**, les tests post-hocs effectués ont révélé une diminution de la performance au fil de la tâche uniquement chez les jeunes. Ces résultats n'étaient pas attendus. En effet, conformément à l'étude de Gilsoul, Libertiaux et Collette (2021), nous pensions observer un effet du temps sur les performances également chez les sujets middle-aged. Cependant, cet effet d'interaction entre le bloc et le groupe peut être expliqué. De fait, bien que les analyses réalisées sur les performances moyennes à la tâche révèlent un effet du temps uniquement chez les jeunes, elles mettent également en avant un effet de la condition. Nous supposons que l'effet du temps sur les performances des adultes jeunes s'expliquent par la diminution plus rapide de ces performances en condition HCL, comparativement aux middle-aged. Les graphiques (**voir Annexe E**) présentant les performances à la tâche, condition et groupe séparés, illustre une diminution linéaire en condition de haute charge mentale (HCL) chez les jeunes. A contrario, chez les sujets d'âge moyen, les performances moyennes augmentent entre le bloc 1 et 2 avant de se stabiliser et de diminuer en fin de tâche (Bloc 4). En condition de faible charge mentale (LCL), les participants jeunes tentent à stabiliser leurs performances entre le bloc 3 et le bloc 4. En revanche, les sujets middle-aged augmentent leurs performances entre le bloc 3 et 4. En d'autres mots, en condition HCL, les sujets d'âge moyen performant mieux en début et en milieu de tâche (Bloc 1 et Bloc 2) que les jeunes. En condition LCL, les adultes moyens présentent un rebond de leurs performances en fin de tâche (Bloc 4) alors que les jeunes les stabilisent.

1.2 Variabilité des performances moyennes à la tâche

Les analyses effectuées sur les écarts-types des performances moyennes à la TLDB ont révélé une interaction significative entre le bloc de temps et la condition. Une augmentation de la variabilité des performances à la tâche au cours du temps a été constatée, et ce, en condition de faible charge mentale (LCL). Cette observation n'était pas attendue. En effet, nous pensions observer une augmentation de la variabilité au fil du temps davantage en condition HCL. Néanmoins, ces résultats surprenants peuvent s'expliquer. Dans leur étude Pattyn et al. (2008) ont démontré qu'une charge de travail faible induit un désengagement attentionnel engendré par une augmentation du système parasympathique. Ces résultats peuvent être appliqués à notre étude. En condition de charge mentale faible (LCL), les exigences cognitives amoindries ont mené les participants à désengager leur attention de la tâche. Ce désengagement attentionnel ayant, à son tour, engendré une variabilité des performances au cours du temps.

2. Echelles subjectives KSS et VAS

Dans un premier temps, deux tests t de Student pour échantillons pairés ont été réalisés sur les scores obtenus aux échelles subjectives (KSS et VAS). Ces analyses concernaient les scores validés par les participants avant de débiter la tâche et n'ont mis en évidence aucun effet significatif. Les participants ne se montraient pas plus fatigués ou plus somnolents avant d'entamer la tâche pour une condition que pour l'autre (HCL ou LCL), ce dont nous voulions nous assurer.

Ensuite, afin d'évaluer l'évolution des sensations subjectives au fil de la tâche, deux analyses de variances ont été effectuées sur ces deux mêmes échelles. Concernant la somnolence subjective (KSS), les analyses ont mis en évidence un effet principal de la **condition** uniquement. Les participants se sont évalués comme étant plus somnolents après avoir effectué la tâche qu'avant, et ce, davantage en HCL qu'en LCL. En revanche, aucun effet significatif n'a été constaté pour l'échelle de fatigue (VAS).

En d'autres mots, la condition de charge mentale élevée a rendu les participants plus somnolents mais pas nécessairement plus fatigués. Ces observations n'étaient pas celles attendues. En effet, conformément à l'étude de Borragàn (2017), nous pensions observer une augmentation de la somnolence subjective davantage en condition LCL que dans la condition HCL. Inversement, nous nous attendions à une augmentation de la fatigue subjective davantage en HCL qu'en LCL.

Ces résultats peuvent être justifiés par la conception des deux échelles subjectives utilisées dans ce travail. En effet, dans l'échelle de somnolence (KSS), les participants devaient choisir leur réponse via une échelle de type Likert (allant de 1 = très éveillé à 9 = très fatigué, très gros effort pour rester éveillé). Alors que l'échelle VAS est conceptualisée de sorte que diriger le curseur vers l'extrémité gauche de l'échelle signifie que le sujet se sent « frais » et placer le curseur vers l'extrémité droite signifie qu'il se sent « épuisé ». Dès lors, il se pourrait que les participants, en raison de la conceptualisation de la VAS, aient éprouvé plus de difficultés à évaluer leur niveau de fatigue subjective que de somnolence subjective.

Concernant l'item motivation de l'échelle VAS, les tests t de Student pour échantillons pairés n'ont révélé aucun effet significatif. Le niveau de motivation des participants avant de débiter la tâche ne différait donc pas dans l'une ou l'autre des deux conditions (HCL et LCL), ce à quoi nous nous attendions.

3. Données oculaires

Le second objectif de ce mémoire était de déterminer si des mesures physiologiques oculaires (clignements des yeux, dilatation pupillaire et écartement palpébral) permettent d'objectiver la présence et l'évolution de la fatigue cognitive. Deux hypothèses avaient alors été émises. La première est que nous nous attendions à observer des modifications (c'est-à-dire augmentation de la fréquence et de la durée des clignements, diminution de l'écartement palpébral et dilatation pupillaire) des différents patterns oculaires au fil de la tâche. Ces paramètres constituant un marqueur d'apparition de la fatigue, nous supposons également que cette dernière survient en amont de la dégradation des performances à la tâche, et ce, pour les deux groupes étudiés. La seconde hypothèse est que, nous nous attendions à constater un effet de l'âge sur les paramètres oculaires, ces derniers se modifiant au fil de l'avancée en âge. En effet, plusieurs auteurs (Bradley et al., 2011 ; Lee et al., 2022) ont démontré une diminution du diamètre de la pupille avec l'âge. Concernant les données relatives aux paupières, Azan et al. (2015) ont révélé que le muscle palpébral s'amincit et peut donc s'affaïsser avec l'âge, engendrant une diminution de l'ouverture entre les paupières.

Pour répondre à ces hypothèses, des analyses de variances à mesures répétées ont été effectuées sur les paramètres oculaires suivants : fréquence et durée des clignements, écartement des paupières et dilatation pupillaire. Les variables dépression (Polosan et al. 2016 ; Clark & Sahakian, 2022) et somnolence (Lo et al. , 2016 ; Rabat, 2022) pouvant potentiellement impacter les performances cognitives, ont été contrôlées.

3.1 Clignements des paupières

3.1.1 Fréquence et durée

Concernant la fréquence des clignements, les analyses n'ont révélé aucun effet significatif. En revanche, un effet d'interaction entre le bloc de temps, la condition et le groupe a été mis en évidence par l'analyse effectuée sur la durée des clignements. Les test-posts n'ont, cependant, pas permis de confirmer cet effet. Ces résultats ne permettent pas de confirmer l'hypothèse d'une augmentation de la fréquence et de la durée des clignements durant la tâche comportementale. De fait, plusieurs études (Borrágán et al., 2018 ; Herlambang et al., 2019 ; Marandi et al., 2018) ont démontré que lors de l'exécution d'une tâche prolongée, un accroissement des clignements en nombre et en fréquence était observé à mesure que la charge cognitive augmente.

Les données relatives à la durée des clignements apparaissent, quant à elle, controversées. Certaines auteurs (Song et al., 2015) mettent en avant une diminution de la durée moyenne des clignements à mesure que la charge mentale augmente. Alors que d'autres n'ont montré aucune différence entre une condition de haute charge mentale et une condition de faible charge mentale.

L'absence de résultats significatifs peut s'expliquer par le faible échantillon utilisé pour ces analyses. Une autre explication serait en lien avec le comportement oculaire des participants durant la tâche. En effet, afin de manquer le moins possible l'apparition d'une cible, certains participants clignaient moins des yeux lors de l'exécution de la tâche. Dès lors, si les données relatives aux clignements semblent être un bon indicateur d'une fatigue mentale dans les tâches de conduite, elles apparaissent davantage délicates lors de tâches cognitives. De fait, la majorité des recherches utilisant ce type de données comme indice de fatigue ont employé des tâches de conduite ou de simulation de conduite. Ces dernières semblent tout à fait différentes de la tâche utilisée dans notre étude. Alors que la conduite automobile implique un balayage visuel de l'environnement autour de soi, la TLDB consiste en une focalisation de l'attention sur des stimuli successifs et centrés. Cependant, très récemment, une étude de Guillemin et al. (2022), employant également la TLDB, a révélé une augmentation du nombre de clignements accompagnant l'apparition de la fatigue cognitive.

3.1.2 Ecartement

Les résultats de l'analyse de variance réalisée sur l'écartement moyen des paupières ont révélé deux effets principaux significatifs. Le premier concernait un effet du **groupe**.

Les adultes jeunes présentaient un plus grand écartement des paupières que les adultes d'âge moyen. Cette observation est cohérente avec la littérature et pourrait s'expliquer par les modifications physiologiques en lien avec l'âge. En effet, Azan et al. (2015) ont démontré une perte de tonicité du muscle releveur de la paupière au fil de l'âge, menant à un affaissement palpébral.

Le second effet principal était un effet de la **condition**. Les participants présentaient une plus grande ouverture des paupières en condition de charge mentale élevée (HCL) qu'en condition de charge mentale faible (LCL).

Ces résultats indiquent que l'écartement palpébral semble être un indice fiable de la charge mentale, une augmentation de l'ouverture des paupières illustrant un effort cognitif plus important. Des recherches antérieures (Guillemin et al., 2022 ; Joshi & Gold, 2020 ; Rodriguez, 2018) vont également dans ce sens.

3.2 Dilatation pupillaire

En ce qui concerne la dilatation pupillaire, les analyses ont mis en évidence deux effets principaux significatifs. Un premier effet principal du **groupe** a été constaté.

Les jeunes présentaient des pupilles plus dilatées que les sujets middle-aged. Ces résultats semblent soutenus par la littérature affirmant que l'avancée en âge est en lien avec une diminution du diamètre de la pupille (Guillon et al., 2016).

Le second effet principal observé concernait la **condition**. Les participants montraient une dilatation de leur pupille significativement plus importante en condition de haute charge mentale (HCL) qu'en condition de faible charge mentale (LCL). Ces résultats indiquent que la dilatation indexe l'effort mental et vont donc dans le sens de la littérature. En effet, selon une conception commune, la taille de la pupille varie en fonction des exigences de la tâche. Ainsi, la dilatation pupillaire engendrée par l'effort cognitif lors de tâches à forte charge mentale explique les raisons d'une augmentation de la taille de la pupille en condition HCL (Guillemin et al., 2022 ; Joshi & Gold, 2020).

4. Analyses corrélationnelles

La dernière hypothèse de ce présent travail concernait la présence éventuelle de liens entre les trois variables étudiées : les performances à la tâche, les sensations subjectives (KSS et VAS) et les données oculaires.

4.1 Performance à la tâche et sensations subjectives

Concernant le lien entre la dégradation de la performance au fil du temps et l'évolution des scores auto-déclarés de fatigue et de somnolence, les analyses ont mis en avant une seule corrélation significative. Chez les sujets d'âge moyen, la performance à la tâche au cours du temps était négativement corrélée aux sensations de somnolence, et ce, en condition LCL. De manière générale, lorsque les participants middle-aged s'estimaient plus somnolents à la fin de la tâche, ils obtenaient également de moindres performances au fil de cette tâche en condition de faible charge mentale. Cela pourrait s'expliquer par la théorie du « décrétement de la vigilance » précédemment développée dans la partie introductive de ce travail. Lors de la charge de travail faible, les sujets d'âge moyen ont désengagé leur attention de la tâche, les rendant ainsi plus somnolents. À son tour, cette somnolence aurait engendré un déclin progressif de leurs performances à la tâche.

4.2 Performance à la tâche et données oculaires

Rappelons qu'en raison du faible échantillon obtenu concernant les données oculaires, les deux groupes d'âge n'ont pas été comparés entre eux. De plus, les analyses de variances précédemment réalisées sur la durée et la fréquence des clignements n'ont révélé aucun effet significatif. Par conséquent, les analyses corrélationnelles ont été effectuées seulement sur les données relatives à la dilatation pupillaire et à l'ouverture palpébrale.

Les corrélations de Spearman effectuées n'ont montré aucun lien entre la diminution de performance à la tâche et l'évolution des paramètres oculaires. Cette absence de corrélation va à l'encontre de notre hypothèse selon laquelle la dégradation de la performance à la tâche s'accompagnerait d'une modification de la dilatation pupillaire et de l'ouverture palpébrale. Toutefois, la littérature semble aller dans ce sens. En effet, dans leur étude mesurant la dilatation de la pupille lors d'une tâche de Stroop, Rondeel et al. (2015) n'ont mis en évidence aucun lien entre dilatation pupillaire et performance à la tâche.

4.3 Sensations subjectives et données oculaires

A nouveau, en raison du faible échantillon des données oculaires, nous n'avons pas différencié les deux groupes entre eux. De plus, l'analyse de variance effectuée sur ces variables n'a révélé aucun effet significatif concernant la fréquence et la durée des clignements. De ce fait, les analyses corrélationnelles n'ont été réalisées que sur l'ouverture des paupières et la dilatation pupillaire.

Les analyses effectuées sur l'évolution des sensations subjectives et sur l'évolution des données oculaires, n'ont mis en évidence qu'une seule corrélation significative. En effet, une relation entre l'évolution de la dilatation pupillaire et l'évolution de la fatigue a été constatée. Les participants s'estimant plus fatigués après la tâche, en condition HCL, présentaient une augmentation du diamètre de leur pupille au fil du temps. Ces résultats vont à l'encontre de notre hypothèse. Nous pensions, en effet, observer une diminution de la dilatation pupillaire lorsque les participants s'estimaient plus fatigués en fin de tâche. Une étude de Wang et al. (2014) a démontré une relation entre l'augmentation de la fatigue auto-reportée et la diminution de la dilatation de la pupille.

Soulignons que le fait de ne pas avoir pu comparer les deux groupe d'âge en raison d'un faible échantillon des données oculaires, nous a probablement desservis. Les paramètres oculaires subissant des modifications au fil de l'avancée en âge.

5. Limites de l'étude

Cette présente étude comporte certaines limites.

La première concerne la représentativité de notre échantillon. En effet, le test exact de Fisher effectué n'a pas permis de mettre en évidence une indépendance entre le groupe et le sexe. En nous référant à la table de fréquence (**voir Annexe F**) relative à la variable sexe, nous observons que notre échantillon est majoritairement féminin et n'est donc pas représentatif de la population générale. L'idéal aurait été d'avoir un échantillon constitué d'autant de sujets féminins que masculins. De fait, Levine et al. (2021) ont mis en évidence une différence entre les genres concernant les effets de l'âge sur le fonctionnement cognitif. Selon ces auteurs, les hommes présentaient un déclin cognitif lié à l'âge plus précocement que les femmes. De plus, ces dernières avaient également une réserve cognitive plus importante. Dès lors, il se pourrait que notre échantillon majoritairement féminin soit venu masquer le déclin plus précoce présent chez les hommes.

Une autre limite fait référence à la période (2019-2022) d'acquisition des données. En effet, certains participants ont été testés avant l'épidémie mondiale de Covid-19 et d'autres pendant cette crise. Or, plusieurs études (Torrente et al., 2022 ; Charonitis et al., 2022) ont mis en évidence une augmentation de la fatigue mentale (et physique) durant la crise sanitaire. De plus, Cellini et al. (2021) ont démontré un impact de cette pandémie sur les caractéristiques du sommeil. Selon ces auteurs, les lockdowns à répétition ont engendré un retard de couché et une moindre qualité de sommeil auto-rapportée, particulièrement chez les jeunes adultes. En outre, la littérature a également montré qu'avoir été infecté(e)s à la Covid-19 peut engendrer une fatigue accrue ainsi qu'une altération de certains processus cognitifs. De fait, un rapport du Centre fédéral d'Expertise des soins de santé (KCE) a mis en évidence que la fatigue persistante reste le symptôme le plus fréquemment rapporté. Dans leur étude, Zhou et al. (2020) ont, quant à eux, observé un appauvrissement des capacités d'attention soutenue et une augmentation des fluctuations attentionnelles. Dans notre étude, les jeunes adultes semblent avoir été plus nombreux à avoir contracté le virus que les adultes moyens, impactant davantage leur niveau de fatigue.

Une troisième limite concerne les horaires de testings. En effet, dans leur étude Borragàn et al. (2017) ne fixaient pas de rendez-vous entre midi et 14h ni après 18h. De cette manière, ils évitaient les moments de digestion après le repas et les envies de sommeil de fin de journée. Dans notre étude, ces horaires n'ont pas été respectés, certains participants ne pouvant se libérer qu'après leur journée de travail. De plus, parmi les jeunes adultes, plusieurs d'entre-eux arrivaient au terme de leur parcours scolaire (fin de Master ou fin de Bachelier) et étaient donc dans une année diplômante. Ainsi, la charge mentale plus importante engendrée par les obligations scolaires pourrait avoir impacté leur niveau de stress et de fatigue. En effet, Hancock et al. (2021) ont montré que la charge de travail est un facteur déterminant des niveaux de stress et de fatigue.

Une dernière limite est en lien avec le logiciel Phasya, utilisé pour l'acquisition des données oculaires. En observant les participants lors de la réalisation de la tâche longue, nous nous sommes aperçus que la majorité d'entre eux bougeaient la tête et gesticulaient. Dès lors, il se pourrait que ces mouvements aient compliqué la détection de la pupille par le dispositif. De plus, l'oeil s'accommodent en fonction de la distance le séparant de l'objet qu'il regarde. Ainsi, lorsqu'un participant s'éloignait ou se rapprochait de l'écran, sa pupille pouvait varier. Outre les mouvements, plusieurs de nos participants portaient des lunettes de vue. Afin qu'il puisse tout de même réaliser la tâche, une correction ophtalmique était utilisée. Il s'agissait d'ajouter une autre paire de lunette en superposition au dispositif d'enregistrement. Là encore, il se pourrait que cela ait rendu difficile la détection et la mesure précise de la pupille.

6. Recommandations

Plusieurs pistes permettant d'améliorer davantage la compréhension de l'effet de la charge mentale sur la fatigue cognitive chez les sujets sains peuvent être envisagées.

Tout d'abord, la réserve cognitive serait un concept intéressant à explorer. Comme susmentionné, les variables dépression (Polosan et al. 2016 ; Clark & Sahakian, 2022) et somnolence (Lo et al. , 2016 ; Rabat, 2022) peuvent impacter négativement les performances cognitives.

A contrario, la réserve cognitive semble préserver le déclin des capacités cognitives. Selon Maillot et Perrot (2012), l'engagement social, la poursuite d'activités physiques, l'épanouissement scolaire et professionnel permettent l'enrichissement de cette réserve cognitive. Cette dernière impacte positivement les effets de l'âge sur le fonctionnement cognitif et sur des facteurs extrinsèques telle que la fatigue, par exemple. Ainsi, bien que nous ayons pris en compte le niveau d'études de nos volontaires, il semblerait que d'autres variables participent à la grande hétérogénéité des profils de réserve cognitive.

Une autre piste d'amélioration serait la prise en compte de la variabilité inter-individuelle concernant les effets de l'avancée en âge sur la cognition. De fait, comme mentionné précédemment, si la majorité des individus middle-aged voient leur efficacité cognitive quelque peu déclinée, d'autres performant aussi bien que les sujets jeunes. Il serait donc intéressant de constituer des sous-groupes de sujets d'âge moyen et d'ensuite, réaliser des études de cas. De cette manière, nous pourrions identifier différents profils cognitifs et explorer en quoi ils se différencient.

Troisièmement, étant donné le lien entre la fatigue, la perception de la récompense et la motivation (Boksem & Tops, 2008), ces deux concepts pourraient être évalués. En effet, Chaudhuri & Behan (2004) ont démontré que la fatigue mentale serait la résultante d'une perception inadéquate de l'individu entre les coûts nécessaires à l'action (c'est-à-dire, l'effort) et les bénéfices qui en découlent (c'est-à-dire, la récompense). Herlambang, Taatgen et Cnossen (2019) ont également tenté d'explorer le lien entre fatigue et motivation. Leur étude consistait en une tâche de résolution de Sudoku informatisée et divisée en 14 blocs. Les participants recevaient une récompense une fois sur deux. Pendant la réalisation de cette tâche, une vidéo de chat diffusé en haut de l'écran servait de distracteur. Les résultats ont montré de meilleures performances lorsque les participants avaient été récompensé comparativement à la condition sans récompense.

Bien que nous ayons évalué le niveau de motivation avec l'item correspondant dans l'échelle subjective VAS, une recherche future sur la fatigue cognitive dans laquelle la motivation serait modulée pourrait être envisagée.

VII Conclusion

Selon la littérature, un état de surcharge cognitive peut induire de la fatigue mentale. Néanmoins, peu d'études se sont intéressées à ce phénomène chez les sujets sains, et ce manquement concerne davantage les individus d'âge moyen. Pourtant, une diminution de l'efficacité cognitive a été démontrée au sein de cette population. Particulièrement, des réductions cognitives en terme de vitesse de traitement, de raisonnement et de fonctionnement exécutif ont été objectivées.

Cette présente étude avait donc pour objectif d'identifier et d'explorer les caractéristiques et les conséquences de la fatigue mentale au fil de l'avancée en âge. Certains des résultats obtenus vont dans le sens des observations antérieures présentes dans la littérature. D'autres, en revanche, semblent la contredire. Ainsi, cette recherche a bel et bien révélé un effet de la charge mentale sur la fatigue cognitive dans les deux groupes d'âge étudiés. Cette première observation s'accordent avec la proposition de Borragàn et al. (2017) selon laquelle une diminution du temps disponible pour traiter l'information induirait la fatigue. Cependant, nos résultats n'ont pas permis d'objectiver un effet de l'âge sur les performances comportementales. Les sujets middle-aged s'étant montrés plus performants que les sujets jeunes.

De plus, la littérature a également mis en évidence une difficulté pour évaluer objectivement la fatigue cognitive. En effet, généralement, ce phénomène est mesuré au travers de questionnaires et d'échelles fournissant une évaluation davantage subjective. Dès lors, le second objectif de ce mémoire était d'objectiver l'apparition et l'évolution de la fatigue mentale via la récolte de données physiologiques oculaires. Conformément aux études antérieures, les résultats obtenus n'ont pas permis d'établir clairement un lien entre sensations subjectives et déclin des performances à la tâche. Néanmoins, une relation entre le niveau de charge mentale lors de la tâche comportementale et la somnolence subjective a été constatée. En effet, les participants s'estimaient plus somnolents après la réalisation de la tâche qu'avant, et ce, davantage en HCL qu'en LCL. Enfin, ce présent travail a révélé que les indices relatifs à la dilatation pupillaire et à l'écartement palpébral semblent être de meilleurs indicateurs de fatigue cognitive comparativement à la fréquence et à la durée des clignements. En revanche, nos résultats n'ont pas permis d'établir un lien entre déclin des performances à la tâche et évolution des paramètres oculaires au fil de cette tâche.

VIII Bibliographie

- Abbasi, A. M., Motamedzade, M., Aliabadi, M., Golmohammadi, R., & Tapak, L. (2018). Study of the physiological and mental health effects caused by exposure to low-frequency noise in a simulated control room. *Building Acoustics*, 25(3), 233–248.
- Ackerman, P.L., & Kanfer, R. (2009). Test length and cognitive fatigue: an empirical examination of effects on performance and test-taker reactions. *Journal of experimental psychology*, 15(2), 163–181. <https://doi.org/10.1037/a0015719>
- Askari, S., Fanelli, D., & Harvey, K. (2021). Cognitive fatigue interventions for people with multiple sclerosis: A scoping review. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, 55, 103213.
- Ayaz, H., Shewokis, P. A., Bunce, S., Izzetoglu, K., Willems, B., & Onaral, B. (2012). Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment. *NeuroImage*, 59(1), 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.06.023>
- Azan, F. (2015). Le vieillissement oculaire. *Revue Francophone d'Orthoptie*, 8(3), 209-213.
- Bafna, T., & Hansen, J. P. (2021). Mental fatigue measurement using eye metrics: A systematic literature review. *Psychophysiology*, 58(6), e13828.
- Baltes, P. B. (1997). On the incomplete architecture of human ontogeny: Selection, optimization, and compensation as foundation of developmental theory. *American Psychologist*, 52(4), 366-380. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.52.4.366>
- Bartley, S. H., & Chute, E. (1947). *Fatigue and impairment in man*. McGraw-Hill.
- Barwick, F., Arnett, P.A., & Slobounov, S. (2012). EEG correlates of fatigue during administration of a neuropsychological test battery. *Clinical Neurophysiology*, 123, 278-284.

- Belmont, A., Agar, N., Hugeron, C., Gallais, B., & Azouvi, P. (2006, July). Fatigue and traumatic brain injury. *In Annales de réadaptation et de médecine physique* 49(6), 370-374.
Elsevier Masson.
- Berchicci, M., Lucci, G., & Di Russo, F. (2013). Benefits of physical exercise on the aging brain: the role of the prefrontal cortex. *Journals of Gerontology Series A: Biomedical Sciences and Medical Sciences*, 68(11), 1337-1341
- Bernhardt, K. A., Poltavski, D., Petros, T., & Richard Ferraro, F. (2019). Differentiating Active and Passive Fatigue with the use of Electroencephalography. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 63(1), 1285–1289
- Bielak, A., Cherbuin, N., Bunce, D., & Anstey, K. (2013). Intraindividual variability is a fundamental phenomenon of aging: Evidence from an 8-year longitudinal study across young, middle, and older adulthood. *Developmental Psychology*, 50. <https://doi.org/10.1037/a0032650>
- Boogaerts, J. G., Vanacker, E., Seidel, L., Albert, A., & Bardiau, F. M. (2000). Assessment of post operative nausea using a visual analogue scale. *Acta anaesthesiologica scandinavica*, 44(4), 470-474
- Boksem, M.A.S., & Tops, M. (2008). Mental fatigue: costs and benefits.
Brain Research Reviews, 59 (1), 125–139
- Borragán, G., Slama, H., Destrebecqz, A., & Peigneux, P. (2016). Cognitive fatigue facilitates procedural sequence learning. *Frontiers in human neuroscience*, 10, 86.
- Borragán, G., Slama, H., Bartolomei, M., & Peigneux, P. (2017). Cognitive fatigue: A time-based resource-sharing account. *Cortex*, 89, 71-84

- Borragán, G., Gilson, M., Guerrero-Mosquera, C., Di Ricci, E., Slama, H., & Peigneux, P. (2018). Transcranial direct current stimulation does not counteract cognitive fatigue, but induces sleepiness and an inter-hemispheric shift in brain oxygenation. *Frontiers in Psychology*, 9, 2351.
- Bradley, J. C., Bentley, K. C., Mughal, A. I., Bodhireddy, H., & Brown, S. M. (2011). Dark-adapted pupil diameter as a function of age measured with the NeuroOptics pupillometer. *Journal of refractive surgery*, 27(3), 202-207
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2007, October 29). Middle age. *Encyclopedia Britannica*.
<https://www.britannica.com/science/middle-age>
- Bryant, D., Chiaravalloti, N. D., & DeLuca, J. (2004). Objective measurement of cognitive fatigue in multiple sclerosis. *Rehabilitation psychology*, 49(2), 114
- 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, 193-213.
- Burke, S. E., Babu Henry Samuel, I., Zhao, Q., Cagle, J., Cohen, R. A., Kluger, B., & Ding, M. (2018). Task-based cognitive fatigability for older adults and validation of mental fatigability subscore of Pittsburgh Fatigability Scale. *Frontiers in aging neuroscience*, 10, 327.
- Cellini, N., et al., 2021. Changes in sleep timing and subjective sleep quality during the COVID-19 lockdown in Italy and Belgium: age, gender and working status as modulating factors. *Sleep Med*. 77, 112–119
- Chaudhuri A, Behan PO. (2000). Fatigue and basal ganglia. *J Neurol Sci* ;179(1-2) : 34–42
[doi: 10.1016/S0022-510X\(00\)00411-1](https://doi.org/10.1016/S0022-510X(00)00411-1)

Chaudhuri A, Behan PO. (2004). Fatigue in neurological disorders.

[doi: 10.1016/S0140-6736\(04\)15794-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(04)15794-2)

Clark, L., & Sahakian, B. J. (2022). Cognitive neuroscience and brain imaging in bipolar disorder.

Dialogues in clinical neuroscience.

Deary, I. J., Corley, J., Gow, A. J., Harris, S. E., Houlihan, L. M., Marioni, R. E., ... & Starr, J. M.

(2009). Age-associated cognitive decline. *British medical bulletin*, 92(1), 135-152.

De Jong, M., Jolij, J., Pimenta, A., & Lorist, M. M. (2018). Age modulates the effects of mental fatigue on typewriting. *Frontiers in psychology*, 9, 1113.

DeLuca, J., Genova, H. M., Capili, E. J. & Wylie, G. R. (2009). Functional Neuroimaging of Fatigue. *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.* 20, 325–337

Deltour, J.J. (1993). *Echelle de vocabulaire Mill Hill de J. C. Raven : Adaptation française et normes comparées du Mill Hill et du Standard Progressive Matrices (PM38)*. Manuel et Annexes. Braine le Château, Belgique: Application des Techniques Modernes.

Desmond, P. A., & Hancock, P. A. (2001). Active and passive fatigue states

Dobryakova, E., DeLuca, J., Genova, H. M., & Wylie, G. R. (2013). Neural correlates of cognitive fatigue: Cortico-striatal circuitry and effort-reward imbalance. *Journal of the International Neuro psychological Society*, 19(8), 849–853. <https://doi.org/10.1017/S1355617713000684>

Esposito, F., Otto, T., Zijlstra, F. R. H., & Goebel, R. (2014). Spatially distributed effects of mental exhaustion on resting-state fMRI networks. *PloS One*, 9(4).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094222>

- Fairclough, S. H., & Houston, K. (2004). A metabolic measure of mental effort. *Biological Psychology*, 66(2), 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2003.10.001>
- Ferreira, D., Molina, Y., Machado, A., Westman, E., Wahlund, L. O., Nieto, A., ... & Barroso, J. (2014). Cognitive decline is mediated by gray matter changes during middle age. *Neurobiology of aging*, 35(5), 1086-1094.
- Ferreira, D., Correia, R., Nieto, A., Machado, A., Molina, Y., & Barroso, J. (2015). Cognitive decline before the age of 50 can be detected with sensitive cognitive measures. *Psicothema*, 27(3), 216–222. <https://doi.org/10.7334/psicothema2014.192>
- Finch, C. E. (1991). Middle age: an evolving frontier in gerontology. *Neurobiology of aging*, 12(1), 1-2.
- Fuster, J.M. (1989). The prefrontal cortex (2nd ed.). New York: Raven Press.
- Gergelyfi, M., Jacob, B., Olivier, E., & Zénon, A. (2015). Dissociation between mental fatigue and motivational state during prolonged mental activity. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 9, 176. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2015.00176>
- Gergelyfi, M., Sanz-Arigita, E. J., Solopchuk, O., Dricot, L., Jacob, B., & Zenon, A. (2021). Mental fatigue correlates with depression of task-related network and augmented DMN activity but spares the reward circuit. *NeuroImage*, 243, 118532.
- Gilsoul, J. (2020). Cognitive fatigue in young, middle-aged, and older people: behavioral and functional neuroimaging investigations
- Gilsoul, J., Libertiaux, V., & Collette, F. (2021). Cognitive fatigue in young, middle-aged, and older: Breaks as a way to recover. *Applied Psychology*, 1–33 <https://doi.org/10.1111/apps.12358>

- Goffeng, E. M., Wagstaff, A., Nordby, K. C., Meland, A., Goffeng, L. O., Skare, Ø., ... & Lie, J. A. S. (2019). Risk of fatigue among airline crew during 4 consecutive days of flight duty. *Aerospace medicine and human performance*, 90(5), 466-474
- Gopher, D., & Donchin, E. (1986). Workload: An examination of the concept
- Guedj, C. (2016). Modulation noradrénergique de l'attention (Doctoral dissertation, Université de Lyon).
- Guillemin, C., Hammad, G., Read, J., Requier, F., Charonitis, M., Delrue, G., ... & Collette, F. (2022). Pupil response speed as a marker of cognitive fatigue in early Multiple Sclerosis☆. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, 65, 104001
- Guillon, M., Dumbleton, K., Theodoratos, P., Gobbe, M., Wooley, C. B., & Moody, K. (2016). The effects of age, refractive status, and luminance on pupil size. *Optometry and vision science*, 93(9), 1093
- Gunstad, J., Paul, R. H., Brickman, A. M., Cohen, R. A., Arns, M., Roe, D., Lawrence, J. J., & Gordon, E. (2006). Patterns of Cognitive Performance in Middle-Aged and Older Adults: A Cluster Analytic Examination. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, 19(2), 59–64. <https://doi.org/10.1177/0891988705284738>
- Hancock, G. M., Longo, L., Young, M. S., & Hancock, P. A. (2021). Mental workload. *Handbook of human factors and ergonomics*, 203-226.
- Haug, H., & NL, S. (1983). Anatomical changes in aging brain: Morphometric analysis of the human prosencephalon.
- Herlambang, M. B., Taatgen, N. A., Cnossen, F.(2019). The Role of Motivation as a Factor in Mental Fatigue. *Human Factors*. [doi:10.1177/0018720819828569](https://doi.org/10.1177/0018720819828569)

- Huibers, M. J. H., Beurskens, A. J. H. M., Prins, J. B., Kant, I. J., Bazelmans, E., Van Schayck, ... Bleijenberg, G. (2002). Fatigue, burnout, and chronic fatigue syndrome among employees on sick leaves : do attributions make the differences?. *Occupational and environmental medicine*, 60, 26-31
- Hockey, G. R. J. (1993). Cognitive-energetical mechanisms in the management of work demands and psychological health. In A. D. Baddeley & L. Weiskrantz (Eds.), *Attention, selection, awareness and control: a tribute to Donald Broadbent* (pp. 328– 345). Oxford University Press.
- Hockey, G. R. J. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 45(1), 73–93.
[https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(96\)05223-4](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(96)05223-4)
- Hockey, G. R. J. (2005). Operator functional state: the prediction of breakdown in human performance. In J. Duncan, L. Phillips & P. McLeod (Eds.). *Measuring the mind: speed, control, and age* (pp. 373–394). Oxford University Press
- Hockey, G. R. J. (2011). A motivational control theory of cognitive fatigue. In P.L. Ackerman (Ed.), *Cognitive fatigue: Multidisciplinary perspectives on current research and future applications* (pp.167-188). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/12343-008>
- Hockey, G. R. J. (2013). *The psychology of fatigue: Work, effort and control*. Cambridge University Press. [https:// doi.org/10.1017/CBO9781139015394](https://doi.org/10.1017/CBO9781139015394)
- Holding, D. H. (1983). Fatigue. In G. R. J. Hockey (Ed.), *Stress and fatigue in human performance* (pp. 145–168). Chichester, UK: Wiley.

- Hopstaken, J. F., Van Der Linden, D., Bakker, A. B., & Kompier, M. A. (2015). A multifaceted investigation of the link between mental fatigue and task disengagement. *Psychophysiology*, 52(3), 305-315.
- Holtzer, R., Shuman, M., Mahoney, J. R., Lipton, R., & Verghese, J. (2011). Cognitive fatigue defined in the context of attention networks. *Neuropsychology, Development, and Cognition. Section B, Aging, Neuropsychology and Cognition*, 18(1), 108–128
- Horne, J.A., & Ostberg, O. (1976). A self-assessment questionnaire to determine morningness-eveningness in human circadian rhythms. *International Journal of Chronobiology*, 4, 97-110
- Jacko, J.A., Ward, K.G., 1996. Toward establishing a link between psychomotor task complexity and human information processing. *Computers and Industrial Engineering* 31(1e2), 533e536
- Johansson, B., Starmark, A., Berglund, P., Rödhölm, M., & Rönnbäck, L. (2010). A self-assessment questionnaire for mental fatigue and related symptoms after neurological disorders and injuries. *Brain Injury*, 24(1), 2-12.
- Joshi, S., Gold, J.I., 2020. Pupil size as a window on neural substrates of cognition. *Trends Cogn. Sci.* 24, 466–480
- Khaksari, K., Condy, E., Millerhagen, J. B., Anderson, A. A., Dashtestani, H., & Gandjbakhche, A. H. (2019, September). Effects of Performance and task duration on mental workload during working memory task. In *Photonics*, 6(3), p. 94. Multidisciplinary Digital Publishing Institute
- Klaassen, E. B., Evers, E. A. T., de Groot, R. H. M., Backes, W. H., Veltman, D. J., & Jolles, J. (2014). Working memory in middle-aged males: Age-related brain activation changes and cognitive fatigue effects. *Biological Psychology*, 96, 134–143.

- Klaassen, E. B., Plukaard, S., Evers, E. A. T., de Groot, R. H. M., Backes, W. H., Veltman, D. J., & Jolles, J. (2016). Young and middle-aged schoolteachers differ in the neural correlates of memory encoding and cognitive fatigue: A functional MRI study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*(148), 1–12. <https://doi.org/doi:10.3389/fnhum.2016.00148>
- Kluger, B. M., Krupp, L. B., & Enoka, R. M. (2013). Fatigue and fatigability in neurologic illnesses: proposal for a unified taxonomy. *Neurology*, *80*(4), 409-416.
- Krupp, L. B., & Elkins, L. E. (2000). Fatigue and declines in cognitive functioning in multiple sclerosis. *Neurology*, *55*(7), 934-939
- Kuppuswamy, A. (2017). *The fatigue conundrum*. *Brain*, *140*(8), 2240-2245
- Kuppuswamy A. (2021). The Neurobiology of Pathological Fatigue: New Models, New Questions. *Neuroscientist*. [doi: 10.1177/1073858420985447](https://doi.org/doi:10.1177/1073858420985447)
- Lachman, M., Lewkowicz, C. J., Marcus, A., & Peng, Y. (1994). Images of midlife development among young, middle-aged, and older adults. *Journal of Adult Development*, *1*, 201-211
<https://doi.org/10.1007/BF02277581>
- Lee, Y. S., Kim, H. J., Lim, D. K., Kim, M. H., & Lee, K. J. (2022). Age-specific influences of refractive error and illuminance on pupil diameter. *Medicine*, *101*(27)
- Levine, D. A., Gross, A. L., Briceño, E. M., Tilton, N., Giordani, B. J., Sussman, J. B., ... & Galecki, A. T. (2021). Sex differences in cognitive decline among US adults. *JAMA network open*, *4*(2), e210169-e210169

- Li, S.-C., Lindenberger, U., & Bäckman, L. (2010). Dopaminergic modulation of cognition across the life span. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(5), 625–630. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.02.003>
- Lim, W. L., Sourina, O., & Wang, L. (2015, October). Mind-An EEG neurofeedback multitasking game. *In 2015 International Conference on Cyberworlds (CW) (pp. 169-172)*.
- Liu, P., & Li, Z. (2012). Task complexity: A review and conceptualization framework. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(6), 553-568.
- Lo, J. C., Ong, J. L., Leong, R. L., Gooley, J. J., & Chee, M. W. (2016). Cognitive performance, sleepiness, and mood in partially sleep deprived adolescents: the need for sleep study. *Sleep*, 39(3), 687-698.
- Lorist, M. M., Boksem, M. A., & Ridderinkhof, K. R. (2005). Impaired cognitive control and reduced cingulate activity during mental fatigue. *Cognitive Brain Research*, 24(2), 199-205
- Lou, J. S. (2009). Physical and mental fatigue in Parkinson's disease. *Drugs & aging*, 26(3), 195-208
- Lucci, G., Berchicci, M., Spinelli, D., Taddei, F., & Di Russo, F. (2013). The effects of aging on conflict detection. *PloS one*, 8(2), e56566.
- Maillot, P., & Perrot, A. (2012). La théorie de l'enrichissement cognitif à travers la stimulation physique: activité physique traditionnelle versus exergames. *NPG Neurologie-Psychiatrie-Gériatrie*, 12(71), 217-229
- Mairesse, O., & Neu, D. (2016). Tired of blunt tools ? Sharpening the clinical assessment of fatigue and sleepiness. *Psychiatry Research*, 238, 100-108.

- Maltese, F., Adda, M., Bablon, A., Hraeich, S., Guervilly, C., Lehingue, S., ... & Papazian, L. (2016). Night shift decreases cognitive performance of ICU physicians. *Intensive care medicine*, 42(3), 393-400
- Mandrick, K., Peysakhovich, V., Rémy, F., Lepron, E., & Causse, M. (2016). Neural and psycho physiological correlates of human performance under stress and high mental workload. *Biological psychology*, 121, 62-73
- Manly, T. (1999). The absent mind : further investigations of sustained attention to response. *Neuropsychologia*, 37(6), 661-670. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(98\)00127-4](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(98)00127-4)
- Marandi, R., Madeleine, P., Omland, Ø., Vuillerme, N., & Samani, A. (2018). Eye movement characteristics reflected fatigue development in both young and elderly individuals. *Scientific reports*, 8(1), 1-10.
- Marcora, S. M., Staiano, W., & Manning, V. (2009). Mental fatigue impairs physical performance in humans. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 106(3), 857–864. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.91324.2008>
- May, J. F., & Baldwin, C. L. (2009). Driver fatigue: The importance of identifying causal factors of fatigue when considering detection and countermeasure technologies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12(3), 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2008.11.005>
- Melo, H. M., Nascimento, L. M., & Takase, E. (2017). Mental fatigue and heart rate variability (HRV): The time-on-task effect. *Psychology & Neuroscience*, 10(4), 428.
- McCormick, F., Kadzielski, J., Landrigan, C. P., Evans, B., Herndon, J. H., & Rubash, H. E. (2012). Surgeon fatigue: A prospective analysis of the incidence, risk, and intervals of predicted fatigue-related impairment in residents. *Archives of Surgery*, 147(5), 430–435

- Mizuno, K., Watanabe, Y., Tanaka, M., Yamaguti, K., Kajimoto, O., & Kuratsune, H. (2011). Mental fatigue caused by prolonged cognitive load associated with sympathetic hyperactivity. *Behavioral and Brain Functions*, 7, 7-7. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-7-17>
- Moeller, S. J., Tomasi, D., Honorio, J., Volkow, N. D., & Goldstein, R. Z. (2012). Dopaminergic involvement during mental fatigue in health and cocaine addiction. *Translational Psychiatry*, 2(10), Article e176. <https://doi.org/10.1038/tp.2012.110>
- Monaca, C. (2008). The Epworth somnolence scale. *Revue neurologique*, 164, F15-F16.
- Murray W. Johns, A New Method for Measuring Daytime Sleepiness: The Epworth Sleepiness Scale, *Sleep*, Volume 14, Issue 6, November 1991, Pages 540– 545, <https://doi.org/10.1093/sleep/14.6.540>
- Myers, C. S. (1937). Conceptions of mental fatigue. *The American Journal of Psychology*, 50, 296–306. <https://doi.org/10.2307/1416638>
- Myerson, J., Hale, S., Wagstaff, D., Poon, L. W., & Smith, G. A. (1990). The information-loss model: a mathematical theory of age-related cognitive slowing. *Psychological review*, 97(4), 475
- Nakagawa, S., Sugiura, M., Akitsuki, Y., Hosseini, S. M. H., Kotozaki, Y., Miyauchi, C. M., Yomogida, Y., Yokoyama, R., Takeuchi, H., & Kawashima, R. (2013). Compensatory effort parallels midbrain deactivation during mental fatigue: An fMRI study.
- Nielsen, H. B., Hansen, Å. M., Conway, S. H., Dyreborg, J., Hansen, J., Kolstad, H. A., Larsen, A. Nabe-Nielsen, K., Pompeii, L. A., & Garde, A. H. (2019). Short time between shifts and risk of injury among Danish hospital workers: A register-based cohort study. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 45(2), 166–173. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3770>

- Pattyn, N., Neyt, X., Henderickx, D., & Soetens, E. (2008). Psychophysiological investigation of vigilance decrement : Boredom or cognitive fatigue ? *Physiology & Behavior*, 93(1-2), 369-378.
<https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2007.09.016>
- Penner, I. K., & Paul, F. (2017). Fatigue as a symptom or comorbidity of neurological diseases. *Nature Reviews Neurology*, 13(11), 662-675.
- Polosan, M., Lemogne, C., Jardri, R., & Fossati, P. (2016). La cognition au cœur de la dépression. *L'Encéphale*, 42(1), 1S3-1S11
- Price, D.D., McGrath, P.A. Rafii, I., & Buckingham, B. (1983). The validation of visual analogue scales as ratio scale measures for chronic and experimental pain. *Pain*, 17(1), 45-56.
[doi:10.1016/0304-3959\(83\)80126-4](https://doi.org/10.1016/0304-3959(83)80126-4)
- Rabat, A. (2022). Sommeil et performances. *Revue Défense Nationale*, H-, 25-35.
<https://doi.org/10.3917/rdna.hs07.0025>
- Rabinbach, A. (1990). The human motor: energy, fatigue and the origins of modernity. University of California Press.
- Rabbitt, P. (1979). How old and young subjects monitor and control responses for accuracy and speed. *British Journal of Psychology*, 70(2), 305-311
- Radloff, L. S. (1977). The CES-D Scale: A Self-Report Depression Scale for Research in the General Population. *Applied Psychological Measurement*, 1(3), 385– 401.
<https://doi.org/10.1177/014662167700100306>
- Ratcliff, R., & McKoon, G. (2008). The diffusion decision model: theory and data for two-choice decision tasks. *Neural computation*, 20(4), 873-922.

- Reilly, J., Kelly, A., Kim, S. H., Jett, S., & Zuckerman, B. (2018). The human task-evoked pupillary response function is linear : Implications for baseline response scaling in pupillometry. *Behavior Research Methods*, 51(2), 865-878. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-1134-4>
- Robertson, I. H., Manly, T., Andrade, J., Baddeley, B. T., & Yiend, J. (1997). 'Oops ! ' ; Performance correlates of everyday attentional failures in traumatic brain injured and normal subjects. *Neuropsychologia*, 35(6), 747-758. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(97\)00015-8](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(97)00015-8)
- Rodriguez, J.D., et al., 2018. Blink: characteristics, controls, and relation to dry eyes. *Curr. Eye Res.* 43, 52–66
- Rondeel, E. W., Van Steenbergen, H., Holland, R. W., & Van Knippenberg, A. (2015). A closer look at cognitive control: Differences in resource allocation during updating, inhibition and switching as revealed by pupillometry. *Frontiers in human neuroscience*, 9, 494.
- Salthouse, T. A. (1996). The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological review*, 103(3), 403
- Shahid, A., Wilkinson, K., Marcu, S., & Shapiro, C. M. (2011). Karolinska Sleepiness Scales (KSS). In A. Shahid, K. Wilkinson, S. Marcu, & C. Shapiro (Eds.), STOP, THAT and Ones Hundred Other Sleep Scales. New York, NY: Springer. [doi: 10.1007/978-1-4419-9893-4_47](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9893-4_47)
- Shen, J., Barbera, J., & Shapiro, C. M. (2006). Distinguishing sleepiness and fatigue: focus on definition and measurement. *Sleep medicine reviews*, 10(1), 63-76.
- Shigihara, Y., Tanaka, M., Ishii, A., Tajima, S., Kanai, E., Funakura, M., & Watanabe, Y. (2013). Two different types of mental fatigue produce different styles of task performance. *Neurology, Psychiatry and Brain Research*, 19(1), 5-11

- Sirois, S., & Brisson, J. (2014). Pupillometry. Wiley Interdisciplinary Reviews : *Cognitive Science*, 5(6), 679-692. <https://doi.org/10.1002/wcs.1323>
- Song, J., Wang, R., Zhang, G., Xiong, C., Zhang, L., & Sun, C. (2015). Electrooculogram signals analysis for process control operator based on fuzzy c-means. *vectors*, 1,2
- Starns, J. J., & Ratcliff, R. (2010). The effects of aging on the speed–accuracy compromise: Boundary optimality in the diffusion model. *Psychology and aging*, 25(2), 377.
- Terry, R. D., DeTeresa, R., & Hansen, L. A. (1987). Neocortical cell counts in normal human adult aging. *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society*, 21(6), 530-539.
- Torrente, F., et al., 2022. Psychological symptoms, mental fatigue and behavioural adherence after continuous days of strict lockdown during the COVID-19 pandemic in Argentina. *BJPsych Open*
- Trejo, L. J., Kochavi, R., Kubitz, K., Montgomery, L. D., Rosipal, R., & Matthews, B. (2005). EEG-based Estimation of Cognitive Fatigue. *Psychological Assessment*, 5797, 1–11.
- Van der Linden, D., & Eling, P. (2005). Mental fatigue disturbs local processing more than global processing. *Psychological Research Psychologische Forschung*, 70(5), 395-402.
<https://doi.org/10.1007/s00426-005-0228-7>
- Völker, I., Kirchner, C., & Bock, O. L. (2016). Relation between multiple markers of work-related fatigue. *Safety and Health at Work*, 7(2), 124-129
- Wang, C., Ding, M., & Kluger, B. M. (2014). Change in intraindividual variability over time as a key metric for defining performance-based cognitive fatigability. *Brain and Cognition*, 85(1), 251–258. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2014.01.004>

- Weber, P., Rupprecht, F., Wiesen, S., Hamann, B., & Ebert, A. (2021). Assessing Cognitive Load via Pupillometry. In *Advances in Artificial Intelligence and Applied Cognitive Computing* (pp. 1087-1096). Springer, Cham
- Wechsler, D. (1997). *Echelle d'intelligence de Wechsler pour adultes : W.A.I.S-III* (3e édition). Paris : Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Wickens, C. D. (2008). Multiple Resources and Mental Workload. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3), 449-455
- Wickens C. D. (2002). Multiple resources and performance predictors. *Theoretical Issues in Ergonomics Science* (3), 159-177
- Wise, J. M., Heaton, K., & Patrician, P. (2019). Fatigue in long-haul truck drivers: A concept analysis. *Workplace Health & Safety*, 67(2), 68–77. <https://doi.org/10.1177/2165079918800509>
- Woodruff-Pak, D. S. (1997). *The neuropsychology of aging*. Blackwell Publishing
- Xie, B., & Salvendy, G. (2000). Prediction of mental workload in single and multiple tasks environments. *International journal of cognitive ergonomics*, 4(3), 213-242
- Zhao, B., 1992. A Structured Analysis and Quantitative Measurement of Task Complexity in Human-Computer Interaction. Unpublished dissertation. Purdue University
- Zimmermann, P., & Fimm, B. (2009). *Test d'évaluation de l'attention ((TAP: 'Test of Attentional Performances'), Version 2.2)*. Herzogenrath : Psytest.
- Zhou, S. S., Fan, J., Lee, T. M., Wang, C. Q., & Wang, K. (2011). Age-related differences in attentional networks of alerting and executive control in young, middle-aged, and older Chinese adults. *Brain and Cognition*, 75(2), 205-210.

Zhou, H., Lu, S., Chen, J., Wei, N., Wang, D., Lyu, H., ... & Hu, S. (2020). The landscape of cognitive function in recovered COVID-19 patients. *Journal of psychiatric research*, 129, 98-102.