

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

LA FATIGUE COGNITIVE ET SON LIEN AVEC LA PERFORMANCE ET L'APPRENTISSAGE CHEZ UNE
POPULATION ADULTE DANS UNE TÂCHE D'APPRENTISSAGE SUR LA PHYSIQUE NEWTONNIENNE
DANS UN JEU SÉRIEUX

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
MAÎTRISE EN ÉDUCATION (ÉDUCATION ET FORMATION SPÉCIALISÉES)

PAR
GENEVIÈVE PARENT

FÉVRIER 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je n'aurais pu mener à bien mon projet de maîtrise seule. Plusieurs personnes ont su aider, supporter et écouter tout au long de ce long processus. Cette page est alors dédiée à ces précieuses personnes afin de leur dire quelques mots.

Je veux d'abord remercier ma famille; ma mère qui me supporte et me pousse toujours à aller plus loin, mes sœurs qui m'inspirent tous les jours, mon copain qui me soutient dans tous mes projets. Je tiens à remercier tout spécialement mon père dont l'esprit critique, les compétences techniques et le large vocabulaire ont été plus que bénéfiques à la rédaction de ce projet. Depuis bien avant ma maîtrise tu partages ton expérience et ta sagesse avec moi, me permettant de m'en imprégner. Merci pour ton aide cruciale à la réalisation de ce projet, mais aussi pour tout ce que tu fais pour moi au-delà de l'académique. Merci à vous tous, je suis excessivement choyée d'être si bien entourée.

Un immense merci à Bianca, la meilleure partenaire de maîtrise sans qui la rédaction de ce mémoire n'aurait jamais connu de fin. Ta compagnie tout au long de notre rédaction, et particulièrement durant nos « tomates » estivales, a été pour moi une source de motivation et de support incroyable. Nos discussions et ton visage pensif au coin de mon écran pendant nos longues heures de travail sont vraiment ce qui m'a permis de compléter ce marathon. Merci du fond du cœur!

Je souhaite exprimer ma gratitude envers M. Julien Mercier, mon directeur de maîtrise. M. Mercier, c'est vous qui m'avez inspiré à poursuivre et faire fleurir cette passion scientifique qui s'éveillait en moi. Toutes nos rencontres m'emplissaient de curiosité, de motivation et de détermination. Travailler avec vous sur ce projet de recherche a été un bonheur et un réel honneur. J'anticipe avec excitation les prochains projets sur lesquels nous collaborerons à nouveau, m'offrant une nouvelle chance d'apprendre de votre expertise.

Enfin, un immense merci à mes évaluateurs, Mme Annie Dubeau et M. Éric Dion, qui m'ont prêté leur regard d'expert et m'ont fourni des commentaires enrichissants. Merci également à Mme Sophie Grossmann, codirectrice de la maîtrise en éducation, concentration éducation et formation spécialisées, pour son soutien et ses commentaires. Un grand merci à mes amis qui m'ont écouté et supporté tout au long de cette aventure, vous êtes formidables. Merci à vous tous!

DÉDICACE

À mon petit chien Félix, ami à quatre pattes dont
l'abolement a su ponctuer plus d'une réunion.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
DÉDICACE	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
RÉSUMÉ.....	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE	2
1.1 Contexte général.....	2
1.2 Contexte spécifique	3
1.3 La fatigue cognitive	4
1.4 Problème.....	5
1.5 Pertinence sociale	5
1.6 Pertinence scientifique	6
1.7 Question générale de la recherche.....	6
CHAPITRE 2 CADRE THÉORIQUE.....	8
2.1 Charge cognitive.....	8
2.1.1 Conceptualisation de la charge cognitive dans le domaine de l'éducation.....	8
2.1.2 Conceptualisation de la charge cognitive dans le domaine de la psychologie.....	10
2.1.3 Conceptualisation de la charge cognitive dans le domaine des neurosciences.....	11
2.2 Fatigue cognitive	11
2.2.1 Définition	12
2.2.2 La période de grâce.....	12
2.2.3 Manifestations	12
2.2.3.1 Manifestations subjectives	15
2.2.3.2 Manifestations comportementales	15
2.2.3.3 Manifestations physiologiques.....	15
2.2.3.4 Manifestations psychophysiologiques.....	16
2.2.4 Ennui	17
2.2.5 Indicateurs et mesures	17
2.2.5.1 Comportements oculaires	17
2.2.5.2 Comportements cardiaques	18

2.2.5.3	Rayonnement électrique lié à certains aspects du fonctionnement cérébral.....	18
2.2.6	Éléments permettant de contrer la fatigue cognitive	23
2.3	Performance.....	24
2.3.1	Apprentissage	24
2.3.2	Motivation	24
2.4	Agentivité	25
2.4.1	Choix	25
2.4.2	Aspects de l'agentivité	25
2.5	Questions spécifiques et hypothèses.....	27
CHAPITRE 3 MÉTHODE		30
3.1	Devis de recherche.....	30
3.2	Participants	30
3.3	Mesures.....	31
3.3.1	Apprentissage de notions de physique mécanique	31
3.4	Intervention	33
3.5	Déroulement	34
3.6	Préparation des données	35
3.6.1	Décontamination des données EEG.....	35
3.6.2	Transformation de l'EEG vers la « métrique » de charge cognitive.....	35
3.7	Plan d'analyse	36
CHAPITRE 4 RÉSULTATS.....		38
4.1	Période de grâce	38
4.2	Évolution de la fatigue cognitive.....	41
4.3	Relations fatigue cognitive, performance et apprentissage	41
4.4	Agentivité	46
CHAPITRE 5 DISCUSSION		50
5.1	Période de grâce	50
5.2	Évolution de la fatigue cognitive.....	51
5.3	Relations entre la fatigue, la performance et l'apprentissage.....	51
5.3.1	Apprentissage	52
5.3.1.1	Succès vers succès (SvS).....	52
5.3.1.2	Échec vers succès (ÉvS) et succès vers échec (SvÉ)	53
5.3.1.3	Échec vers échec	54
5.3.2	Performance	55
5.4	Agentivité	55

CHAPITRE 6 CONCLUSION57

6.1 Faits saillants57

6.2 Atteinte des objectifs58

6.3 Forces et limites58

6.4 Travaux futurs60

RÉFÉRENCES62

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 <i>Liens entre les types de charges cognitives</i>	9
Figure 2.2 <i>Manifestations objectives de la fatigue cognitive</i>	16
Figure 2.3 <i>Topographie standard du placement des électrodes</i>	19
Figure 3.1 <i>Exemple de question du Force Concept Inventory (FCI) (Hestnes et al. ,1992)</i>	32
Figure 3.2 <i>Exemple d'un tableau de Mécanika</i>	33
Figure 3.3 <i>Organisation des données doublement nichées</i>	37
Figure 4.1 <i>Évolution de la fatigue cognitive accumulée des joueurs et témoins au fil de la tâche, par dyade (échelle variable)</i>	39
Figure 4.2 <i>Évolution de la fatigue cognitive accumulée des joueurs et témoins au fil de la tâche, par dyade (échelle unique)</i>	40
Figure 4.3 <i>Charge cognitive cumulée moyenne pour tous les tableaux concernant une même question selon les gains d'apprentissage et selon l'agentivité</i>	42
Figure 4.4 <i>Charge cognitive cumulée moyenne pour tous les tableaux concernant une même question selon l'agentivité</i>	42
Figure 4.5 <i>Charge cognitive cumulée moyenne pour tous les tableaux concernant une même question selon les scénarios d'évolution des conceptions</i>	43
Figure 4.6 <i>Charge cognitive cumulée moyenne des joueurs en relation avec le temps passé par tableau selon le tableau</i>	45
Figure 4.7 <i>Charge cognitive cumulée moyenne des témoins en relation avec le temps passé par tableau selon le tableau</i>	45
Figure 4.8 <i>Évolution de la charge cognitive cumulée moyenne par tableau avec un intervalle de confiance de 95%</i>	47
Figure 4.9 <i>Distribution des courbes d'évolution de la charge cognitive cumulée des joueurs de toutes les dyades</i>	47
Figure 4.10 <i>Distribution des courbes d'évolution de la charge cognitive cumulée des joueurs de toutes les dyades (tronquée)</i>	48
Figure 4.11 <i>Distribution des courbes d'évolution de la charge cognitive cumulée des témoins de toutes les dyades</i>	48
Figure 4.12 <i>Distribution des courbes d'évolution de la charge cognitive cumulée des témoins de toutes les dyades (tronquée)</i>	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 <i>Catégories et manifestations de la fatigue cognitive selon les auteurs : conséquences et indicateurs</i>	13
Tableau 2.2 <i>Mesures validées de la charge cognitive</i>	21
Tableau 4.1 <i>Effets des facteurs expérimentaux sur la charge cognitive accumulée pour les tableaux d'une question donnée</i>	44

RÉSUMÉ

La fatigue cognitive est un phénomène complexe qui affecte la performance et l'apprentissage. Bien que la documentation sur celle-ci soit assez large, le contexte d'apprentissage est peu présent dans les recherches sur la fatigue cognitive. L'objectif de ce projet est d'étudier la fatigue cognitive en apprentissage lors d'une séance de deux heures sur le jeu sérieux Mécanika qui traite des lois de la physique mécanique newtonienne. Les 74 participants ont aléatoirement été placés en dyade où l'un était joueur et l'autre témoin. Des données d'encéphalographie (EEG) ont été collectées afin d'obtenir une mesure de charge cognitive et d'inférer la fatigue cognitive. L'apprentissage des participants a été suivi par le biais du « Force Concept Inventory » (FCI), un test sur les connaissances en physique mécanique, passé une fois en prétest, puis une seconde fois en post-test. Les transitions entre les réponses du prétest au post-test sont catégorisées en quatre scénarios possibles : succès vers succès (SvS), succès vers échec (SvÉ), échec vers succès (ÉvS), échec vers échec (ÉvÉ). Les résultats permettent de déterminer que la fatigue cognitive évolue de manière linéaire avec le temps à la tâche. Les résultats démontrent également que les témoins se sont en moyenne moins fatigués et ont généralement plus appris que les joueurs. Lors du scénario SvS, les résultats sont opposés pour les joueurs et les témoins, pour qui ce scénario représente respectivement la plus petite et la plus grande moyenne de fatigue cognitive. Les scénarios SvÉ et ÉvS, représentent pour les joueurs la plus grande moyenne de fatigue cognitive. Pour les témoins, c'est le scénario ÉvS qui est associé à la plus petite moyenne de fatigue cognitive. De plus, les résultats permettent de déceler une corrélation positive significative entre la fatigue cognitive accumulée et le temps requis pour compléter un tableau. Les résultats du présent projet dirigent les recherches futures vers l'exploration approfondie des liens de la fatigue cognitive avec l'ennui et l'agentivité. Un croisement des mesures des bandes de fréquences EEG avec celles de l'oculométrie et l'ERP (« event related potential ») permettrait également une meilleure conceptualisation de la toile complexe de la fatigue cognitive en apprentissage.

Mots clés : Apprentissage - Charge cognitive - EEG - Fatigue cognitive

ABSTRACT

Mental fatigue is a complex phenomenon that affects performance and learning. Although the literature on mental fatigue is quite extensive, the learning context is not very present in research. This project's objective is to observe mental fatigue during a two-hour learning task with Mecanika, a serious educational game about the laws of Newtonian Physics. 74 participants were randomly placed in a dyad where one was a player and the other a watcher. Encephalography (EEG) data were collected to measure cognitive load and infer mental fatigue. The Force Concept Inventory (FCI), a test on knowledge of mechanical physics, was used as pretest and posttest to get a learning measure. The transitions between the pretest and posttest are categorized into four possible scenarios: success to success (SvS), success to failure (SvF), failure to success (FvS), failure to failure (FvF). The results make it possible to determine that fatigue evolves linearly with time on task. Results also show that the watchers had on average less mental fatigue and learned more than the players. Regarding scenario SvS, results for players and watchers are opposite, this scenario respectively represents the smallest and largest averages of cognitive fatigue. Scenarios SvF and FvS represent the highest average mental fatigue for the players. For the watchers, scenario FvS is associated with the lowest average mental fatigue. In addition, results reveal a significant positive correlation between accumulated mental fatigue and the time required to complete a table. This project points future research towards further exploration of the links between mental fatigue, boredom and agency. A cross-referencing of EEG frequency bands measurements with eye tracking and the event related potential (ERP) would also allow a better conceptualization of the complex web of mental fatigue in learning.

Keywords : Cognitive load - EEG – Learning - Mental fatigue

INTRODUCTION

Il est reconnu que la fatigue cognitive engendre de nombreuses conséquences nocives pour la performance dans des tâches de tout domaine, ce qui motive la recherche sur le sujet. Plusieurs recherchent des manières de mieux modéliser cette fatigue et de la gérer de façon plus stratégique. Ce phénomène n'est toutefois pas beaucoup étudié en contexte d'apprentissage. La liste de conséquences sur le comportement associées à la fatigue cognitive est longue et touche à plusieurs aspects cruciaux à l'apprentissage. La fatigue cognitive n'étant pas modélisée dans ce contexte, il n'est pas possible de bien la gérer, ce qui limite l'optimisation des apprentissages. L'objectif de la présente recherche est de mieux comprendre la fatigue cognitive en contexte d'apprentissage, ainsi que sa relation avec l'agentivité et l'apprentissage dans le but de modéliser son apparition et ses tendances. La question de la fatigue cognitive en apprentissage sera développée selon quatre aspects: son apparition et évolution; son lien à la performance; son lien à l'apprentissage; son lien avec le caractère plus ou moins actif de l'apprenant.

Ce mémoire est présenté en six chapitres. Le premier chapitre aborde la problématique de la fatigue cognitive en apprentissage. Le second expose tous les éléments théoriques à considérer pour ce projet. Les concepts de charge cognitive, fatigue cognitive, ennui, performance et d'agentivité y sont détaillés afin de bâtir un cadre théorique solide pour le projet de recherche. Le troisième chapitre décrit la tâche d'apprentissage, à savoir un jeu sérieux sur les concepts de physique mécanique, ainsi que la méthodologie employée dans ce projet. Le « Force Concept Inventory » (FCI), un test de connaissances en physique mécanique newtonienne, a été utilisé en prétest et post-test afin de mesurer l'apprentissage. Ce même chapitre présente également l'utilisation de l'électroencéphalographie (EEG) pour l'obtention de données continue, ainsi que les méthodes employées pour les analyser. Les quatrième et cinquième chapitres abordent respectivement la présentation des résultats et la discussion de ceux-ci selon les quatre volets suivants : la période de grâce, l'évolution de la fatigue cognitive, la relation avec la performance, puis l'agentivité. Le sixième et dernier chapitre conclut ce mémoire avec les limites liées à ce projet et explore les perspectives de recherches futures.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE

1.1 Contexte général

L'apprentissage est un processus cognitif qui mobilise différents types de ressources. Si ces ressources sont mal gérées, cela peut entraîner des pertes « d'énergie cognitive » et, éventuellement, une certaine fatigue. Cette fatigue cognitive a plusieurs conséquences sur la performance (Agrawal *et al.*, 2021 ; Bafna et Hansen, 2021 ; Clayton *et al.*, 2015 ; Herlambang *et al.*, 2019 ; Holm *et al.*, 2009 ; Hopstaken *et al.*, 2015 ; Ishii *et al.*, 2014 ; Käthner *et al.*, 2014 ; Khojasteh Moghani *et al.*, 2021 ; Lorist *et al.*, 2009 ; Randles *et al.*, 2017 ; Tran *et al.*, 2020 ; Tricot *et al.*, 2020) et sur l'apprentissage, notamment une capacité attentionnelle moins grande (Soukup *et al.*, 2019) ainsi qu'une rétention (Khojasteh Moghani *et al.*, 2021) et un transfert (Soukup *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019) des apprentissages moindres. Il est toutefois difficile de gérer la fatigue cognitive chez l'apprenant, la documentation étant encore trop mince. Cela nuit donc à l'apprentissage et entraîne des pertes de temps dans le processus d'apprentissage. Afin d'optimiser l'apprentissage, il est essentiel de pouvoir modéliser et prédire la fatigue cognitive en contexte d'apprentissage.

L'optimisation des apprentissages passe par une meilleure compréhension des mécanismes et facteurs de l'apprentissage, dont la fatigue cognitive fait partie. Il faut considérer plusieurs aspects qui influencent l'apprentissage, dont notamment le milieu (Skuballa *et al.*, 2019 ; Soukup *et al.*, 2019), la charge cognitive (Ishii *et al.*, 2014 ; Skuballa *et al.*, 2019 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019), la motivation (Bafna et Hansen, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Tran *et al.*, 2020), les connaissances antérieures (Skuballa 2019), la fatigue physique et la fatigue cognitive (Bafna et Hansen, 2021 ; Khojasteh Moghani *et al.*, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019 ; Tran *et al.*, 2020). Tel que mentionné plus haut, les conséquences de la fatigue cognitive sur une tâche sont déjà documentées (Bafna et Hansen, 2021 ; Khojasteh Moghani *et al.*, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019 ; Tran *et al.*, 2020). Toutefois, les séries temporelles démontrant l'évolution de la fatigue cognitive dans une tâche sont rares et parfois contradictoires, sans compter qu'aucune de celles-ci n'est en tâche d'apprentissage. En obtenant cette information manquante, il serait alors possible de modéliser l'évolution de la fatigue cognitive en apprentissage. Cette modélisation et meilleure compréhension du phénomène permettrait d'élaborer de nouvelles théories pour l'optimisation de temps et d'énergie cognitive dans ce contexte.

Le domaine de recherche des neurosciences en éducation est un domaine en plein essor. On y étudie principalement l'apprentissage. Les neurosciences et les méthodes de mesure qu'elles préconisent permettent de collecter des données qu'il est impossible d'obtenir autrement. En effet, on y mesure directement des données psychophysiologiques qui renseignent sur les substrats neurologiques des processus cognitifs déployés. Ces données sont complémentaires aux informations obtenues grâce aux recherches en psychologie, entre autres. Il est donc nécessaire de considérer ce domaine de recherche comme étant interdisciplinaire; la neuroscience, l'éducation et la psychologie ont toutes leur rôle à jouer, et les neurosciences interviennent seulement quand les méthodes issues de la psychologie démontrent des limites pour un objectif de recherche donné.

1.2 Contexte spécifique

La caractéristique principale de ce projet est d'aborder et conceptualiser la fatigue cognitive dans une tâche d'apprentissage. Il est encore difficile de conceptualiser cette fatigue, ce qui empêche d'en faire des prédictions fiables. C'est d'autant plus vrai dans les contextes d'apprentissage puisqu'en sciences cognitives, les recherches qui portent sur la fatigue cognitive en tâche d'apprentissage sont encore peu nombreuses. Ce projet vise donc à bonifier les connaissances sur la fatigue cognitive pour ce contexte particulier, ce qui devrait permettre d'optimiser l'utilisation et la gestion des ressources cognitives disponibles.

Tel que mentionné plus haut, la charge cognitive est un aspect central de la fatigue cognitive. Bien que la fatigue cognitive requière davantage de recherches, les connaissances sur la charge cognitive permettent déjà de la conceptualiser de manière assez claire (Ishii *et al.*, 2014 ; Skuballa *et al.*, 2019 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019 ; White, 2011 ; Yang, 2016). De plus, avec l'avancement des neurosciences cognitives, il est possible de mesurer la charge cognitive avec l'électroencéphalographie (EEG), offrant ainsi une mesure indirecte de la fatigue cognitive. Tel qu'il sera présenté plus loin, le lien de la charge cognitive avec la fatigue cognitive est si fort, qu'il est fiable d'utiliser cet indice pour inférer la fatigue cognitive.

Les recherches démontrent que la fatigue cognitive affecte la performance dans une tâche. Elles démontrent d'ailleurs que la fatigue cognitive est liée à une augmentation du temps de réaction, la prise

de décisions simplifiées, et bien sûr des erreurs (Bafna et Hansen, 2021 ; Khojasteh Moghani *et al.*, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Tran *et al.*, 2020). La performance étant liée à la fatigue cognitive, la performance représente alors un indicateur comportemental indirect de la fatigue cognitive. Cela offre alors un indicateur qu'il est possible d'observer même dans un contexte naturel, c'est-à-dire hors laboratoire.

1.3 La fatigue cognitive

Le concept au centre de ce projet de recherche est la fatigue cognitive. De nombreuses recherches effectuées à ce jour ont défini et expliqué ce concept. Ainsi, Bafna et Hansen (2021) proposent une définition de la fatigue cognitive basée sur dix-sept définitions provenant d'autres recherches :

« C'est un sentiment subjectif associé à l'épuisement des ressources cognitives, incluant l'attention et les capacités de traitement des informations, ainsi qu'une diminution de motivation qui se développe avec un effort cognitif soutenu dans le temps et qui a un impact sur la performance. » (traduction libre de Bafna et Hansen, 2021, p.16).

D'après les recherches sur le sujet effectuées dans le cadre de ce projet, cette définition représente fidèlement le phénomène de la fatigue cognitive selon les différentes définitions consultées (Agrawal *et al.*, 2021 ; Bafna et Hansen, 2021 ; Ishii *et al.*, 2014 ; Khojasteh Moghani *et al.*, 2021).

Il est important de distinguer la fatigue cognitive de l'ennui. Alors que la fatigue cognitive survient lorsque la charge cognitive est trop élevée, l'ennui survient plutôt lorsque la charge cognitive est trop basse (Ishii *et al.*, 2014 ; Tran *et al.*, 2020). Bien que les deux phénomènes peuvent entraîner certaines conséquences similaires sur la performance et le comportement, ils sont bel et bien distincts.

D'un autre côté, d'autres auteurs proposent une définition générale de la fatigue qui englobe tous les types de fatigue. Ces auteurs suggèrent que la fatigue est un phénomène où la capacité et l'efficacité sont affaiblies par une trop grande activation physique ou mentale (Ishii *et al.*, 2014 ; Tran *et al.*, 2020). Ici aussi, la fatigue cognitive est distincte de la fatigue physique (celle associée au manque de sommeil) mais ce sont toutes des diminutions en efficacité auxquelles il est possible de remédier avec le repos (Agrawal *et al.*, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019).

Certaines théories proposent que la fatigue cognitive apparaît à la suite de l'épuisement des ressources du métabolisme (par exemple le glucose). Il est toutefois argumenté que le phénomène est plus complexe et que l'ennui et la motivation ont également leur rôle à jouer dans l'équation de la fatigue cognitive (Agrawal *et al.*, 2021).

1.4 Problème

La fatigue cognitive en tant que concept général est un phénomène bien documenté qui a un impact sur la performance dans une tâche, et même sur les gains d'apprentissage (Agrawal *et al.*, 2021 ; Bafna et Hansen, 2021 ; Boksem *et al.*, 2006 ; Chen *et al.*, 2021 ; Khojasteh Moghani *et al.*, 2021 ; Pergher *et al.*, 2021 ; Qin *et al.*, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019 ; Tran *et al.*, 2020). Toutefois, puisque l'étude de la fatigue cognitive implique des mesures psychophysiologiques et que les neurosciences en éducation sont un domaine encore très jeune, il est normal que la documentation sur la fatigue cognitive en contexte d'apprentissage soit encore assez mince. Les informations disponibles portent principalement sur des tâches cognitivement exigeantes, sans que le contexte soit forcément lié à l'apprentissage, par exemple pour du personnel médical (Soukup *et al.*, 2019), des conducteurs (Bafna et Hansen, 2021) , etc. Selon la documentation disponible, il y a plusieurs facteurs qui entrent dans l'équation de la fatigue. Ces facteurs ne sont pas encore nécessairement tous bien compris (comme la motivation), ne sont pas faciles à mesurer ou sont de sources multiples (intrinsèque et extrinsèque). Tel que démontré dans le cadre théorique, la recherche disponible dresse un portrait complexe de la fatigue cognitive, et la modélisation et la prédiction de la fatigue cognitive dans une tâche d'apprentissage ne sont pas encore possibles. De plus, on ne sait pas encore comment évolue la fatigue cognitive dans une tâche d'apprentissage. De surcroît, le caractère plus ou moins actif d'un apprenant peut moduler la charge cognitive, et donc la fatigue cognitive et la performance. Cela fait en sorte qu'il est difficile de considérer la fatigue cognitive correctement dans une tâche d'apprentissage et donc d'optimiser les ressources cognitives et le temps imparti à l'apprentissage. L'objectif de cette étude est donc de mieux comprendre l'évolution de la fatigue cognitive et la relation entre la fatigue cognitive et l'apprentissage.

1.5 Pertinence sociale

Étant donné le manque de recherche en contexte d'apprentissage, il est pertinent de faire davantage de recherches dans ce contexte. Celles-ci pourraient mener à une meilleure gestion du temps consacré à

l'apprentissage, réduisant ainsi les pertes de temps. De plus, en gérant mieux les ressources cognitives de façon à minimiser la fatigue cognitive, plusieurs problèmes de rétention et de transfert des apprentissages attribuables à la fatigue cognitive seraient potentiellement évités (Khojasteh Moghani *et al.*, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019).

1.6 Pertinence scientifique

Ce projet de recherche devrait permettre de mettre en relation plusieurs éléments importants de la fatigue cognitive et de l'observer de manière continue dans le contexte particulier de l'apprentissage. La mise en relation de ces éléments pourrait permettre une meilleure compréhension du lien entre charge cognitive et fatigue cognitive, lien occulté de la théorie de la charge cognitive (Sweller *et al.*, 2019). Elle devrait permettre également de mieux comprendre l'impact méconnu de la fatigue cognitive sur la performance dans une activité d'apprentissage, et le caractère plus ou moins actif d'un apprenant. Tout cela permettrait une meilleure conceptualisation de la fatigue cognitive et une meilleure opérationnalisation du concept.

Le projet se décline en plusieurs volets. Le premier volet vise à explorer la fatigue cognitive, son apparition et son évolution en contexte d'apprentissage. Pour cela, il faudra développer une mesure ou un indicateur indirect de la fatigue cognitive. Le second volet vise à examiner la relation entre la fatigue cognitive et la performance en tâche d'apprentissage. L'évaluation de la performance pendant la tâche, ainsi que l'évaluation continue des indicateurs de fatigue, permettent d'observer cette relation au fil de la tâche de deux heures. Le troisième volet permet de lier la fatigue cognitive et l'apprentissage. Le devis de recherche comprend un prétest et un post-test et permet alors d'observer l'apprentissage à la suite de la période de jeu sérieux. Le quatrième volet explore les liens entre la fatigue cognitive et le caractère plus ou moins actif d'un apprenant. Les différents rôles des participants (joueur ou témoin) assignés au hasard permettront d'étudier la causalité entre ce niveau d'activité et la fatigue cognitive.

1.7 Question générale de la recherche

Dans le cadre de ce projet de recherche, la question générale est la suivante : quelle est la relation dans le temps entre la fatigue cognitive, la performance en tâche d'apprentissage et les gains d'apprentissage?

CHAPITRE 2

CADRE THÉORIQUE

Ce chapitre présentera les concepts pertinents à ce projet de recherche, ainsi que l'état des connaissances les concernant.

2.1 Charge cognitive

Dans la perspective des sciences cognitives, on considère que la fatigue cognitive émerge de l'épuisement des ressources cognitives. Puisqu'elles sont limitées, les ressources cognitives s'épuisent plus ou moins vite dans une tâche d'apprentissage (Soukup *et al.*, 2019 ; Tricot *et al.*, 2020). La vitesse de cet épuisement dépend de l'effort mental investi, lui-même déterminé principalement par la charge cognitive. Il est donc raisonnable de considérer la charge cognitive comme le point de départ de la fatigue cognitive. La charge cognitive est reconnue depuis longtemps comme un des éléments importants à considérer dans l'apprentissage (Gobet *et al.*, 2001 ; Sweller, 1988 ; Thalmann *et al.*, 2019). La théorie de la charge cognitive s'articule autour de l'idée qu'un apprentissage entraîne une charge de traitement de l'information, soit une charge cognitive, et que celle-ci affecte la capacité à traiter de nouvelles informations et à bâtir de nouvelles connaissances dans la mémoire à long terme (Sweller *et al.*, 2019). La charge cognitive représente toutes les activités cognitives qui ont lieu, qu'elles soient nécessaires ou non. Le contexte d'apprentissage est exigeant cognitivement et nécessite une activité cognitive, donc une charge cognitive, afin de mener à bien les apprentissages. Cependant, une charge cognitive trop importante, de même qu'une charge cognitive inutile, est très probable dans ce contexte, et peut être nuisible.

Selon le domaine dans lequel ce phénomène est étudié, la charge cognitive se conceptualise et se modélise de différentes manières. Dans le cadre de ce projet, les conceptions qu'en ont les domaines de l'éducation, de la psychologie et des neurosciences seront détaillées.

2.1.1 Conceptualisation de la charge cognitive dans le domaine de l'éducation

En éducation, le modèle de charge cognitive présente plusieurs types de charges cognitives. D’emblée, on distingue les charges cognitives intrinsèque et extrinsèque, mais certains auteurs en considèrent un troisième type, soit la charge essentielle.

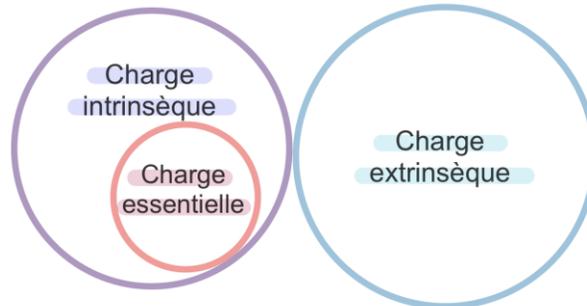


Figure 2.1 Liens entre les types de charges cognitives

Il y a d’abord la charge cognitive intrinsèque (Skuballa *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019) qui comporte les facteurs tels que la complexité intrinsèque de l’information, qui rend plus difficile la perception de celle-ci, ainsi que des considérations propres à la personne sujet, telles que ses connaissances. L’efficacité d’analyse d’une personne sujet est corrélée avec ses connaissances préalables et sa capacité de mémoire de travail. Celle-ci est elle-même un élément clé pour filtrer les informations et ignorer toute information inutile ou superflue (Skuballa *et al.*, 2019).

Il y a aussi la charge cognitive extrinsèque (Skuballa *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019) qui rassemble les facteurs de la tâche elle-même et les facteurs environnementaux (Ishii *et al.*, 2014 ; Soukup *et al.*, 2019). Parmi les facteurs de la tâche figurent la manière dont les informations sont objectivement présentées et les actions requises par la tâche. Du côté des facteurs environnementaux se trouvent la présence de distractions et les caractéristiques de l’environnement (Sweller *et al.*, 2019). La simple présence de ces facteurs impose une charge cognitive additionnelle qui encombre les capacités cognitives, lesquelles sont déjà limitées.

Un troisième type de charge cognitive est évoqué par plusieurs auteurs, soit la charge cognitive essentielle, ou pertinente (White, 2011 ; Yang, 2016). Il s’agit de l’effort mental nécessaire à l’apprentissage. Plusieurs auteurs considèrent cette charge essentielle comme un type de charge au même titre que les charges intrinsèque et extrinsèque dans le modèle de la charge cognitive. Cette idée est toutefois réfutée par des arguments dans les travaux de Kalyuga *et al.* (2011). Du point de vue des sources de charge, il est

argumenté qu'il est impossible de distinguer la charge essentielle de la charge intrinsèque, et que de garder le modèle de la charge cognitive avec ces trois charges introduit une redondance. Les caractéristiques de cette charge intrinsèque essentielle étant les mêmes que celles de la charge intrinsèque, il est donc logique de l'inclure dans cette dernière. La charge essentielle représente la part de la charge cognitive requise pour l'apprentissage, part qui se trouve dans la charge intrinsèque. Kalyuga *et al.* (2011) proposent donc un retour vers le modèle dichotomique de charges intrinsèque et extrinsèque, en considérant la charge essentielle comme une partie de la charge intrinsèque. Le concept connu comme « charge essentielle » serait donc la part de la charge cognitive intrinsèque correspondant aux besoins d'apprentissage. Autrement dit, la charge cognitive peut être intrinsèque ou extrinsèque, puis seule une partie de la charge intrinsèque est essentielle à l'apprentissage, c'est ce qui est désigné par la charge essentielle.

Il serait naïf de croire que toute la charge cognitive doit être réduite le plus possible. Il est véridique qu'une charge cognitive trop importante nuit aux apprentissages et au transfert (Soukup *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019) et qu'il est avantageux de réduire le plus possible la partie non essentielle de la charge cognitive. Toutefois, la partie essentielle de l'apprentissage doit demeurer (Sweller *et al.*, 2019). Il est donc préférable d'optimiser cette charge essentielle afin d'éviter de tomber dans la surcharge.

2.1.2 Conceptualisation de la charge cognitive dans le domaine de la psychologie

Dans le domaine de la psychologie, c'est la mémoire de travail qui importe. La recherche est unanime pour dire que cette dernière est limitée en espace et en temps, c'est-à-dire que la quantité d'information retenue ainsi que la longueur de la période de temps où cette information est contenue en mémoire de travail sont limités (Sweller *et al.*, 2019 ; Tricot *et al.*, 2020). Le « chunking » est un processus cognitif qui permet toutefois d'exécuter des tâches cognitives complexes malgré les limitations de la mémoire de travail. Il consiste à grouper ensemble des items qui partagent plusieurs caractéristiques communes ou similaires à l'intérieur d'une même collection; un tel groupement est appelé « chunk » (Gobet *et al.*, 2001 ; Thalmann *et al.*, 2019). Manipuler plusieurs items dans la mémoire de travail requiert de déployer plus d'énergie cognitive (Tricot *et al.*, 2020). En réduisant ce nombre d'items avec le « chunking », l'énergie nécessaire pour conserver l'information en mémoire de travail est moindre. Ce processus peut être

délibéré, mais peut également se produire naturellement (Gobet et al. 2001). Le « chunking » permet à la fois de libérer la mémoire de travail et de retenir plus d'items.

2.1.3 Conceptualisation de la charge cognitive dans le domaine des neurosciences

Dans le domaine des neurosciences, la charge cognitive est couramment mesurée grâce à l'électroencéphalographie (EEG) (Clayton *et al.*, 2015 ; Holm *et al.*, 2009 ; Käthner *et al.*, 2014). L'électroencéphalographie permet de mesurer l'activité électrique associée à certaines régions cérébrales avec une grande définition temporelle. La charge cognitive est alors considérée comme déterminée par l'information à maintenir et manipuler en mémoire de travail durant une tâche plus ou moins exigeante cognitivement (Skuballa *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019). Elle entraîne une série de processus cognitifs et changements cérébraux qu'il est possible de percevoir grâce au rayonnement électrique de certaines régions cérébrales capté par les électrodes de l'EEG. Plusieurs de ces processus cognitifs et changements se déroulent à l'échelle des millisecondes, entre autres tous les pics positifs et négatifs qu'il est possible d'observer grâce au potentiel évoqué, ou *event related potential* (ERP). Plusieurs recherches se sont attardées au phénomène de la charge cognitive. Elles ont relevé des corrélations entre certaines mesures issues de l'EEG et des tâches cognitivement exigeantes. Ces observations se sont concrétisées à travers des indicateurs de la charge cognitive validés empiriquement au fil des recherches.

2.2 Fatigue cognitive

La fatigue cognitive, bien qu'elle soit bien distincte de la charge cognitive, possède un lien important avec celle-ci. Tel qu'explicité ci-dessus, la charge cognitive désigne l'activité mentale qu'une tâche, et tous les facteurs de la tâche ou propres à la personne, entraîne. La fatigue cognitive, telle qu'elle sera présentée dans cette section, désigne pour sa part l'épuisement des ressources cognitives et métaboliques d'une personne entraîné entre autres par une charge cognitive continue sur une période prolongée. La charge cognitive n'est pas la seule cause ni le seul indicateur de la fatigue cognitive, mais elle représente un élément important et central dans l'étude et l'évolution de la fatigue cognitive. Un peu plus loin sera déclinée la manière dont la charge cognitive permet d'inférer une mesure de fatigue cognitive.

2.2.1 Définition

La fatigue cognitive, aussi parfois appelée « fatigue mentale », est un phénomène cognitif associé à une sensation subjective et à toutes sortes de manifestations objectives, physiologiques et psychophysiologiques, consécutif à un effort cognitif soutenu (Bafna et Hansen, 2021). Cette fatigue reflète l'épuisement des ressources cognitives ainsi que diverses conséquences sur la motivation, l'attention et les capacités de traitement de l'information. Il en résulte souvent un impact négatif sur la performance de la tâche. La vitesse d'apparition de la fatigue cognitive dépend donc de la vitesse d'épuisement des ressources cognitives. La charge cognitive (caractéristiques de la tâche, l'environnement, la motivation), l'état physique de la personne (sommeil, nutrition), la durée de la tâche, la présence ou non de pauses et la qualité de celles-ci ont chacun leur rôle à jouer sur l'apparition de la fatigue cognitive (Agrawal *et al.*, 2021 ; Castro-Alonso *et al.*, 2021 ; Chen *et al.*, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019).

2.2.2 La période de grâce

Plusieurs recherches soulignent que l'évolution de la fatigue cognitive ne se fait pas dès le début de la tâche (Herlambang *et al.*, 2019 ; Lorist *et al.*, 2009 ; Randles *et al.*, 2017). Entre autres, Lorist (2009) mentionne que, dans sa recherche, la mesure du temps de réaction était constante pour les 20 premières minutes, puis Randles (2017) remarque une baisse soudaine de performance au bout de 50 minutes à la tâche. Cette période en début de tâche, appelée ici « période de grâce », est la période où la fatigue cognitive est encore assez basse pour que les conséquences de celles-ci n'aient pas de répercussions mesurables. Selon la tâche cognitive, il semble plausible que la longueur de cette période de grâce puisse varier.

2.2.3 Manifestations

La fatigue cognitive se manifeste de nombreuses manières. Elle peut être classée selon quatre volets: subjective, comportementale, physiologique et psychophysiologique (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Tableau 2.1 Catégories et manifestations de la fatigue cognitive selon les auteurs : conséquences et indicateurs

Manifestations	Physiologiques	Psychophysiologiques	Comportementales	Subjectives
Bafna et al. , 2021	Saccades	Mémoire de travail	Temps de réaction**	
Ishii et al. , 2014	Débit sanguin cérébral au repos (IRMf)		Performance**	
	Diminution de l'énergie du métabolisme		Temps de réaction**	
			Taux d'erreur**	
Tran et al. , 2020		Augmentation thêta *	Performance**	
		Augmentation alpha*	Temps de réaction**	
Skuballa et al. , 2019				Fatigue cognitive
Khojasteh Moghani et al. , 2021			Performance**	Fatigue cognitive
			Décisions simplifiées**	
			Rétention de l'apprentissage**	
Randles et al. , 2017			Performance**	Motivation
Agrawal et al. , 2021			Performance**	
Qin et al. , 2021	Taux de clignement des yeux			
	Diamètre de la pupille			
	Variation cardiaque (HRV)			
Lorist et al. , 2009		Synchronisation globale des bandes thêta lorsque la demande de contrôle cognitif augmente*	Temps de réaction**	
		Synchronisation locale pariétale dans la bande thêta avec l'augmentation de la difficulté de la tâche*	Performance**	
Herlambang et al. , 2019	Variation cardiaque (HRV)		Temps de réaction**	Fatigue cognitive
	Diamètre de la pupille		Performance**	
	Fréquence et durée de distraction visuelle**			

Manifestations	Physiologiques	Psychophysiologiques	Comportementales	Subjectives
	Fréquence et durée de clignement des yeux** Fréquence et amplitude des saccades**			
Hopstaken et al. , 2014	Diamètre de la pupille "Baseline" du diamètre de la pupille		Performance** Temps de réaction**	
Tricot et al. , 2020	Potentiel évoqué ou <i>Event Related Potential</i> (ERP)(P300)*		Performance** Temps de réaction**	Fatigue cognitive
Soukup et al. , 2019		Autorégulation** Mémoire de travail**	Diminution de l'attention** Décisions simplifiées**	
Chen et al. , 2021		Mémoire de travail**		
Sweller et al. , 2019		Mémoire de travail**		
Holm et al. , 2009		Augmentation thêta (frontal)* Diminution alpha (pariétal)* Demande prolongée des fonctions exécutives affecte la cohérence dans les bandes alpha et thêta *	Performance**	
	ERP(P300)*			
Clayton et al. , 2015		Augmentation fm- thêta (tâche à attention soutenue)*	Taux d'erreur**	
Käthner et al. , 2014		EEG/variations dans les bandes de fréquences*	Temps de réaction** Performance**	Fatigue cognitive
	ERP(P300)*			

* Indicateurs

** Conséquences

2.2.3.1 Manifestations subjectives

Au plan subjectif, la fatigue cognitive peut entraîner un déséquilibre effort-récompense important, certains ressentiront alors diverses émotions négatives qui les mèneront vers une aversion de la tâche et une baisse de motivation (Randles *et al.*, 2017). La motivation, qu'elle soit intrinsèque ou créée par des incitatifs (Herlambang *et al.*, 2019 ; Hopstaken *et al.*, 2015 ; Lorist *et al.*, 2009), peut aider à poursuivre la tâche, mais seulement jusqu'à un certain point. Des études (Herlambang *et al.*, 2019 ; Hopstaken *et al.*, 2015 ; Lorist *et al.*, 2009) démontrent que l'introduction d'un motivateur (souvent de l'argent) entraîne une importante variation d'engagement et de performance.

2.2.3.2 Manifestations comportementales

L'épuisement des ressources entraîne et favorise des comportements demandant moins d'efforts (Soukup *et al.*, 2019). Elle entraîne notamment un ralentissement de la vitesse de réaction (Bafna et Hansen, 2021 ; Tran *et al.*, 2020); un plus grand effort de collecte et d'analyse de données sensorielles (Tran *et al.*, 2020); une diminution de la capacité attentionnelle (Soukup *et al.*, 2019); une rétention de l'apprentissage moindre (Khojasteh Moghani *et al.*, 2021); des décisions simplifiées, basées surtout sur des informations sensorielles, traitées de manières moins analytiques (Khojasteh Moghani *et al.*, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019).

2.2.3.3 Manifestations physiologiques

Les ressources du métabolisme sont limitées et s'épuisent au fil de la tâche (Ishii *et al.*, 2014). L'apparition de la fatigue cognitive emporte son lot de manifestations, dont plusieurs sont physiologiques. Parmi celles-ci, se retrouvent : les saccades oculaires (Bafna et Hansen, 2021 ; Herlambang *et al.*, 2019), le débit sanguin cérébral au repos (IRMf) (Ishii *et al.*, 2014), la diminution de l'énergie du métabolisme (Ishii *et al.*, 2014), le taux et la durée de clignement des yeux (Herlambang *et al.*, 2019 ; Qin *et al.*, 2021), le diamètre de la pupille (Herlambang *et al.*, 2019 ; Hopstaken *et al.*, 2015 ; Qin *et al.*, 2021), la variation du rythme cardiaque (Herlambang *et al.*, 2019 ; Qin *et al.*, 2021), la fréquence et la durée de distraction visuelle (Herlambang *et al.*, 2019), le P300 (obtenu par ERP) (Holm *et al.*, 2009 ; Käthner *et al.*, 2014 ; Tricot *et al.*, 2020).

2.2.3.4 Manifestations psychophysiologiques

Les ressources d'autorégulation (Soukup *et al.*, 2019) et de mémoire de travail (Bafna et Hansen, 2021 ; Chen *et al.*, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019) sont limitées et s'épuisent au fil de la tâche. Ces ressources sont celles qui permettent de performer dans la tâche. Avec l'épuisement des ressources cognitives et des ressources du métabolisme, la fatigue cognitive s'installe et la performance à la tâche s'amointrit (Boksem *et al.*, 2006).

Physiologique :		
-Épuisement des ressources du métabolisme		
-Augmentation du taux de clignement des yeux		
-Variation du diamètre des pupilles		
-Variations Cardiaques		
-Fréquence et durée des distractions visuelles et des clignements d'yeux		
-Fréquences et durée des saccades oculaires		
-Variations au niveau du P300 (ERP)		
	Psychophysiologique	
	-Épuisement de l'autorégulation	
	-Épuisement de la mémoire de travail	
	-Variations dans l'amplitude des bandes alpha et thêta	
	-Synchronisation globale de thêta lorsque la demande de contrôle cognitive augmente	
	-Synchronisation locale pariétale de la bande thêta avec l'augmentation de la difficulté de la tâche	
	-Changements dans la cohérence des bandes alpha et thêta	
		Comportementales :
		-Ralentissement de la vitesse de réaction
		-Décisions simplifiées
		-Diminution de la performance
		-Augmentation du taux d'erreur
		-Changements dans la rétention de l'apprentissage

Figure 2.2 Manifestations objectives de la fatigue cognitive

2.2.4 Ennui

Il est également intéressant de souligner la distinction entre la fatigue cognitive et l'ennui (Agrawal *et al.*, 2021 ; Bafna et Hansen, 2021); les deux ont un impact sur la performance, ce qui entraîne souvent une confusion entre les deux concepts. La fatigue cognitive est entraînée par une trop grande demande cognitive, tandis que l'ennui est entraîné par une trop petite demande (Bafna et Hansen, 2021). Cependant, il n'est pas possible d'avoir la certitude que cette distinction a été considérée dans toute la littérature. Peu d'auteurs mentionnent explicitement la distinction entre les deux phénomènes, une confusion aurait bien pu être présente dans les recherches considérant la similitude des manifestations de ces deux phénomènes. Il est aussi pertinent de noter que le cycle circadien a un impact sur la performance, et donc que la performance pourrait différer selon le moment de la journée (Randles *et al.*, 2017). D'après les recherches effectuées dans le cadre de ce projet, la littérature ne semble toutefois pas traiter du lien entre le cycle circadien et la fatigue cognitive.

2.2.5 Indicateurs et mesures

Afin de mesurer la fatigue cognitive, plusieurs indicateurs physiologiques et psychophysiologiques peuvent être utilisés. Le tableau 2.1 présenté plus haut mentionne également ces indicateurs. Les principaux indicateurs relevés dans la littérature consultée sont présentés dans les sous-sections suivantes; les comportements oculaires et la pupillométrie (Bafna et Hansen, 2021), certains comportements cardiaques (Herlambang *et al.*, 2019 ; Qin *et al.*, 2021 ; Tricot *et al.*, 2020) et certains aspects du fonctionnement cérébral appréhendés à travers le rayonnement électrique de grands groupes de neurones (ondes cérébrales thêta et alpha) (Clayton *et al.*, 2015 ; Holm *et al.*, 2009 ; Käthner *et al.*, 2014 ; Lorist *et al.*, 2009 ; Tran *et al.*, 2020).

2.2.5.1 Comportements oculaires

Plusieurs recherches démontrent une corrélation entre la fatigue cognitive et divers comportements oculaires et aspects de la pupillométrie : la fréquence et l'amplitude de saccades (Bafna et Hansen, 2021 ; Herlambang *et al.*, 2019); le taux (Herlambang *et al.*, 2019 ; Qin *et al.*, 2021) et la durée (Herlambang *et al.*, 2019) de clignement d'yeux; le diamètre de la pupille (Herlambang *et al.*, 2019 ; Hopstaken *et al.*, 2015 ; Qin *et al.*, 2021); la fréquence et la durée des distractions visuelles (Herlambang *et al.*, 2019). Dans les travaux de Herlambang *et al.* (2019), de nombreuses séries temporelles de plusieurs indicateurs sont

présentées pour une seule et même tâche, permettant alors de relever des relations de plusieurs comportements oculaires avec une tâche cognitive et la fatigue cognitive. En ce qui concerne les mouvements oculaires et la pupillométrie, la recherche considère la bande de fréquences moyenne de la variation cardiaque comme indicateur subjectif de l'effort mental. Il utilise aussi le diamètre de la pupille afin d'inférer la charge de travail, puis les saccades des yeux pour le désengagement.

2.2.5.2 Comportements cardiaques

La variation du rythme cardiaque, aussi appelée HRV pour « heart rate variability » est une mesure très couramment utilisée dans les recherches sur la fatigue cognitive (Herlambang *et al.*, 2019 ; Qin *et al.*, 2021). Dans ses travaux, Herlambang (2019) démontre que la variation du rythme cardiaque permet d'observer le système nerveux autonome, ce qui permet de suivre l'évolution de l'état physiologique des participants.

2.2.5.3 Rayonnement électrique lié à certains aspects du fonctionnement cérébral

En neurosciences, l'électroencéphalographie (EEG) est souvent utilisée dans la recherche sur la fatigue cognitive. L'électroencéphalographie permet plusieurs mesures liées à certains aspects du fonctionnement cérébral. Le signal EEG est généralement séparé en cinq bandes sur le spectre de fréquences : delta (1-3 Hz), thêta (4-7 Hz), alpha (8-12 Hz), beta (13-23) et gamma (24-35 Hz) (Käthner *et al.*, 2014 ; Lorist *et al.*, 2009). La fatigue en elle-même ne peut pas être directement mesurée, mais plusieurs auteurs ont identifié des variations dans les bandes de fréquence alpha et thêta associées avec la fatigue cognitive et ses variations (Clayton, Holm, Käthner, Tran). L'indice de Holm (2009) est l'une des mesures les plus validées. Cet indice utilise les électrodes Fz et Pz (deux électrodes placées sur le dessus de la tête, alignées avec le nez, voir Figure 2.3) de l'EEG, dont le signal est utilisé pour établir la fréquence dans les bandes thêta et alpha respectivement, ainsi que les mesures des bandes de fréquences thêta et alpha. Le calcul de l'indice de Holm se décline comme suit : (puissance de la bande thêta à Fz) / (puissance de la bande alpha à Pz) (Holm *et al.*, 2009). Cet indice permet d'inférer la charge cognitive, permettant par la suite d'inférer la fatigue, grâce à l'aire sous la courbe de l'activité totale cumulée jusqu'à un certain point, puisque ces deux concepts sont intimement reliés.

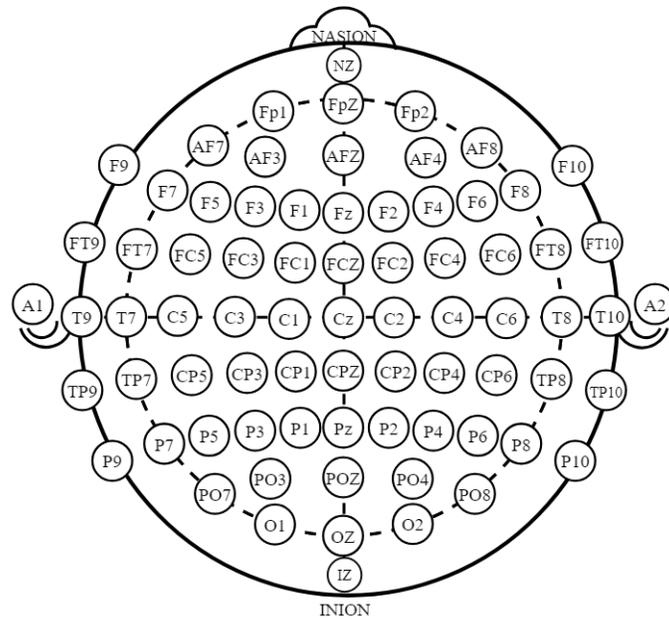


Figure 2.3 Topographie standard du placement des électrodes

Certains processus cognitifs au niveau des bandes de fréquences et des zones topographiques sont liés à d'autres indicateurs et manifestations de la fatigue cognitive. Entre autres, les travaux de Holm (2009) indiquent que lorsque la tâche est longue ou exigeante, il y a diminution dans l'activité pariétale alpha et une augmentation d'activité frontale dans la bande thêta. De plus, ces travaux indiquent également que lorsque la demande au niveau des fonctions exécutives est importante, une cohérence des ondes dans les bandes alpha et thêta au niveau frontopariétal est observée.

Pour Clayton (2015), la puissance de la bande alpha dans les régions postérieures du scalp reflète la diminution de l'attention. Lorsque la puissance dans la bande de fréquences alpha est moyennée sur l'entièreté du scalp, elle représente alors l'augmentation de l'attention. En ce qui concerne la bande thêta, sa puissance au frontomédial est liée à la fatigue attentionnelle et à la performance dans des tâches demandant une attention soutenue. Par ailleurs, l'augmentation de la bande thêta frontomédial (fm- thêta) est liée à une augmentation du taux d'erreur et à une augmentation du temps de réaction. Il jouerait toutefois un rôle important dans le contrôle de l'attention.

Käthner (2014) explore plusieurs niveaux de charge de travail. Avec les conditions qui ont les plus hauts niveaux de charge de travail, les puissances des bandes alpha à Pz et de thêta à Fz sont plus grandes.

Käthner a observé une corrélation linéaire positive entre le temps à la tâche et la puissance d'alpha à Pz au deuxième niveau des conditions expérimentales, soit une condition dont la demande cognitive était la seconde moins grande de celles de la recherche (la condition 1 étant « screening only »). La puissance de la bande thêta dans la région frontale (f-thêta) augmente avec la charge de travail et la quantité d'information codifiée. Käthner mentionne également l'hypothèse de Sauseng (2010) stipulant que la bande de puissance thêta pourrait jouer un rôle dans la coordination des processus de plusieurs régions cérébrales impliquées dans la mémoire de travail. Käthner teste également l'hypothèse de Palva et Palva (2007) proposant que les oscillations alpha en lien avec la mémoire de travail représentent le traitement effectué dans la région frontopariétale impliquée dans le maintien de la représentation des items mémorisés. C'est une proposition supportée par les résultats de Käthner (2014) grâce à la corrélation positive entre la bande alpha et la charge de mémoire de travail. Il est intéressant de noter que la tâche utilisée dans cette étude pour induire la charge cognitive est de nature auditive.

Le tableau suivant (Tableau 2.2) présente les mesures validées de la charge cognitive au moyen de l'EEG, dans des circonstances proches de celles de la présente étude, c'est-à-dire dans une tâche cognitivement exigeante. Pour chacun de ces auteurs, les mesures présentées ont été observées dans le cadre de tâches conçues pour entraîner divers niveaux de charge cognitive sur une période de temps plutôt longue. Ces recherches croisent donc les divers niveaux de charge cognitive induite avec d'autres mesures validées, entre autres le P300, afin d'observer les comportements dans les bandes de fréquences. Les mêmes résultats se répètent de recherche en recherche, c'est qui permet de solidifier la validité des mesures.

Tableau 2.2 Mesures validées de la charge cognitive

Auteurs	Alpha (8-12 Hz)		Thêta (4-8 Hz)	
	Site et transformation	Condition de validation expérimentale	Site et transformation	Condition de validation expérimentale
Holm et al., 2008	Diminution de l'activité pariétale alpha	Attention soutenue, demandes cognitives grandissantes	Augmentation de l'activité frontale thêta	Attention soutenue, demandes cognitives grandissantes
	Cohérence dans les bandes alpha et thêta dans la région frontopariétal	Demande intensive des fonctions exécutives	Cohérence dans les bandes alpha et thêta dans la région frontopariétal (p.640)	Demande extensive des fonctions exécutives
Clayton et al., 2015	Puissance alpha dans les régions postérieures reflète la diminution de l'attention	Tâche attention soutenue	Fm- thêta est liée avec la fatigue attentionnelle et l'augmentation de la performance	Tâche attention soutenue
	Puissance alpha moyennée sur l'entièreté du scalp, reflète l'augmentation de l'attention		Augmentation de fm- thêta, augmentation taux d'erreur, augmentation temps de réaction	Tâche attention soutenue
Käthner et al., 2014	Puissance significativement plus haute de manière répandue, mais surtout dans les régions pariétales et pariéto-occipitales	Moyenne et grande charge de travail	Électrodes frontales et fronto-centrales uniquement	Grande charge de travail
	Augmentation significative à CPz, Pz, P1	Condition de grande charge de travail, prétest-post-test	Augmentation significative de l'activité à Fz, FC5, FC6, C5, CP5, P3, O1, O2, PO8	Condition de grande charge de travail, prétest-post-test

Auteurs	Alpha (8-12 Hz)		Thêta (4-8 Hz)	
	Site et transformation	Condition de validation expérimentale	Site et transformation	Condition de validation expérimentale
	Augmentation générale de l'activité, N.S. Augmentation significative à Pz, P2, CPz	Condition de charge de travail moyenne, prétest-post-test	Augmentation significative de l'activité à C5	Condition de charge de travail moyenne, prétest-post-test
	Augmentation significative à Pz	Comparaison entre les conditions de charge de travail faible (screening) et moyenne/grande	Augmentation significative à Fz Augmentation de l'activité de thêta dans la région frontale avec l'augmentation de la charge de travail Augmentation de l'activité de thêta dans la région frontale avec l'augmentation de la quantité d'information encodée	Comparaison entre les conditions de charge de travail faible (screening) et moyenne/grande
Tran et al. , 2020	Puissance alpha modérément augmentée	Évolution de la fatigue cognitive	Puissance thêta grandement augmentée	Évolution de la fatigue cognitive

Le potentiel évoqué, aussi connu sous le nom de « event-related potential » (ERP) en anglais, est une technique qui permet de mesurer, entre autres, l'amplitude du P300 dans les régions frontales et pariétales. Selon des recherches, il serait associé à une réduction des ressources attentionnelles (Tricot *et al.*, 2020). Certaines recherches associent également le P300 à la mesure de la charge cognitive (Holm *et al.*, 2009 ; Tricot *et al.*, 2020). Cette mesure implique une utilisation différente des données de l'EEG et ne s'applique pas dans le cadre de ce projet puisque le paradigme est complètement autre.

2.2.6 Éléments permettant de contrer la fatigue cognitive

La fatigue cognitive se développe au fil d'une tâche cognitive prolongée. Toutefois, certains éléments permettent de contrer les effets de la fatigue cognitive. L'alimentation, surtout le sucre, et l'hydratation (Soukup *et al.*, 2019) sont tous deux des moyens de restaurer les ressources du métabolisme et permettent donc de combattre la fatigue cognitive et ses effets. De plus, de courtes pauses, le sommeil, ainsi que toute autre activité qui s'éloigne de la tâche (Agrawal *et al.*, 2021 ; Castro-Alonso *et al.*, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019) permettent de consolider les apprentissages et libérer la mémoire de travail en transférant vers la mémoire à long terme certains aspects de l'apprentissage et en facilitant l'automatisation de certains aspects de la tâche. Ces pauses donnent également la chance aux ressources cognitives de se restaurer.

Il existe également différentes méthodes pour répartir un apprentissage dans le temps afin de maximiser l'apprentissage et minimiser la fatigue cognitive, entre autres la méthode d'espacement et la méthode d'entrelacement (Chen *et al.*, 2021). La première méthode consiste à espacer les différentes parties de l'apprentissage par des pauses, alors que la seconde préconise que chacune des parties de l'apprentissage soit séparée par des parties d'un apprentissage différent.

Dans le contexte de cette recherche, les participants n'ont eu aucune pause au cours de la tâche. Même divisée en tableaux, il s'agissait d'une tâche unique; il n'y a donc aucun effet d'espacement ou d'entrelacement. Il est alors possible d'affirmer que les participants n'ont été exposés à aucun élément permettant de réduire, ralentir ou contrer l'apparition et les conséquences de la fatigue cognitive. Il est supposé que l'épuisement des ressources cognitives se fera de manière continue.

2.3 Performance

La performance est un indicateur intéressant du fait de sa nature comportementale. La fatigue cognitive est très souvent mesurée par le biais de la performance à la tâche et plusieurs recherches démontrent qu'il existe effectivement un lien entre ces deux éléments (voir Tableau 2.1). Outre la performance et le taux d'erreur, plusieurs études utilisent le temps de réaction comme indicateur connexe à la performance (Bafna et Hansen, 2021 ; Herlambang *et al.*, 2019 ; Hopstaken *et al.*, 2015 ; Ishii *et al.*, 2014 ; Käthner *et al.*, 2014 ; Lorist *et al.*, 2009 ; Tran *et al.*, 2020 ; Tricot *et al.*, 2020). Dans le contexte de ce projet, la performance fait référence à la performance à la tâche et est mesurée par le temps pris (temps par tableau). La performance à la tâche, étant un préalable à l'apprentissage, elle est considérée comme un élément déterminant.

2.3.1 Apprentissage

Il semble pertinent d'apporter ici une clarification concernant les concepts de performance et d'apprentissage. Tel que mentionné ci-dessus, la performance fait référence à la tâche d'apprentissage, c'est-à-dire les deux heures du jeu sérieux Mécanika. L'apprentissage peut être décrit de diverses manières selon les projets et les disciplines. Dans le cadre de ce projet, ce terme sera utilisé pour décrire les changements conceptuels entraînant un changement de mauvaise vers bonne réponse entre le prétest et le post-test. Simplement, la performance fait référence à la tâche et l'apprentissage fait référence à la transition prétest et post-test.

2.3.2 Motivation

Un autre facteur important dans la performance est la motivation. Tel que mentionné au point 2.3.3.1 Manifestations subjectives, plusieurs travaux soulignent ce lien entre la motivation et la performance (Bafna et Hansen, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Tran *et al.*, 2020). Ces travaux mentionnent de la théorie du coût et des bénéfices (« cost-benefit theory »). Celle-ci stipule que lorsque la charge cognitive dépasse les bénéfices perçus et anticipés, la motivation baisse, la fatigue se fait ressentir et la performance se dégrade (Bafna et Hansen, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Tran *et al.*, 2020). En augmentant, au moyen d'un incitatif, les bénéfices au-delà des coûts perçus, les conséquences de la fatigue cognitive sur la performance sont amoindries, même lorsque la fatigue est déjà installée (Boksem *et al.*, 2006). Toutefois, aucun incitatif en ce sens ne sera utilisé dans le cadre du présent projet.

2.4 Agentivité

L'agentivité désigne l'idée d'être un agent actif dans une tâche, avec des possibilités d'influencer volontairement le cours de cette dernière. C'est un concept très exploré dans les recherches sur l'apprentissage et dans le domaine de l'éducation (Araos Moya et Damşa, 2023 ; Bandura, 2001 ; Damşa *et al.*, 2010 ; Deschênes et Laferrière, 2019 ; Evans et Carré, 2023 ; Mercier *et al.*, 2020b ; Snow *et al.*, 2015 ; Tali, 2020 ; Zienkowski et Lambotte, 2023). Plusieurs définitions et descriptions de l'agentivité sont faites dans la documentation. Les travaux de Bandura (2001) sur la théorie sociale cognitive de l'apprentissage et l'agentivité sont encore à ce jour beaucoup cités (Damşa *et al.*, 2010 ; Deschênes et Laferrière, 2019 ; Tali, 2020). Ils servent entre autres de référence en ce qui concerne les caractéristiques fondamentales de l'agentivité humaine : l'intentionnalité, l'anticipation, l'autorégulation, et l'autoréflexion (Bandura, 2001). Dans son ensemble, la documentation consultée semble être unanime sur le caractère conscient et intentionnel de l'agentivité, et sur les efforts et actions prises envers un objectif précis visé par l'agent (Bandura, 2001 ; Damşa *et al.*, 2010 ; Deschênes et Laferrière, 2019 ; Snow *et al.*, 2015 ; Tali, 2020).

2.4.1 Choix

Les travaux de Snow et al. (2015) démontrent que la manière dont les choix sont faits dans une tâche d'apprentissage est plus importante que les choix en eux-mêmes. Dans une tâche d'apprentissage d'une durée de deux heures dans un jeu sérieux, leurs travaux démontrent que le fait d'évoluer dans la tâche de manière organisée est plus bénéfique à la performance que d'évoluer de manière désorganisée. Toutefois, lorsque la manière d'évoluer (organisée ou désorganisée) est imposée, l'avantage que pose le cheminement organisé sur le cheminement désorganisé disparaît. Des caractéristiques personnelles peuvent évidemment affecter les différents joueurs dans leur capacité à s'organiser dans des situations moins balisées. Néanmoins, les résultats de Snow et al. (2015) sont significatifs et laissent entendre que l'agentivité joue un rôle important dans l'apprentissage. Étant donné la nature de l'agentivité qui veut que celle-ci émerge du caractère intentionnel et actif de l'agent, il est évident qu'un choix est une forme de manifestation de l'agentivité.

2.4.2 Aspects de l'agentivité

Dans le cadre de ce projet, les participants sont jumelés en dyades composées d'un joueur actif et d'un témoin. Le témoin ne peut ni interagir avec le jeu, ni avec le joueur. D'après les définitions de l'agentivité, les présents participants formant la dyade feraient donc preuve d'un niveau d'agentivité très contrasté. Seul le joueur a accès aux contrôles du jeu et lui seul peut effectuer des actions. L'agentivité et la pose

d'actions sont d'ailleurs assez rapprochées dans la littérature; une grande partie des auteurs considèrent la prise d'action comme constituante de l'agentivité (Damşa *et al.*, 2010 ; Deschênes et Laferrière, 2019 ; Tali, 2020). Cette agentivité doit être prise en compte puisqu'elle peut affecter le degré d'apprentissage (Mercier *et al.*, 2020a, 2020b ; Snow *et al.*, 2015).

Tel que mentionné, le joueur a la responsabilité de solutionner les niveaux du jeu Mécanika en appliquant les principes de physique newtonienne ciblés. Il est raisonnable de penser que le joueur apprend plus que le témoin. Toutefois, Mercier *et al.* présentent des résultats surprenants sur l'agentivité dans une tâche d'apprentissage dans ce jeu (Mercier *et al.*, 2020b, 2020a). En effet, l'article présente le résultat inattendu où le participant témoin de la dyade apprend plus que le participant joueur. Cette différence entre les joueurs et les témoins dans l'apprentissage n'a pas été reflétée dans l'analyse de mesures de charge cognitive et d'engagement cognitif (Mercier *et al.*, 2020a). Ce résultat demeure inexplicé et n'a pas encore été répliqué, cela étant entre autres dû à la complexité du devis requis. Cependant, il est concevable que la fatigue cognitive soit en cause. Il est raisonnable de supposer que le participant témoin subit moins de fatigue cognitive que le participant joueur, et que ce soit cette fatigue cognitive moins intense qui permette un meilleur apprentissage. Comme ces résultats proviennent de la même collecte de données que celle utilisée pour ce projet, ils seront mis en relation avec les résultats du présent projet afin de voir si des liens peuvent être relevés.

Les résultats de Mercier (2020) peuvent sembler aller à l'encontre des résultats de Snow (2015). Bien que plusieurs similitudes puissent être relevées entre les conditions expérimentales des deux recherches, les tâches d'apprentissage en elles-mêmes sont différentes. L'agentivité en tâche d'apprentissage, tel qu'entendu dans les travaux de Snow (2015), est plus marquée que dans la tâche de Mercier (2020) et donc, par le même fait, que dans la présente étude étant donné que les données utilisées sont les mêmes. La tâche d'apprentissage de Snow (2015) requiert que le participant exécute encore plus de choix; en plus d'apprendre, il doit choisir le cheminement par lequel il passe pour apprendre. Dans la présente étude, les tableaux du jeu Mécanika se suivent de manière logique et prédéfinie, et les joueurs font preuve d'agentivité dans la manière de résoudre les niveaux. Les conditions expérimentales sont assez différentes; ces résultats inattendus n'infirmement en aucun cas la théorie de l'agentivité établie.

En contexte d'apprentissage, l'agentivité consiste essentiellement à mettre l'apprenant en contrôle de son activité. Ce contrôle pourrait entraîner une charge cognitive intrinsèque non essentielle supplémentaire

au participant joueur, modulant ainsi les gains d'apprentissages. Cette surcharge de la charge cognitive pourrait accélérer la fatigue cognitive, et donc amoindrir l'apprentissage.

2.5 Questions spécifiques et hypothèses

À la lumière de la littérature scientifique consultée, l'hypothèse suivante émerge : une période « de grâce » sera présente au début de l'évolution de la fatigue cognitive. Cette période de grâce est d'une durée relativement courte au cours de laquelle la performance et les capacités cognitives ne sont pas affectées par la fatigue cognitive.

Les travaux sur la fatigue cognitive permettent d'émettre l'hypothèse qu'à la suite de cette période de grâce, la fatigue cognitive progressera constamment au fil d'une tâche d'apprentissage où aucun moment ne permet à l'apprenant de « recharger » ses ressources cognitives et aucun incitatif en ce sens n'est présenté. Afin de vérifier cette hypothèse, la forme ou la fonction que prendra cette courbe d'évolution de la fatigue cognitive sera observée et analysée.

Les recherches démontrent qu'il existe effectivement un lien entre la fatigue cognitive et la performance. C'est aussi le cas dans les contextes plus spécifiques de travail (infirmières/médecins, chauffeurs de camion) (Qin *et al.*, 2021 ; White, 2011) et de tâche cognitive exigeante (Herlambang *et al.*, 2019 ; Hopstaken *et al.*, 2015 ; Käthner *et al.*, 2014 ; Lorist *et al.*, 2009 ; Randles *et al.*, 2017 ; Skuballa *et al.*, 2019). La nature cognitivement exigeante de l'apprentissage permet d'émettre l'hypothèse que ce lien existera également dans un contexte d'apprentissage; la performance, représentée par le temps requis pour compléter un tableau, suivra l'avancement de la fatigue cognitive accumulée. Considérant ces éléments, le questionnement suivant émerge : la fatigue accumulée présentera-t-elle une corrélation avec la transition vers une bonne réponse entre le prétest et le post-test?

Des analyses antérieures ont permis d'observer un lien entre une faible agentivité et un meilleur apprentissage. Elles ont également permis de déceler une propension plus grande des non-joueurs à transitionner d'une mauvaise réponse à la bonne réponse entre le prétest et le post-test, par rapport aux joueurs (Mercier *et al.*, 2020a). La charge cognitive moyenne et l'engagement des joueurs et des non-joueurs ne diffèrent pas durant la tâche d'apprentissage (Mercier *et al.*, 2020a). Ce lien sera précisé dans la présente étude par l'examen de la relation entre la fatigue cognitive, l'agentivité et l'apprentissage. À la lumière des résultats précédents, l'hypothèse que la fatigue cognitive variera selon l'agentivité du

participant et que le joueur se fatiguera plus que le témoin émerge. Il est également possible d'hypothétiser que la fatigue cognitive se manifeste différemment chez le joueur et le non-joueur, entraînant des différences au niveau des courbes de l'évolution de la fatigue cognitive. Ces différences se manifesteront vraisemblablement par un retard de l'apparition de la fatigue cognitive chez le témoin, ainsi qu'un ralentissement de l'évolution de celle-ci.

Pour la période de grâce

Hypothèse :

En début de tâche, une période de grâce, où les conséquences de la fatigue cognitive ne sont pas encore présentes, sera observée.

Question :

Si une telle période est observée, quelle est la longueur de la période de grâce?

Pour l'évolution de la fatigue :

Hypothèse :

Après la période de grâce, la courbe de fatigue cognitive sera généralement ascendante.

Question :

Quelle forme prendra la courbe de la série temporelle de la fatigue cognitive sur deux heures en tâche d'apprentissage?

Pour les relations entre fatigue cognitive, performance et apprentissage

Question :

Existe-t-il une relation entre la fatigue cognitive accumulée et les gains d'apprentissage?

Hypothèse :

Le temps requis pour compléter un tableau, soit un aspect de la performance, sera plus long en lien avec l'augmentation de la fatigue cognitive accumulée.

Pour l'agentivité

Hypothèses :

La quantité de fatigue cognitive variera selon l'agentivité du participant; le joueur se fatiguera plus que le témoin.

La durée de la période de grâce en début de tâche variera selon l'agentivité du participant; le joueur se fatiguera plus que le témoin, donc la période de grâce de celui-ci sera plus courte.

CHAPITRE 3

MÉTHODE

Ce chapitre présente les aspects techniques de la méthode utilisée dans le cadre de cette recherche. L'échantillon, la tâche ainsi que les mesures et outils employés y sont détaillés.

Les données pour cette étude font partie intégrante d'un projet plus large. Cedit projet vise à observer l'évolution de la fatigue cognitive, les différences d'apprentissage entre joueur et témoin à l'intérieur d'une dyade, puis les relations entre la fatigue cognitive, l'apprentissage et la performance avec l'agentivité. Dans le cadre de ce projet, plusieurs mesures ont été collectées, soit le suivi oculaire, l'EEG, la pression sanguine et la conduction électrodermale, de sorte qu'il est possible d'effectuer des analyses secondaires et d'observer plusieurs autres concepts.

3.1 Devis de recherche

Le devis utilisé dans l'étude est de type expérimental à deux groupes (joueurs et témoins) avec prétest et post-test. Il est à noter que les données sont doublement nichées; les participants font partie d'une dyade (un joueur et un témoin) et les mesures de performance et de charge cognitive prennent la forme de séries temporelles puisque la tâche effectuée prend la forme d'une séquence de tableaux dans un jeu sérieux et que les variables indépendantes sont obtenues pour chacun d'eux et organisées sous forme de mesures répétées.

3.2 Participants

L'échantillon est composé de 82 étudiants et étudiantes volontaires de différentes disciplines en sciences humaines, recrutés dans des universités locales. Les étudiants retenus pour l'étude devaient être majeurs, ne pas avoir suivi de cours de physique après le secondaire, ne pas avoir d'allergies cutanées sévères, ne pas avoir de pacemaker, ni souffrir d'épilepsie. À la suite de la préparation des données, quatre dyades, soit huit participants, ont dû être éliminées de l'échantillon à cause de la mauvaise qualité des données

collectées. L'échantillon retenu pour la recherche était composé de 43 femmes (58,10%) et de 31 hommes (41,89%) et avait une moyenne d'âge de 25,7 ans (allant de 18 à 45 ans).

Les participants étaient groupés en dyades composées d'un joueur et d'un témoin pour la durée de la tâche, les rôles étant attirés de manière aléatoire avant l'arrivée des participants au laboratoire. Les participants pouvaient se porter volontaires pour l'étude soit en paire, formant alors déjà une dyade, ou seuls, étant par la suite placés en dyade.

3.3 Mesures

3.3.1 Charge cognitive et fatigue cognitive

Pour les mesures d'EEG, un bonnet de 64 électrodes a été utilisé afin de mesurer l'activité électrique cérébrale (Mercier *et al.*, 2020a). C'est avec ces données qu'il est possible de dériver les mesures de charge cognitive. L'impédance souhaitée pour les électrodes était de 10 k Ω ou moins, puis de 5 k Ω ou moins pour la mise à la terre. Dans les cas où ces exigences strictes étaient trop difficiles à atteindre, l'impédance était de moins de 25 k Ω , soit la valeur limite recommandée pour assurer la qualité des données. Le projet plus large dont découle cette étude a également collecté la conductance électrodermale (EDA), ainsi que les données de suivi oculaire, mais ces données ne seront pas utilisées dans le présent projet.

L'utilisation de l'EEG dans l'étude de la fatigue cognitive permet d'obtenir des données en continu. En plus d'obtenir une définition temporelle intéressante, cette méthode permet d'évaluer continuellement la fatigue cognitive. Il est plausible que la compréhension temporelle découlant de ce projet permette de cibler des périodes ou indicateurs critiques dans l'apprentissage, fournissant ainsi des données importantes pour des recherches ultérieures.

3.3.1 Apprentissage de notions de physique mécanique

Une version francophone du test mesurant les connaissances de physique newtonienne, le « *Force concept Inventory* » (FCI), a été administrée à tous les participants immédiatement avant et après la séance de jeu

(Mercier et al., 2020b). Tous les participants ont complété ce test, peu importe leur rôle dans la dyade. Ce test a originalement été créé par Hestenes et ses collaborateurs en 1992. Il est composé d'un questionnaire portant sur les six concepts principaux de la physique, soit : les trois lois de Newton (principe d'inertie, principe fondamental de la dynamique, principe des actions réciproques), le principe de superposition, la cinématique et les types de forces. Ces principes sont abordés au travers de 30 questions à choix de réponses. Les choix de réponses offerts, cinq choix, représentent soit la notion scientifique du concept, soit la perception erronée du concept, ou encore une autre mauvaise réponse non liée aux mauvaises conceptions répertoriées.

La transition d'une mauvaise réponse vers une bonne réponse entre le prétest et le post-test est qualifiée ici d'apprentissage. C'est ce qui constitue ici la performance à la tâche et à l'apprentissage.

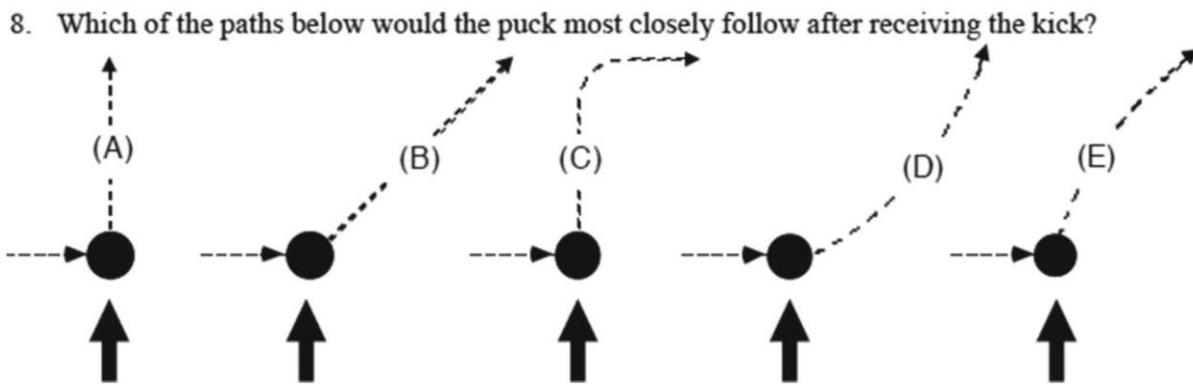


Figure 3.1 Exemple de question du Force Concept Inventory (FCI) (Hestnes et al., 1992)



Figure 3.2 Exemple d'un tableau de Mécanika

3.4 Intervention

La tâche à effectuer était le jeu sérieux Mécanika développé par Boucher-Genesse et collaborateurs (2011). Le FCI est à la base de Mécanika, pour plusieurs raisons fortes intéressantes, comme le rapporte Boucher-Genesse (2012). Dès ses débuts, le FCI a prouvé sa pertinence. Originellement, il a été administré à plus de 1500 élèves de niveau secondaire, puis plus de 500 étudiants universitaires (Hestenes *et al.*, 1992), les résultats se révélant constants et significatifs au travers des groupes d'élèves pour améliorer leurs connaissances. Depuis, ces résultats ont été reproduits, entre autres par Hake (1998) avec un échantillon de 6542 participants. Même les auteurs critiquant le FCI s'accordent pour dire qu'il s'agit tout de même du meilleur test disponible pour évaluer la compréhension de la physique mécanique (Heller et Huffman, 1995). Une recherche de Lasry et ses collaborateurs (2011) ont démontré que le score du test FCI est fiable. Plus récemment, Murshed (2020) et ses collaborateurs ont de nouveau démontré la fiabilité du FCI à l'aide d'un nouveau modèle d'analyse. Cette étude pilote a conclu à la capacité du FCI d'indiquer le niveau de compréhension conceptuel (Murshed *et al.*, 2020).

Puisque Mécanika est basé sur le FCI, il tombe sous le sens d'utiliser ce test avec le jeu.

Le jeu a été développé en se basant sur le FCI et sur les concepts prescrits par le Ministère de l'Éducation pour ce même sujet pour un niveau fin secondaire. Le jeu s'inscrit dans une lignée de jeux sérieux sur la physique mécanique (Boucher-Genesse, 2012). Ce jeu cible 58 conceptions erronées de la physique newtonienne dans 50 tableaux, chacun portant sur au moins une conception erronée. Chacun de ces tableaux requiert de faire bouger un objet selon une trajectoire indiquée en y appliquant différents types de forces. Les participants devaient choisir les bons types de forces, la quantité de sources de force adéquate, et les positionner de façon appropriée. Le tableau est complété lorsque la trajectoire est parfaitement respectée. Si le participant ne parvenait pas à trouver la solution du tableau au bout de 20 minutes, il passait au prochain tableau sans avoir réussi le précédent. Pendant ce temps, le participant non joueur observait les actions du joueur sur un second écran sans intervenir ni agir. Le projet a reçu l'aval du comité éthique de l'UQAM.

3.5 Déroulement

Dès leur arrivée au Neurolab, les participants sont accueillis et accordent leur consentement éclairé à leur participation à la recherche. Lorsque les deux participants de la dyade sont présents, ils passent alors au prétest constitué du FCI. Les deux participants exécutent le test en même temps; si l'un termine avant l'autre, il attend. L'installation de l'équipement et des participants prend 20 minutes. La période de jeu qui suit est d'une durée de 2 heures. Les deux participants d'une dyade ne pouvaient pas interagir durant la tâche. Le joueur jouait à Mécanika et complétait les niveaux du jeu. Pendant ce temps, le non-joueur observait le jeu et les actions du joueur en temps réel sur un autre écran. Les écrans utilisés sont des TOBII TX300 accompagnés de systèmes de son.

La désinstallation de l'équipement dure 5 minutes. Avant de procéder au post-test, les participants se sont fait offrir une serviette et l'opportunité de se rincer les cheveux pour éliminer une partie du gel d'électrodes, fournissant ainsi une pause d'environ 5 minutes additionnelles. Les deux participants exécutent alors une seconde fois le FCI en même temps. Si un participant complète le post-test avant l'autre, il peut quitter avant.

Lorsque le post-test est terminé, les participants sont remerciés et quittent le laboratoire. Chaque participant reçoit une compensation financière de 60\$ (Mercier et al., 2020b).

3.6 Préparation des données

Cette section décrit les actions et manipulations effectuées afin de préparer les données pour l'analyse.

3.6.1 Décontamination des données EEG

Une inspection semi-automatique a été effectuée afin d'éliminer les principaux artefacts (Mercier *et al.*, 2020b). Les clignements d'yeux et les saccades, qui contaminent le signal électrique collecté, ont été éliminés automatiquement des données à l'aide du « Independent Component Analysis » (ICA), avec les électrodes FP1 et F8 comme références pour l'activité oculaire sur les axes vertical et horizontal respectivement.

3.6.2 Transformation de l'EEG vers la « métrique » de charge cognitive

Tel que mentionné plus haut, la charge cognitive sera utilisée comme mesure indirecte de fatigue cognitive. Pour obtenir l'indice de charge cognitive, il faut effectuer un re-référencage à la mastoïde droite (TP10) (Mercier *et al.*, 2020a). Par la suite, il faut faire passer les données d'un point aux quatre secondes, à un point par seconde. L'indice de charge cognitive de Holm (2009), (la puissance de la bande thêta à Fz) / (la puissance de la bande alpha à Pz) (Holm *et al.*, 2009), permet ensuite d'inférer la charge cognitive.

Suite à l'ICA, et suivant l'état de l'art en la matière, les données d'EEG ont été remises en référence hors ligne à la mastoïde droite (TP10). Une nouvelle inspection semi-automatique des données brutes a été effectuée en se concentrant sur la région de la ligne médiane, Fz, Cz et Pz. Les paramètres ont été réglés à 140 uV avec une longueur d'intervalle de 100 ms pour la différence absolue maximale autorisée, c'est-à-dire -70 uV et 70 uV respectivement pour l'amplitude minimale et maximale, puis 0,5 uV pour l'activité permise la plus basse avec une longueur d'intervalle de 50 ms. Tous les marqueurs ont été signalés 50 ms avant et après l'événement afin d'enlever l'artefact entier. De plus, les données ont été examinées manuellement par un assistant de recherche afin d'éliminer tout artefact restant qui aurait été détecté incorrectement. Le signal a ensuite été divisé en segments de 4 secondes sans chevauchement. Les segments contenant de mauvais intervalles n'ont pas été utilisés dans les étapes suivantes. Une transformée de Fourier rapide, ou « Fast Fourier Transform » (FFT), a ensuite été effectuée avec les paramètres suivants : résolution maximale, puissance, spectre complet, fenêtre de Hanning de 10%, correction de variance appliquée, périodique. Les bandes FFT Alpha (8-12 Hz) et Thêta (4-7 Hz) ont été extraites. Un fichier marqueur contenant tous les segments de données, ainsi qu'un fichier marqueur contenant uniquement des segments de données valides, a également été exporté. Ces fichiers ont ensuite

été traités via un script interne dans Matlab pour calculer la mesure de charge cognitive. La mesure calculée a été alors sortie sous forme de flux de données continu (un point de donnée par seconde) avec des valeurs NaN à la place des segments non valides.

La segmentation de ces données est effectuée selon le temps requis par tableau dans Mécanika. Dans Mécanika, le début de chaque tableau s'accompagne d'une bande noire à l'écran. Ainsi, le marqueur temporel du début de chacun des tableaux réalisés par une dyade a été identifié automatiquement à partir de l'enregistrement vidéo de l'écran. La bande noire a servi de repère pour un script maison d'analyse d'images réalisé dans Matlab. Par exemple, un tableau réalisé par une dyade donnée durant une minute trente secondes comporterait 90 points de données de charge cognitive.

3.7 Plan d'analyse

Les analyses exigent de recourir au modèle linéaire généralisé pour l'examen des liens entre des variables dépendantes continues et des facteurs expérimentaux. Dans les cas où chaque participant contribuera plusieurs observations au cours du temps, produisant ainsi des données nichées, des modèles hiérarchiques seront utilisés. La figure 3.3 représente l'organisation doublement nichée de ces données; les données sont nichées par tableau, puis les types de participants (joueur et témoins) sont nichés par dyade. Afin de caractériser l'évolution des séries temporelles, notamment pour la fatigue cognitive et la période de grâce, un examen visuel des courbes est nécessaire dans un premier temps. Ce premier examen permettra de sélectionner les analyses mathématiques et statistiques nécessaires.

Il est important de noter que la charge cognitive est utilisée comme mesure indirecte de la fatigue cognitive. Les deux termes seront donc employés dans les chapitres qui suivent, la charge cognitive étant inférée à partir de Holm, puis la fatigue cognitive inférée à partir de cette mesure grâce à l'aire sous la courbe.

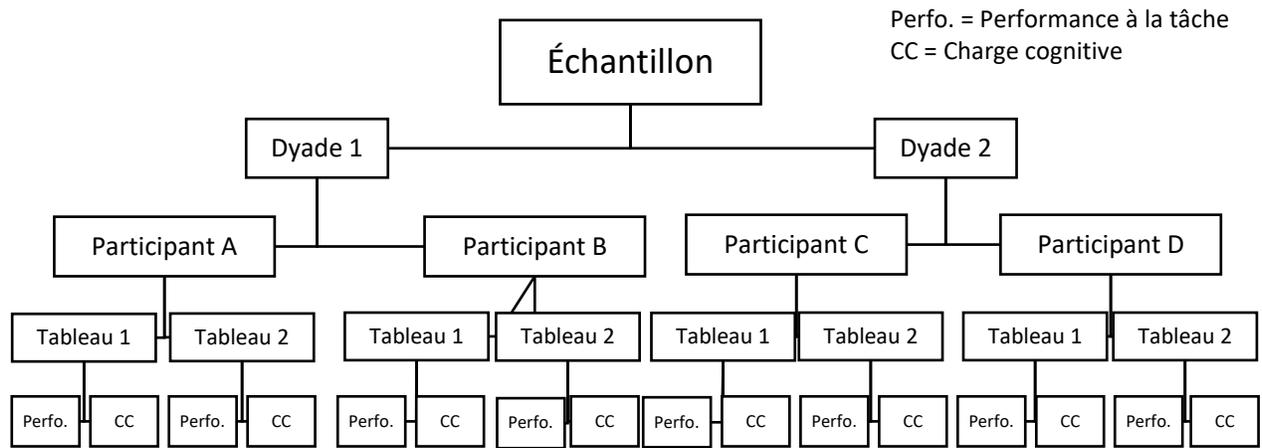


Figure 3.3 Organisation des données doublement nichées

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

Ce chapitre présentera les résultats des analyses. Les hypothèses et questions de recherche seront abordées, structurées par les quatre volets de cette recherche : la période de grâce, l'évolution de la fatigue cognitive, la relation fatigue et performance avec l'apprentissage et l'agentivité.

4.1 Période de grâce

Pour la période de grâce l'hypothèse qu'une telle période sera observée en début de tâche avait été posée, menant au questionnement en ce qui concerne la longueur de celle-ci.

Une analyse visuelle des courbes représentant l'évolution de la charge cognitive dans le temps ne permet pas de distinguer de période de grâce au niveau de la fatigue cognitive. Ces représentations visuelles tracent un portrait plutôt linéaire, sans cassure marquée généralisée. Certains participants présentent un changement brusque et soudain dans l'évolution de leur charge cognitive, mais ceci ne permet pas de conclure à l'existence d'une période de grâce. La figure 4.1 présente l'évolution des courbes de charge cognitive pour chacun des participants par dyade. La figure 4.2 présente la même information, mais sur une échelle unique pour toutes les dyades. Compte tenu des résultats de l'analyse visuelle, aucune analyse statistique supplémentaire n'a été nécessaire.

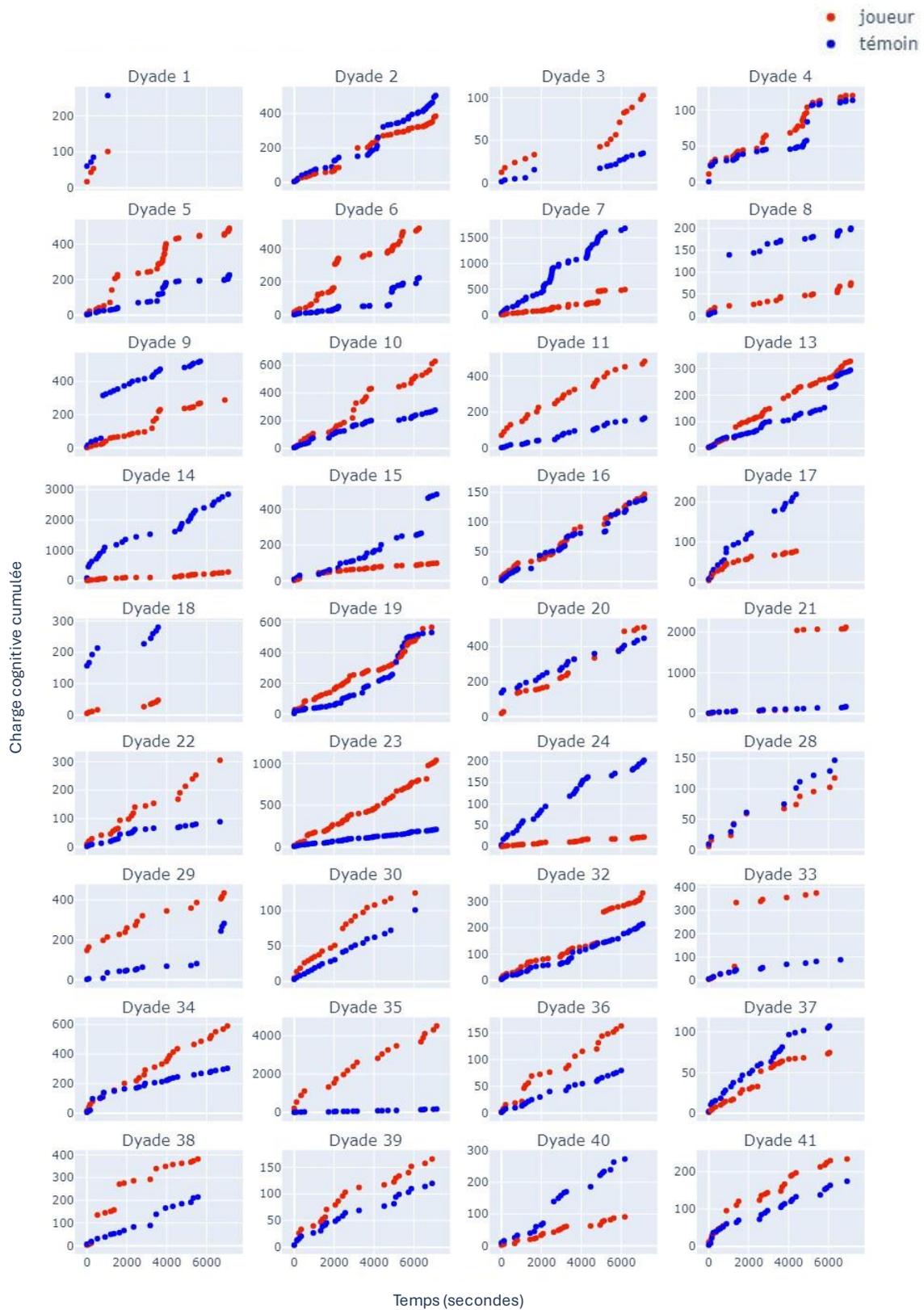


Figure 4.1 Évolution de la fatigue cognitive accumulée des joueurs et témoins au fil de la tâche, par dyade (échelle variable)

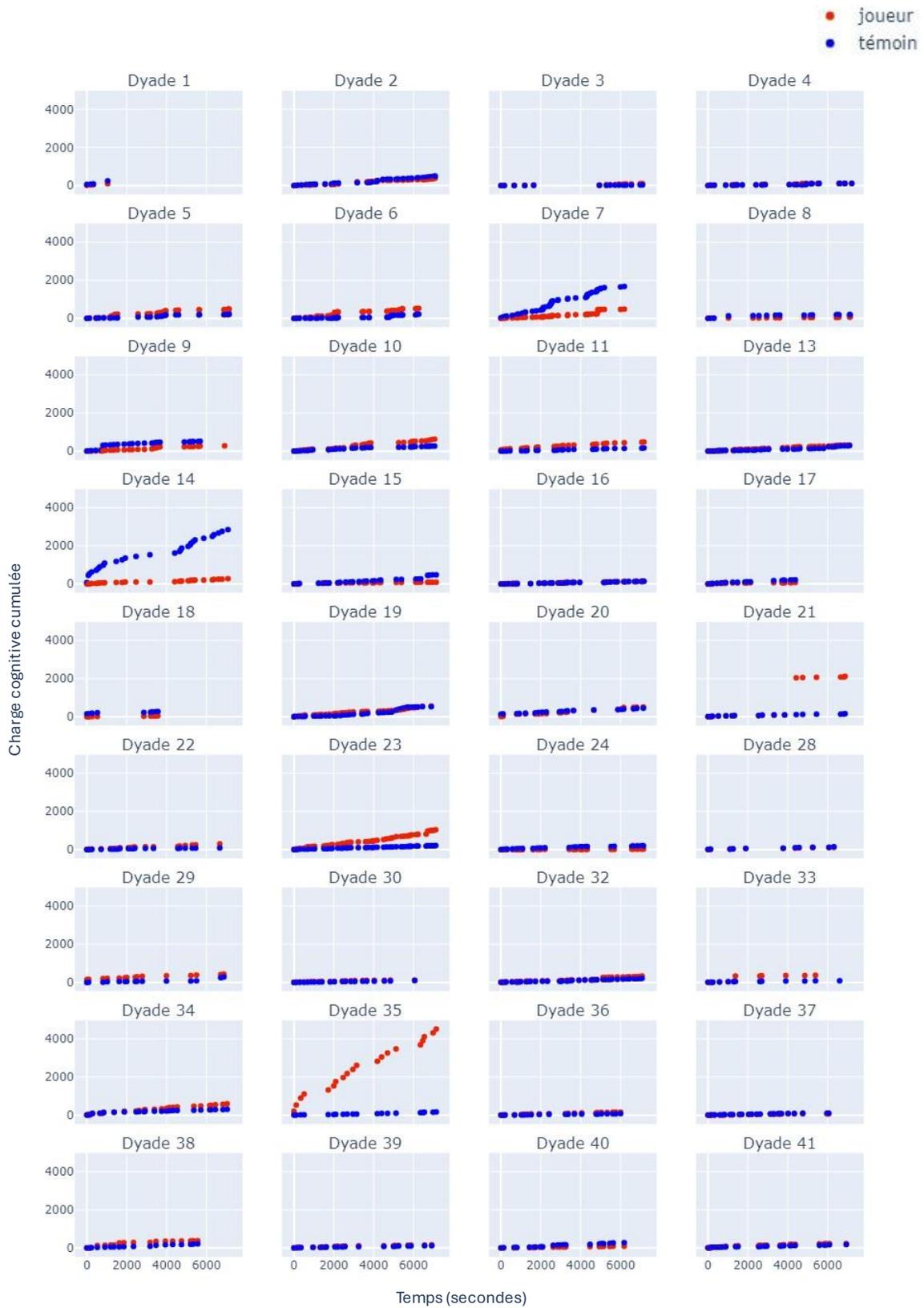


Figure 4.2 Évolution de la fatigue cognitive accumulée des joueurs et témoins au fil de la tâche, par dyade (échelle unique)

4.2 Évolution de la fatigue cognitive

En ce qui concerne la fatigue cognitive et son évolution, l'hypothèse suivante a été posée : à la suite de la période de grâce, la fatigue cognitive progressera constamment au fil d'une tâche d'apprentissage où aucun moment ne permet à l'apprenant de « recharger » ses ressources et aucun incitatif en ce sens n'est présenté. Cette hypothèse elle-même permet de se questionner sur la forme que prendra la courbe d'évolution de la fatigue cognitive.

L'analyse visuelle des graphiques d'évolution de la charge cognitive à la figure 4.1 permet indirectement d'observer la fatigue cognitive. Ces graphiques indiquent que l'évolution de la fatigue cognitive au fil de la tâche d'apprentissage est de forme généralement linéaire ascendante. L'évolution des diverses dyades et des différents participants varie énormément, ce qui permet de supposer qu'il n'est pas possible de dégager une tendance généralisable à partir de cet échantillon de donnée, dans ce contexte. Compte tenu des résultats de l'analyse visuelle, aucune analyse statistique supplémentaire n'a été possible.

4.3 Relations fatigue cognitive, performance et apprentissage

Au sujet des relations entre la fatigue cognitive, une question concernant l'existence entre la fatigue cognitive cumulée et les gains d'apprentissage a été posée. De plus, cette question a engendré l'hypothèse que la performance, représentée dans ce projet de recherche par le temps requis pour compléter un tableau, suivra l'avancement de la fatigue cognitive cumulée.

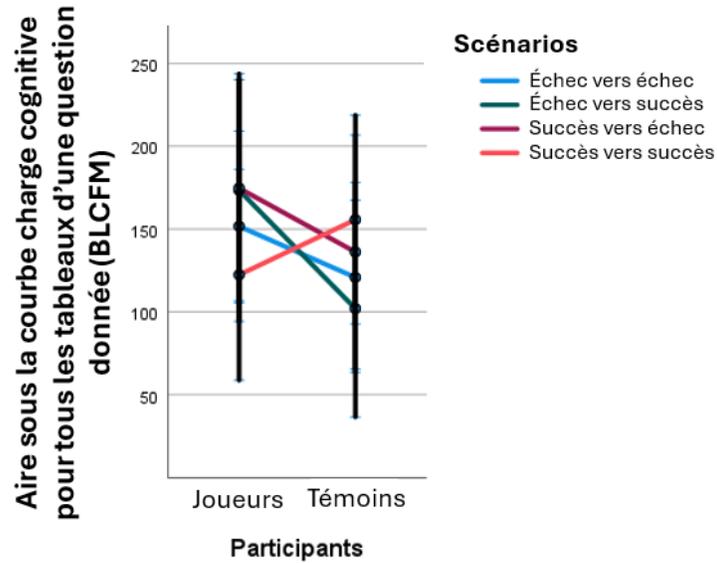


Figure 4.3 Charge cognitive cumulée moyenne pour tous les tableaux concernant une même question selon les gains d'apprentissage et selon l'agentivité

Quatre scénarios d'évolution des conceptions vis-à-vis des connaissances sont possibles : échec vers échec (ÉvÉ), échec vers succès (ÉvS), succès vers échec (SvÉ), succès vers succès (SvS).

Lorsqu'il y a transition entre les réponses du prétest et du post-test (SvÉ ou ÉvS), on peut alors parler d'un changement conceptuel. Lorsqu'un tel changement survient, la charge cognitive accumulée pour les tableaux concernant une question donnée est plus grande que lorsqu'il n'y a pas de transition (SvS ou ÉvÉ), ($F(3,2126) = 0,47, n.s.$).

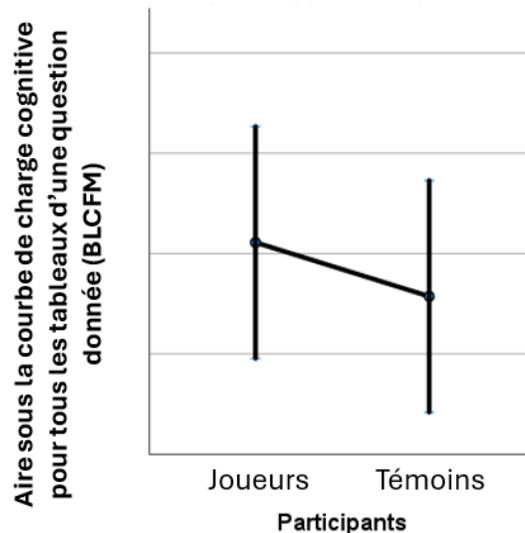


Figure 4.4 Charge cognitive cumulée moyenne pour tous les tableaux concernant une même question selon l'agentivité

Les résultats démontrent que l'agentivité a un effet significatif sur la charge cognitive accumulée pour les tableaux concernés pour une question donnée, ($F(3,2126) = 5,31, p < ,02$). Sans égard aux scénarios d'évolution des conceptions, le joueur se fatigue généralement plus que le témoin (voir Figure 4.4).

D'un autre côté, lorsqu'on observe l'effet des scénarios selon l'agentivité, il y a un effet significatif sur la charge cognitive accumulée pour les tableaux concernés pour une question donnée, ($F(3,2126) = 3,58, p < ,01$). L'analyse des quatre scénarios montre qu'une évolution de conception, c'est-à-dire une transition ÉvS ou SvÉ, engendre la plus grande charge cognitive accumulée chez les joueurs. Ce n'est toutefois pas le cas chez les témoins, pour qui la transition ÉvS est celle associée à la plus petite charge cognitive accumulée. La transition SvÉ est associée à la seconde plus grande charge cognitive accumulée. Un autre résultat surprenant se trouve au niveau du scénario SvS, un scénario où il y a absence d'évolution des conceptions, qui est associée à la plus grande mesure de charge cognitive chez les témoins. Pour les joueurs, ce même scénario est celui associé à la plus petite charge cognitive accumulée. Le scénario ÉvÉ se trouve au troisième rang des scénarios entraînant la plus grande charge cognitive cumulée chez les deux types de participants.

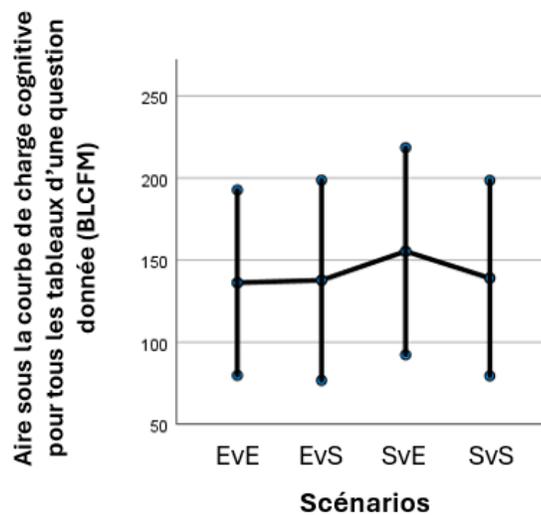


Figure 4.5 Charge cognitive cumulée moyenne pour tous les tableaux concernant une même question selon les scénarios d'évolution des conceptions

Globalement, les résultats de la charge cognitive associée aux scénarios ÉvÉ, ÉvS et SvS sont très similaires lorsque l'agentivité n'est pas considérée (voir, Figure 4.5). Une tendance à la hausse pour la charge cognitive cumulée associée au scénario SvÉ est observée, mais ce résultat est non significatif, ($F(3,2126) = ,470, n.s.$).

Tableau 4.1 Effets des facteurs expérimentaux sur la charge cognitive accumulée pour les tableaux d'une question donnée

Source		ddl effet	ddl erreur	Sig.
Agentivité	5,313	1	2126	,021
Évolution des conceptions (scénarios d'évolution des conceptions)	,470	3	2126	,703
Agentivité*Scénarios	3,576	3	2126	,013
Temps passés sur les tableaux d'une question (performance)	28,054	1	2126	,001

L'analyse du temps requis pour compléter un tableau par rapport à la fatigue accumulée révèle un effet significatif ($F(1, 29,163) = 18,76, p < ,001$). Les deux variables évoluent ensemble au fil des tableaux. Les résultats indiquent une corrélation positive entre ces deux éléments. Les figures qui suivent (figures 4.6 et 4.7) présentent la charge cognitive cumulée moyenne en relation avec le temps passé par tableau. Afin de préciser l'interprétation, le nombre de dyades ayant atteint chacun des tableaux est indiqué.



Figure 4.6 Charge cognitive cumulée moyenne des joueurs en relation avec le temps passé par tableau selon le tableau



Figure 4.7 Charge cognitive cumulée moyenne des témoins en relation avec le temps passé par tableau selon le tableau

4.4 Agentivité

Deux hypothèses ont été posées en lien avec l'agentivité: la fatigue cognitive variera selon l'agentivité du participant et le joueur se fatiguera plus que le témoin.; la durée de la période de grâce en début de tâche variera selon l'agentivité et sera plus courte pour le joueur.

Hypothèses :

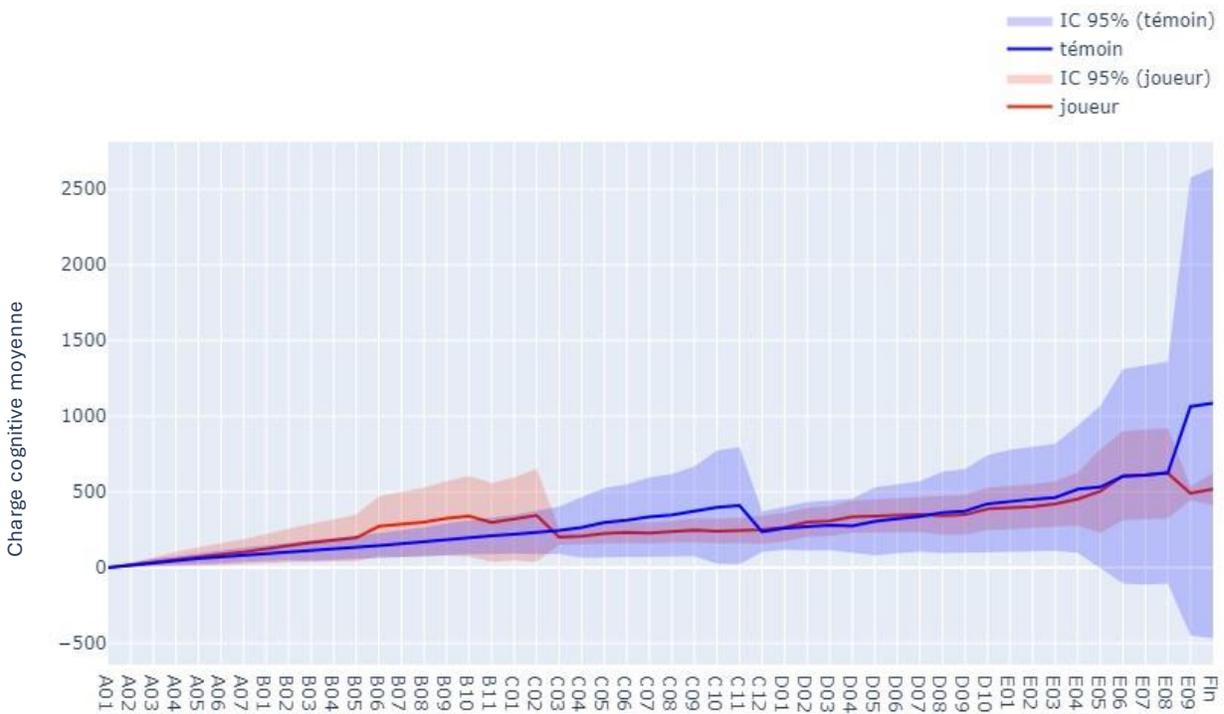
La quantité de fatigue cognitive variera selon l'agentivité du participant; c'est-à-dire que le joueur se fatiguera plus que le témoin.

La durée de la période de grâce en début de tâche variera selon l'agentivité du participant; le joueur se fatiguera plus vite que le témoin.

Tel que constaté dans les résultats de la section 4.1, les résultats montrent que le joueur se fatigue généralement plus que le témoin. Les figures ci-dessous démontrent la disparité des résultats obtenus par les divers participants. La Figure 4.10 présente les courbes de charge cognitive cumulée moyenne selon l'agentivité, soit les rôles des participants. Cette figure doit être interprétée avec précaution étant donné que le nombre de dyades ayant atteint chacun des tableaux diffère.

Les cinq figures qui suivent (Figures 4.8 à 4.12) présentent la distribution et la disparité des courbes d'évolution de la charge cognitive pour les joueurs et les témoins. La figure 4.8 présente ensemble les moyennes pour les joueurs et les témoins. Sur cette figure, on peut constater qu'en plus de se fatiguer généralement plus que les joueurs, les données des témoins varient davantage, d'où l'intervalle de confiance plus large. Les figures qui suivent mettent en évidence les différentes courbes d'évolution de charge cognitive cumulée selon l'agentivité. La disparité des données pour les témoins est évidente dans les figures 4.11 et 4.12.

Étant donné qu'aucune période de grâce n'a été observée, il n'est pas possible de tirer de conclusion par rapport aux différences engendrées par l'agentivité en lien avec cet aspect.



Tableau

Figure 4.8 Évolution de la charge cognitive cumulée moyenne par tableau avec un intervalle de confiance de 95%

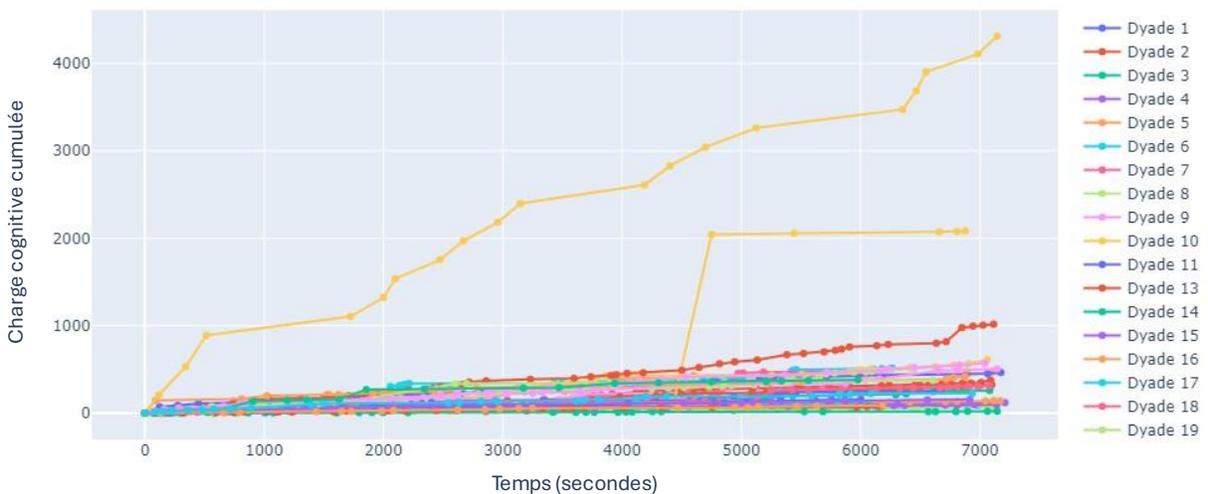


Figure 4.9 Distribution des courbes d'évolution de la charge cognitive cumulée des joueurs de toutes les dyades

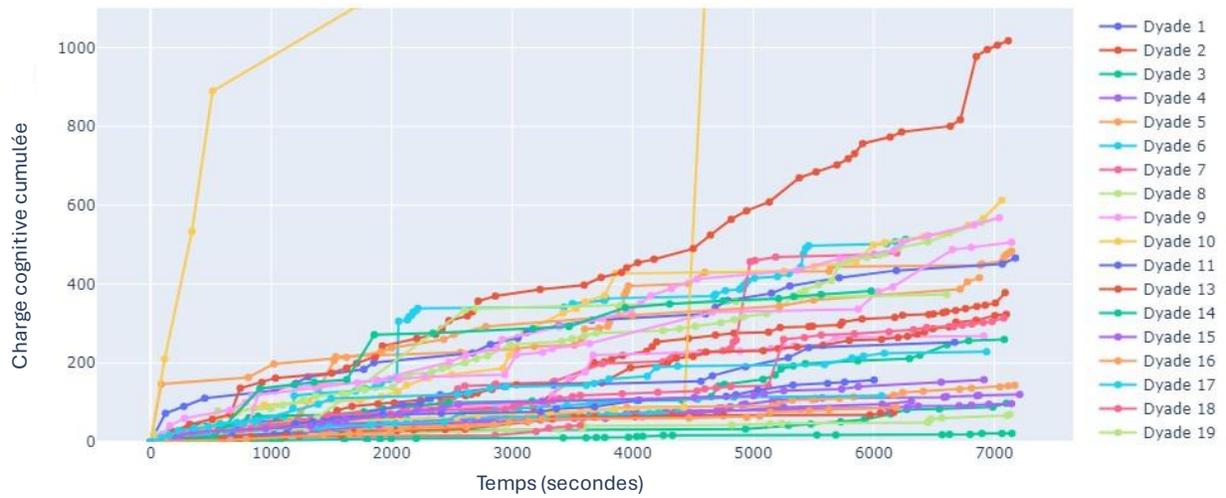


Figure 4.10 Distribution des courbes d'évolution de la charge cognitive cumulée des joueurs de toutes les dyades (tronquée)

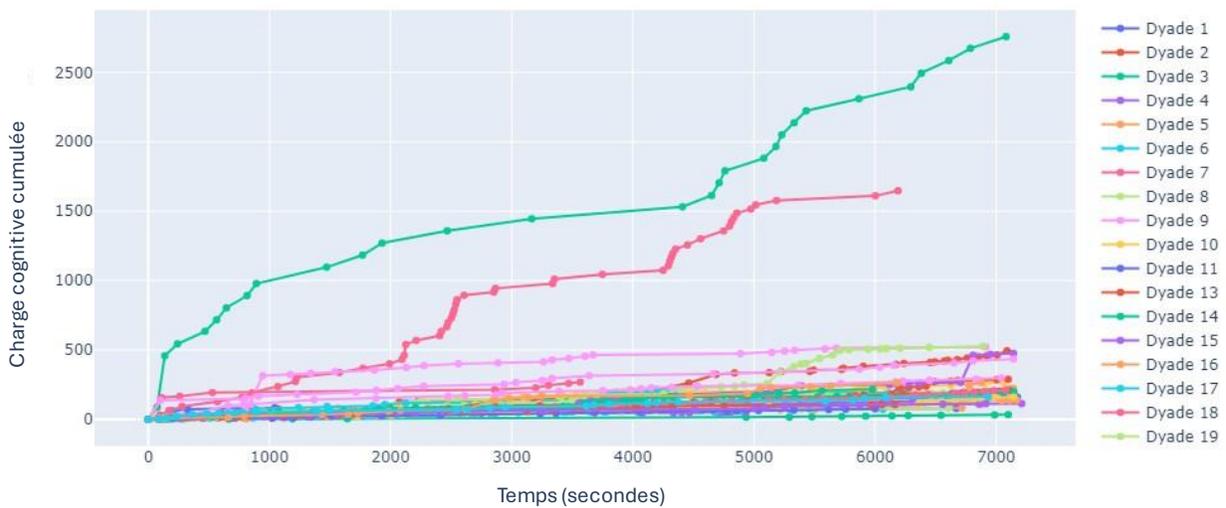


Figure 4.11 Distribution des courbes d'évolution de la charge cognitive cumulée des témoins de toutes les dyades

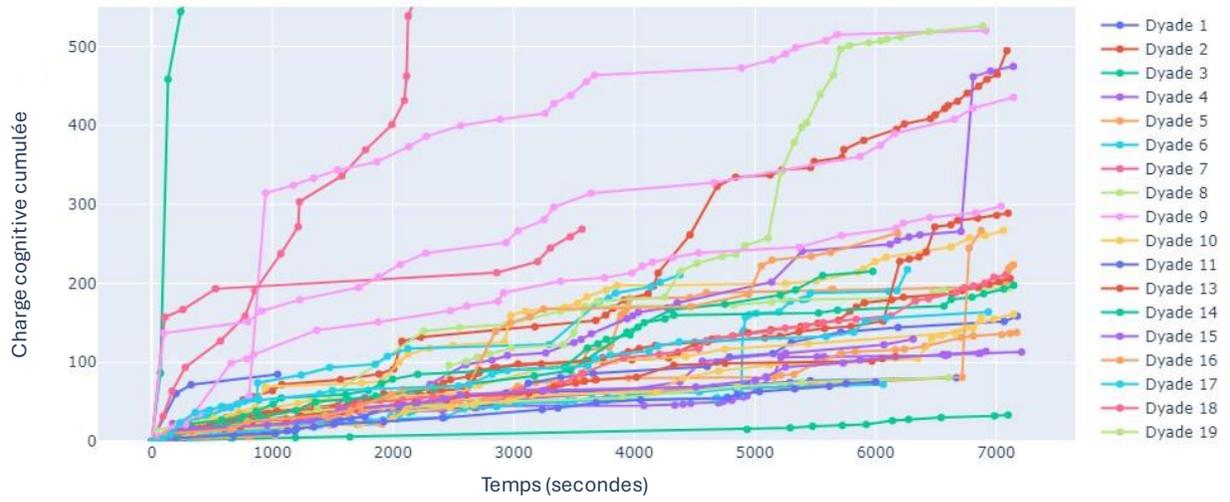


Figure 4.12 Distribution des courbes d'évolution de la charge cognitive cumulée des témoins de toutes les dyades (tronquée)

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Ce chapitre renferme l'interprétation des résultats présentés précédemment. Les quatre mêmes volets que pour les résultats seront employés : la période de grâce, l'évolution de la fatigue cognitive, la relation fatigue et performance avec l'apprentissage et l'agentivité. Pour chacune des sections, les hypothèses et questions de recherche sont rappelées.

5.1 Période de grâce

Les résultats ne permettent pas de conclure à la présence d'une période de grâce. Ce résultat permet d'infirmer l'hypothèse posée à ce sujet. La littérature consultée dans le cadre de ce projet dresse un portrait mitigé de ce concept. Alors que certains articles font mention de ce qu'on pourrait qualifier de période de grâce (Lorist *et al.*, 2009 ; Randles *et al.*, 2017), la majorité des articles consultés ne font aucune mention d'une telle période. Il est concevable que la divergence des résultats soit due aux facteurs humains qui se superposent à la tâche (motivation, agentivité, etc.). Ainsi, le présent projet ne permet simplement pas de conclure à l'existence de ce phénomène. À la lumière de ces résultats, il est tout de même possible de supposer que l'apparition de la fatigue cognitive agit de la même manière en contexte d'apprentissage qu'en contexte de performance de tâche cognitive, à savoir de manière linéaire. La question de recherche qui portait sur la longueur de la période de grâce se révèle inconséquente vu l'absence d'une telle période.

Une nouvelle observation des courbes d'évolution de la charge cognitive cumulée a permis de constater un possible moment critique autour de 2000 secondes à la tâche pour plusieurs participants (voir Figure 4.1). Cette observation permet de penser que même si elle n'a pu être relevé dans ce projet, une certaine période de grâce pourrait tout de même exister. Un projet de plus grande envergure serait nécessaire pour obtenir la puissance statistique nécessaire pour généraliser et tirer des conclusions au sujet de la période de grâce.

5.2 Évolution de la fatigue cognitive

L'analyse des résultats pousse à conclure à une progression généralement ascendante linéaire de la fatigue cognitive dans ce contexte de tâche d'apprentissage. Ce résultat est cohérent avec la littérature scientifique. Dans la tâche d'apprentissage liée au présent projet, les modalités expérimentales ne contenaient aucun élément permettant de réduire, ralentir ou contrer l'apparition de la fatigue cognitive, tel qu'une pause, une période de sommeil, l'alimentation, ou toute autre activité de nature différente à celle de la tâche (Agrawal *et al.*, 2021 ; Castro-Alonso *et al.*, 2021 ; Soukup *et al.*, 2019). De plus, le participant travaille sur la même tâche pendant les deux heures. La fatigue engendrée ne devrait alors pas varier de manière brusque ou drastique; elle s'accumule plutôt simplement au fil d'une même tâche. Il est donc prévisible que la fatigue cognitive évolue de manière linéaire dans ces circonstances. Ce résultat laisse supposer que la fatigue cognitive en apprentissage évolue de manière similaire à la fatigue cognitive dans d'autres contextes. Ces résultats permettent de confirmer l'hypothèse portant sur l'évolution ascendante de la fatigue cognitive. La question associée à la forme de la courbe de la série temporelle de la fatigue cognitive est également répondu par le biais de ces réponses.

5.3 Relations entre la fatigue, la performance et l'apprentissage

Les résultats démontrent qu'il existe des relations significatives entre la fatigue cognitive accumulée et les divers scénarios d'apprentissage, ce qui répond à la question de recherche sur le sujet par l'affirmative. Ces relations sont aussi affectées, de manière causale, par l'agentivité telle que manipulée au hasard dans la présente expérimentation; les résultats démontrent que les joueurs se sont généralement fatigués plus que les témoins. Ce résultat peut être mis en relation avec le résultat de Mercier (2020a) qui indique que le témoin apprend davantage. Ces deux résultats pourraient s'expliquer par l'agentivité différente des joueurs et des témoins. Ce sont les joueurs qui interagissent avec le jeu et l'interface. Cette simple interaction pourrait entraîner une charge non essentielle nuisible à l'apprentissage (Ishii *et al.*, 2014 ; Skuballa *et al.*, 2019 ; Soukup *et al.*, 2019).

5.3.1 Apprentissage

Cette section discute les résultats des quatre scénarios possibles. L'interprétation concerne chacun des quatre scénarios vis-à-vis des évolutions des conceptions: échec vers échec (ÉvÉ), échec vers succès (ÉvS), succès vers échec (SvÉ), succès vers succès (SvS).

5.3.1.1 Succès vers succès (SvS)

Le scénario SvS occupe un rang absolument opposé selon l'agentivité. Alors que pour les joueurs il est associé à la plus petite fatigue cognitive accumulée, ce même scénario représente la plus grande fatigue pour les témoins. Cette différence importante pourrait être expliquée en partie par le fait que, pour le joueur qui comprenait déjà les concepts de la tâche d'apprentissage dès le prétest, les tableaux du jeu sont alors faciles et n'entraînent pas une grande charge cognitive. La fatigue cognitive reste alors à un niveau plus bas. À l'opposé, un témoin qui maîtrise déjà les concepts présentés, la motivation et la charge cognitive pourraient être affectées par les nombreux essais potentiels de son joueur, qu'il doit observer continuellement sans pouvoir ni intervenir ni aider, ce qui pourrait entraîner de l'ennui. Sans nécessairement être généralisé, cette situation est plausible. La littérature identifie l'ennui comme une résultante d'une charge cognitive trop petite (Bafna et Hansen, 2021). Émettre l'hypothèse que l'ennui des témoins engendre une fatigue cognitive plus grande chez ceux-ci semble contradictoire à la documentation consultée. Il serait concevable que l'ennui soit effectivement entraîné par une charge cognitive trop petite, mais que le participant cherche alors de la stimulation ailleurs qu'à la tâche, et que cette quête le fatigue davantage. En autres termes, le manque de stimulation est lié à une charge cognitive trop petite, ce qui engendre une quête de stimulation, créant une nouvelle charge cognitive extérieure à la tâche, qui fatigue le participant.

On sait que l'apprentissage entraîne un effort cognitif (Sweller *et al.*, 2019). Or, si le participant joueur connaît déjà les bonnes réponses, un apprentissage n'aura pas lieu de se produire, entraînant ainsi la plus petite charge cognitive mesurée chez les joueurs.

5.3.1.2 Échec vers succès (ÉvS) et succès vers échec (SvÉ)

Les scénarios entraînant des évolutions de conception au niveau des connaissances, que cette évolution soit souhaitable ou non, soit les scénarios ÉvS et SvÉ, sont ceux associés à la plus grande fatigue cognitive accumulée chez les joueurs. Une partie de la littérature considère que l'exécution libre et volontaire d'actions constitue l'essence même de l'agentivité (Damşa *et al.*, 2010 ; Deschênes et Laferrière, 2019 ; Tali, 2020) et que cette agentivité peut affecter l'apprentissage (Mercier *et al.*, 2020a, 2020b ; Snow *et al.*, 2015). Il est possible d'émettre l'hypothèse explicative que l'agentivité du joueur exige plus d'actions et de réflexions actives de sa part, notamment les interactions avec l'interface et le jeu, ce qui accroît la fatigue cognitive accumulée par ceux-ci.

Ces mêmes transitions, scénarios ÉvS et SvÉ, occupent respectivement la quatrième (dernière) et deuxième position dans les scénarios entraînant le plus de fatigue chez les témoins. Autrement dit, les résultats semblent indiquer que l'apprentissage souhaitable, soit ÉvS, est le scénario qui entraîne la moins grande charge cognitive pour les témoins.

Il est concevable que pour ÉvS, les témoins réalisent des apprentissages à l'abri de la charge cognitive supplémentaire d'interagir avec le jeu et l'interface. Le fait que le témoin ne fasse qu'observer et n'ait ni la charge de prendre de décision ni celle de jouer au jeu, pourrait épargner une quantité importante de ressources cognitive, et donc de fatigue.

En ce qui concerne le scénario SvÉ, il est concevable que, pour comme pour le scénario SvS, il pourrait être dû à de l'ennui. Encore une fois, le témoin recherche potentiellement de la stimulation ailleurs qu'à la tâche, entraînant ainsi une fatigue plus importante.

Une autre hypothèse plausible pour le scénario SvÉ est que le témoin n'aurait pas été en mesure de s'autoréguler, notamment au plan de l'attention visuelle, afin d'éviter une partie non essentielle de la charge cognitive (Soukup *et al.*, 2019). Cela pourrait être dû à divers facteurs intrinsèques et extrinsèques, entre autres des connaissances préalables insuffisantes (Skuballa *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019) ou un environnement de tâche distrayant (Ishii *et al.*, 2014 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Sweller *et al.*, 2019). Ceci aurait eu pour effet de créer des liens erronés au niveau de la conceptualisation des apprentissages.

Il est plausible que le témoin ait été confondu par les actions de son joueur, ce qui aurait entraîné une charge, et fatigue, plus importantes, engendrant alors des apprentissages erronés. Il est pertinent de rappeler que le rythme d'apprentissage des témoins était à la merci de leur joueur. Certaines paires auraient pu être drastiquement opposées dans leurs vitesses d'apprentissages ayant alors un impact sur la performance de plusieurs témoins.

Sans égard à l'agentivité, les résultats font état d'une tendance à la hausse de la charge cognitive lors du scénario SvÉ. C'est le scénario associé à la plus grande charge cognitive moyenne. Bien que ce résultat soit non significatif au niveau inférentiel, la tendance est claire au plan descriptif. Les hypothèses explicatives énoncées ci-dessus pourraient expliquer cette tendance, mais d'autres recherches sont nécessaires afin d'avoir un portrait clair sur le scénario SvÉ, ses facteurs et le rôle de l'agentivité dans cette transition non souhaitable.

5.3.1.3 Échec vers échec

Pour les deux types de participants, le scénario ÉvÉ est associé à la deuxième plus petite mesure de fatigue. Il est difficile d'expliquer avec certitude ce résultat avec les concepts explorés dans le cadre conceptuel et la littérature consultée. Les participants auraient pu être légèrement ennuyés ou alors une certaine charge cognitive essentielle aurait été manquante, résultant en une charge cognitive essentielle plus petite. La charge cognitive totale serait alors moindre, mais l'apprentissage en serait affecté, voire absent.

Il est important de noter que ce scénario n'est pas systématiquement synonyme d'absence d'évolution de conception; il est possible que certains participants aient passé d'une mauvaise réponse à une autre mauvaise réponse. La division des scénarios (SvS, SvÉ, ÉvS, ÉvÉ) ne permet pas la distinction entre les deux types de mauvaises réponses du FCI, soit les mauvaises conceptions initiales et les autres réponses fausses. Alors qu'une seule bonne réponse était présente dans les choix, plusieurs mauvaises réponses étaient possibles. Autrement dit, ce scénario (ÉvÉ) rassemble les participants qui avaient une mauvaise réponse et qui ont mis la même mauvaise réponse au post-test, ainsi que ceux qui ont passé d'une mauvaise réponse à une autre mauvaise réponse.

Les résultats permettent d'observer une tendance non significative démontrant que les évolutions de conception, souhaitables ou non (ÉvS et SvÉ), sont associées à une charge cognitive accumulée plus grande que lorsqu'il n'y a aucune évolution de conception (SvS et ÉvÉ). Cette tendance se révèle sous forme de

résultat non significatif probablement en raison de la puissance statistique insuffisante que cause la taille restreinte de l'échantillon.

5.3.2 Performance

Les résultats démontrent l'existence d'un effet important et significatif du temps requis pour compléter un tableau par rapport à la fatigue cognitive accumulée. Autrement dit, lorsque la fatigue cognitive accumulée est plus grande, le joueur prend plus de temps pour compléter un tableau. Ce résultat est cohérent avec la littérature, celle-ci indiquant que la fatigue cognitive entraîne, entre autres, un temps de réaction plus lent, une baisse dans la performance et une augmentation du taux d'erreur (Agrawal *et al.*, 2021 ; Bafna et Hansen, 2021 ; Clayton *et al.*, 2015 ; Herlambang *et al.*, 2019 ; Holm *et al.*, 2009 ; Hopstaken *et al.*, 2015 ; Ishii *et al.*, 2014 ; Käthner *et al.*, 2014 ; Khojasteh Moghani *et al.*, 2021 ; Lorist *et al.*, 2009 ; Randles *et al.*, 2017 ; Sweller *et al.*, 2019 ; Tran *et al.*, 2020 ; Tricot *et al.*, 2020). Il permet également de confirmer l'hypothèse de recherche suggérant que le temps requis par tableau évoluera de manière positive avec l'augmentation de la fatigue cognitive accumulée. Cette corrélation déjà observée en plusieurs contextes autres est alors validée en contexte d'apprentissage.

5.4 Agentivité

L'agentivité déployée par les différents participants entraîne une différence au niveau de la fatigue cognitive et de l'apprentissage. Les résultats de Mercier (2020a) montrent que le témoin apprend plus que le joueur. Il est concevable que la charge cognitive du témoin soit plus « optimisée » que celle du joueur étant donné que la fatigue accumulée est généralement plus basse chez ce groupe de participants. Il est possible d'émettre l'hypothèse qu'une charge cognitive non essentielle liée à l'interaction avec l'interface de jeu pourrait être ajoutée au joueur, entraînant une fatigue cognitive plus grande, ce qui module ainsi les gains d'apprentissage. Il est également possible que l'agentivité ait entraîné une charge supplémentaire, entraînant plus de fatigue et mettant en péril certains apprentissages (Agrawal *et al.*, 2021 ; Bafna et Hansen, 2021 ; Clayton *et al.*, 2015 ; Herlambang *et al.*, 2019 ; Hopstaken *et al.*, 2015 ; Ishii *et al.*, 2014 ; Käthner *et al.*, 2014 ; Khojasteh Moghani *et al.*, 2021 ; Lorist *et al.*, 2009 ; Randles *et al.*, 2017 ; Soukup *et al.*, 2019 ; Sweller, 1988 ; Tran *et al.*, 2020 ; Tricot *et al.*, 2020).

Deux hypothèses de recherche avaient été émises pour ce volet. La première suggérait que la fatigue cognitive varierait selon l'agentivité et que le joueur se fatiguerait davantage. Cette hypothèse est confirmée par les présents résultats. La seconde hypothèse concernait la période de grâce en relation

avec l'agentivité, elle suggérait que le joueur se fatiguerait plus vite que le témoin. Toutefois, puisqu'aucune période de grâce n'a été relevée, cette hypothèse ne peut être vérifiée.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

Une synthèse des éléments principaux de ce projet sera faite dans ce chapitre. L'atteinte des objectifs sera abordée, suivie des forces et limites du présent projet. Finalement des pistes pour les travaux futurs seront explorées.

6.1 Faits saillants

La fatigue cognitive est un phénomène qui affecte la performance lors de tâches diverses et d'apprentissages. La littérature scientifique disponible dresse un portrait complexe de la fatigue cognitive où les paramètres à considérer sont nombreux. Peu de documentation est disponible sur la fatigue cognitive en contexte d'apprentissage, et le présent projet contribue à combler ce manque. L'objectif de ce projet est de mieux comprendre la fatigue cognitive en contexte d'apprentissage en relation avec l'agentivité et la performance afin de modéliser son apparition et ses tendances.

Ce projet de recherche se décline en quatre volets. Le premier volet concerne la période de grâce. L'objectif était de dégager une tendance descriptive en ce qui concerne la longueur de celle-ci en contexte d'apprentissage. Les présents résultats vont dans la même direction qu'une bonne partie de la littérature scientifique consultée, c'est-à-dire que la fatigue cognitive évolue constamment, sans brisure notable, au cours d'une tâche. Le second volet avait pour objectif d'examiner l'évolution de la fatigue cognitive au cours d'une tâche d'apprentissage. Les résultats permettent de conclure que l'évolution de la fatigue cognitive se fait de manière plutôt linéaire et augmente tout au long de la tâche. Le troisième volet visait à observer l'apprentissage et la performance au jeu en lien avec la fatigue cognitive accumulée. Les résultats du scénario SvS démontrent qu'il génère la plus petite quantité de fatigue cognitive chez les joueurs et la plus grande quantité de fatigue cognitive chez les témoins. Ce résultat est surprenant par la position absolument opposée que le scénario occupe chez les joueurs et les témoins sur l'échelle des scénarios d'évolution des conceptions engendrant le plus ou moins de fatigue cognitive. Il est envisageable d'expliquer ce résultat étonnant par l'ennui ou le manque de motivation, menant ainsi à une recherche de stimuli par le participant; cette recherche entraîne alors une plus grande charge cognitive. Le résultat démontre que le scénario ÉvS est associé à la plus petite moyenne de fatigue cognitive chez les témoins. Ceux-ci n'ont pas à interagir avec le jeu et l'interface, évitant ainsi une charge supplémentaire et permettant un apprentissage plus efficace. En ce qui concerne la performance, les résultats démontrent

l'existence d'une corrélation positive significative entre la fatigue cognitive accumulée et le temps requis pour compléter un tableau. Le quatrième volet de ce projet concerne l'étude de l'agentivité en lien avec la fatigue cognitive dans un contexte d'apprentissage. Les résultats de l'apprentissage indiquent que l'agentivité, le rôle du participant dans la dyade, a un effet sur l'apprentissage et la charge cognitive; les témoins apprennent plus que les joueurs et se fatiguent moins que ceux-ci. Ces résultats pourraient apporter une nuance à la conception actuelle de l'agentivité en contexte d'apprentissage. Le fait que l'agentivité est importante pour apprendre est un principe bien répandu, les présents résultats offrent toutefois une piste pour explorer davantage l'agentivité dans l'optique de la fatigue cognitive, avec la considération des diverses charges cognitives impliquées dans l'apprentissage.

6.2 Atteinte des objectifs

L'objectif de cette étude était de mieux comprendre et modéliser la fatigue cognitive et son évolution en contexte d'apprentissage, ainsi que sa relation avec l'agentivité et l'apprentissage. Ce projet permet de mieux conceptualiser la fatigue cognitive en apprentissage et met en évidence des pistes de recherche futures. Il s'inscrit dans la recherche sur la fatigue cognitive et contribue à l'évolution des connaissances et de la compréhension de ce concept. Bien que les résultats obtenus ne mènent pas à la création de nouveaux modèles conceptuels pour la fatigue cognitive en apprentissage, ils mettent en évidence une relation méconnue entre la fatigue cognitive, l'agentivité et l'apprentissage. L'objectif ultime étant d'optimiser l'apprentissage, le présent projet de recherche atteint amplement ses objectifs en mettant en relation plusieurs concepts fondamentaux à la question de fatigue cognitive en apprentissage, ouvrant ainsi la porte vers de nouvelles pistes de solution.

6.3 Forces et limites

La plus grande force de ce projet réside dans la méthodologie, c'est-à-dire l'arrimage entre le FCI et Mécanika. Les deux se rapportent exactement aux mêmes concepts, Mécanika ayant été conçu d'après le contenu du FCI.

Une autre force du présent projet est son devis qui permet d'étudier et collecter des mesures simultanées de deux participants d'agentivité différente. À notre connaissance, c'est la seule étude qui a fourni la possibilité de faire cela.

Ce projet est limité par la taille de son échantillon qui restreint la puissance statistique de cette recherche. Puisque le nombre de participants est relativement petit, la capacité à généraliser et à tirer des conclusions fiables est moindre. Un plus grand échantillon sera utilisé pour la suite du projet de plus grande envergure dans lequel s'inscrit ce projet de mémoire. Ces nouvelles données permettront sans doute de clarifier les mécanismes en jeu dans la question de la fatigue cognitive en apprentissage.

En ce qui concerne l'analyse de certains résultats, les points de données étaient alignés avec les tableaux du jeu puis moyennés pour cette période, c'est-à-dire un point de mesure par tableau. Toutefois, toutes les dyades ne se sont pas rendues aux divers niveaux au même moment, voire ne se sont pas rendues à certains niveaux. Les analyses effectuées avec ces données ont dû être faites sur l'échelle de tableaux du jeu, la comparaison dans le temps étant difficilement possible. Les données nécessaires pour obtenir des points de mesure dans le temps plutôt que par tableau sont disponibles, mais le traitement de ces données aurait demandé des ressources excédant celles disponibles pour ce projet.

Toujours pour les résultats, la règle d'arrêt qui exigeait qu'une dyade ne passe pas plus de 20 minutes par tableau représente également une limite de ce projet. Cette règle a été implantée après la passation de quelques dyades, ce qui fait en sorte que deux dyades (dyade 1 et dyade 3) ont passé plus de 20 minutes sur un niveau. De plus, cette règle d'arrêt pourrait avoir un impact sur la motivation des participants, et donc avoir une incidence sur la performance, la fatigue cognitive et l'apprentissage.

Les données de ce projet sont doublement nichées. Cet aspect considérable a certaines implications au point de vue des analyses et des statistiques. Elle permet une bonne estimation des valeurs de significativité, mais ne permet pas d'obtenir une estimation de la taille d'effet. Il s'agit d'une limite assez importante puisqu'elle ne permet pas de connaître la force de l'effet repéré, soit la force de la relation entre les variables étudiées.

Tous les participants ont dû compléter le FCI deux fois. Puisque ce questionnaire est répondu par choix de réponse, il est pertinent de considérer que le hasard peut avoir été un facteur chez certains participants.

Il est possible que des participants aient obtenu la bonne réponse en prétest ou en post-test purement par hasard.

6.4 Travaux futurs

La fatigue cognitive en contexte d'apprentissage est un phénomène complexe. Le présent projet de recherche ouvre la porte sur plusieurs questionnements et certains aspects ont besoin d'être approfondis, entre autres la motivation et l'ennui.

Les résultats inattendus de cette recherche laissent croire que certaines nuances ou clarifications pourraient être apportées à la notion d'agentivité en apprentissage, bien qu'elle soit déjà amplement étudiée dans le domaine de l'éducation. Des recherches supplémentaires et de plus grandes envergures seraient nécessaires afin de démontrer des liens clairs entre l'agentivité, l'apprentissage et la fatigue cognitive.

En ce qui concerne la fatigue cognitive, il est intéressant de l'observer en tâche d'apprentissage, considérant que la majorité des connaissances à son sujet proviennent de contextes différents. De prime à bord, la fatigue cognitive en apprentissage semble fonctionner de la même manière que dans les autres contextes, les facteurs d'influence provenant toutefois de sources différentes. Cela étant dit, plusieurs recherches seraient nécessaires afin de généraliser le fonctionnement de la fatigue cognitive en tâche d'apprentissage. Il serait également intéressant d'analyser les données en dyade afin de déceler des subtilités dans les dynamiques à l'intérieur même des dyades. Cela pourrait notamment permettre d'avancer la compréhension de l'apprentissage coopératif.

Au niveau de la mesure de la fatigue cognitive, il serait intéressant d'observer les bandes de fréquences de l'EEG et les régions d'activités du cerveau afin de mieux comprendre les liens de corrélation et de causalité. La littérature contient déjà beaucoup d'information quant aux processus cognitifs en lien avec la charge et la fatigue cognitive. Ces données pourraient permettre de distinguer ennui, fatigue et manque d'attention et démêler les nombreux facteurs qui peuvent entraîner des conséquences similaires. Le même principe pourrait s'appliquer pour le suivi oculaire et l'ERP. Ces deux mesures sont également assez bien documentées et peuvent apporter des clarifications et informations supplémentaires, par exemple

en mettant l'accent sur les saccades oculaires et le P300 qui ont déjà démontré leur lien à la fatigue cognitive.

La littérature consultée dans le cadre de ce projet a dressé un portrait de l'ennui plutôt simpliste. Les présents résultats semblent indiquer que le rôle de l'ennui pourrait avoir une place bien plus importante qu'anticipée dans la question de la fatigue cognitive en apprentissage, surtout en dyade. La conception de l'ennui et son caractère périphérique dans ce projet ne permettent pas une compréhension en profondeur du concept; il est alors plus difficile d'interpréter certains résultats. Il serait avantageux d'effectuer des recherches dans lesquels l'ennui est plus central avec la fatigue cognitive en apprentissage et même l'agentivité.

Quelques projets de recherches semblent indiquer l'existence potentielle d'une période de grâce, soit une période où la fatigue cognitive et ses conséquences ne se font pas ressentir, mais la majorité de la littérature consultée ne fait pas mention d'une telle période. Les résultats du présent projet ne permettent pas de dégager une période de grâce, mais permettent de supposer que l'apparition de la fatigue cognitive agit de la même manière en contexte d'apprentissage qu'en tâche cognitive. Le concept de période de grâce mériterait d'être exploré davantage dans de futurs projets afin de mieux comprendre les disparités rapportées dans les différentes recherches consultées.

Les limites d'un projet de maîtrise imposent la division des scénarios (SvS, SvÉ, ÉvS, ÉvÉ) où la distinction entre les deux types de mauvaises réponses du FCI n'est pas faite. Il est toutefois possible de tenir compte de cette différence et ainsi obtenir neuf scénarios possibles. Autrement dit, la distinction entre les différentes mauvaises réponses, soit mauvaises réponses et mauvaises conceptions, est perdue sous la couverture de « Échec » (É). Dans le cadre d'un projet de plus grande envergure, il serait intéressant de tenir compte de cette différence afin d'obtenir neuf scénarios possibles et davantage de nuances dans les résultats obtenus. Il serait également intéressant d'observer en parallèle les résultats des deux membres de la dyade lorsque l'un obtient ÉvÉ.

Les ressources disponibles pour ce projet n'ont pas permis d'analyser le nombre d'essais par tableau du jeu. Cette donnée pourrait être intéressante à mettre en relation avec le temps pris par tableau et la fatigue cognitive puisqu'elle serait un indicateur supplémentaire de la performance.

RÉFÉRENCES

- Agrawal, M., Mattar, M. G., Cohen, J. D. et Daw, N. D. (2021). The temporal dynamics of opportunity costs: A normative account of cognitive fatigue and boredom. *Psychological Review*.
<https://doi.org/10.1037/rev0000309>
- Araos Moya, A. et Damşa, C. (2023). Affordances and agency in students' use of online platforms and resources beyond curricular boundaries. *Learning, Media and Technology*, 48(4), 685-700.
<https://doi.org/10.1080/17439884.2023.2230124>
- Bafna, T. et Hansen, J. P. (2021). Mental fatigue measurement using eye metrics: A systematic literature review. *Psychophysiology*, 58(6). <https://doi.org/10.1111/psyp.13828>
- Bandura, A. (2001). Social Cognitive Theory: An Agentic Perspective. *Annual Review of Psychology*, 52(1), 1-26. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.52.1.1>
- Boksem, M. A. S., Meijman, T. F. et Lorist, M. M. (2006). Mental fatigue, motivation and action monitoring. *Biological Psychology*, 72(2), 123-132.
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2005.08.007>
- Boucher-Genesse, F. (2012, août). *Étude de différentes utilisations d'un jeu vidéo éducatif conçu spécifiquement pour intervenir sur certaines conceptions en physique mécanique : Mécanika* [Mémoire accepté]. Université du Québec à Montréal. <https://archipel.uqam.ca/5833/>
- Castro-Alonso, J. C., de Koning, B. B., Fiorella, L. et Paas, F. (2021). Five Strategies for Optimizing Instructional Materials: Instructor- and Learner-Managed Cognitive Load. *Educational Psychology Review*, 33(4), 1379-1407. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09606-9>
- Chen, O., Paas, F. et Sweller, J. (2021). Spacing and Interleaving Effects Require Distinct Theoretical Bases: a Systematic Review Testing the Cognitive Load and Discriminative-Contrast Hypotheses. *Educational Psychology Review*, 33(4), 1499-1522. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09613-w>
- Clayton, M. S., Yeung, N. et Cohen Kadosh, R. (2015). The roles of cortical oscillations in sustained attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(4), 188-195. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.02.004>
- Damşa, C. I., Kirschner, P. A., Andriessen, J. E. B., Erkens, G. et Sins, P. H. M. (2010). Shared Epistemic Agency: An Empirical Study of an Emergent Construct. *Journal of the Learning Sciences*, 19(2), 143-186. <https://doi.org/10.1080/10508401003708381>
- Deschênes, M. et Laferrière, T. (2019). Le codesign d'une plateforme numérique fondé sur des principes au service de l'agentivité des enseignantes et des enseignants en contexte de développement professionnel | Co-Design of a Digital Platform Based on Principles Supporting Teachers' Agency in the Context of Professional Development. *Canadian Journal of Learning and Technology / La revue canadienne de l'apprentissage et de la technologie*, 45(1).
<https://doi.org/10.21432/cjlt27798>
- Evans, K. et Carré, P. (2023). L'apprentissage adulte : une agentivité limitée: *Savoirs*, N° 61-62(1), 67-80.
<https://doi.org/10.3917/savo.061.0067>

- Gobet, F., Lane, P., Croker, S., Cheng, P., Jones, G., Oliver, I. et Pine, J. (2001). Chunking mechanisms in human learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(6), 236-243. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01662-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01662-4)
- Hake, R. R. (1998). *Interactive-engagement vs traditional methods: A six- thousand- student survey of mechanics test data for introductory physics courses.*
- Heller, P. et Huffman, D. (1995). Interpreting the force concept inventory: A reply to Hestenes and Halloun. *The Physics Teacher*, 33(8), 503-503. <https://doi.org/10.1119/1.2344279>
- Herlambang, M. B., Taatgen, N. A. et Cnossen, F. (2019). The Role of Motivation as a Factor in Mental Fatigue. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 61(7), 1171-1185. <https://doi.org/10.1177/0018720819828569>
- Hestenes, D., Wells, M. et Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141-158. <https://doi.org/10.1119/1.2343497>
- Holm, A., Lukander, K., Korpela, J., Sallinen, M. et Müller, K. M. I. (2009). Estimating Brain Load from the EEG. *The Scientific World JOURNAL*, 9, 639-651. <https://doi.org/10.1100/tsw.2009.83>
- Hopstaken, J. F., van der Linden, D., Bakker, A. B. et Kompier, M. A. J. (2015). The window of my eyes: Task disengagement and mental fatigue covary with pupil dynamics. *Biological Psychology*, 110, 100-106. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2015.06.013>
- Huffman, D. et Heller, P. (1995). What does the force concept inventory actually measure? *The Physics Teacher*, 33(3), 138-143. <https://doi.org/10.1119/1.2344171>
- Ishii, A., Tanaka, M. et Watanabe, Y. (2014). Neural mechanisms of mental fatigue. *Reviews in the Neurosciences*, 0(0). <https://doi.org/10.1515/revneuro-2014-0028>
- Käthner, I., Wriessnegger, S. C., Müller-Putz, G. R., Kübler, A. et Halder, S. (2014). Effects of mental workload and fatigue on the P300, alpha and theta band power during operation of an ERP (P300) brain-computer interface. *Biological Psychology*, 102, 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2014.07.014>
- Khojasteh Moghani, M., Zeidabadi, R., Shahabi Kaseb, M. R. et Bahreini Borujeni, I. (2021). Mental Fatigue Reduces the Benefits of Self-Controlled Feedback on Learning a Force Production Task. *Perceptual and Motor Skills*, 128(5), 2398-2414. <https://doi.org/10.1177/00315125211037306>
- Lasry, N., Rosenfield, S., Dedic, H., Dahan, A. et Reshef, O. (2011). The puzzling reliability of the Force Concept Inventory. *American Journal of Physics*, 79(9), 909-912. <https://doi.org/10.1119/1.3602073>
- Lorist, M. M., Bezdan, E., ten Caat, M., Span, M. M., Roerdink, J. B. T. M. et Maurits, N. M. (2009). The influence of mental fatigue and motivation on neural network dynamics; an EEG coherence study. *Brain Research*, 1270, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.03.015>
- Mercier, J., Avaca, I. L., Whissell-Turner, K., Paradis, A. et Mikropoulos, T. A. (2020a). Agency Affects Learning Outcomes with a Serious Game. Dans P. Zaphiris et A. Ioannou (dir.), *Learning and Collaboration Technologies. Human and Technology Ecosystems* (vol. 12206, p. 267-278). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50506-6_20

- Mercier, J., Whissell-Turner, K., Paradis, A., Avaca, I. L., Riopel, M. et Bédard, M. (2020b). Do Individual Differences Modulate the Effect of Agency on Learning Outcomes with a Serious Game? Dans P. Zaphiris et A. Ioannou (dir.), *Learning and Collaboration Technologies. Human and Technology Ecosystems* (vol. 12206, p. 254-266). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50506-6_19
- Murshed, M. B., Phang, F. A. et Binti, M. A. H. B. B. and I. J. (2020). The Reliability Analysis for Force Concept Inventory. *International Journal of Psychosocial Rehabilitation*, 24(5), 143-151.
- Pergher, V., Vanbilsen, N. et Van Hulle, M. (2021). The Effect of Mental Fatigue and Gender on Working Memory Performance during Repeated Practice by Young and Older Adults. *Neural Plasticity*, 2021, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2021/6612805>
- Qin, H., Zhou, X., Ou, X., Liu, Y. et Xue, C. (2021). Detection of mental fatigue state using heart rate variability and eye metrics during simulated flight. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 31(6), 637-651. <https://doi.org/10.1002/hfm.20927>
- Randles, D., Harlow, I. et Inzlicht, M. (2017). A pre-registered naturalistic observation of within domain mental fatigue and domain-general depletion of self-control. *PLOS ONE*, 12(9), e0182980. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182980>
- Skuballa, I. T., Xu, K. M. et Jarodzka, H. (2019). The impact of Co-actors on cognitive load: When the mere presence of others makes learning more difficult. *Computers in Human Behavior*, 101, 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.06.016>
- Snow, E. L., Allen, L. K., Jacovina, M. E. et McNamara, D. S. (2015). Does agency matter?: Exploring the impact of controlled behaviors within a game-based environment. *Computers & Education*, 82, 378-392. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.12.011>
- Soukup, T., Lamb, B. W., Weigl, M., Green, J. S. A. et Sevdalis, N. (2019). An Integrated Literature Review of Time-on-Task Effects With a Pragmatic Framework for Understanding and Improving Decision-Making in Multidisciplinary Oncology Team Meetings. *Frontiers in Psychology*, 10, 1245. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01245>
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. et Paas, F. (2019). Cognitive Architecture and Instructional Design: 20 Years Later. *Educational Psychology Review*, 31(2), 261-292. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5>
- Tali, F. (2020). Mise en place d'un dispositif de formation hybride : une innovation c'est un changement qui a réussi ? *Éducation et socialisation*, (55). <https://doi.org/10.4000/edso.9071>
- Thalmann, M., Souza, A. S. et Oberauer, K. (2019). How does chunking help working memory? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 45(1), 37-55. <https://doi.org/10.1037/xlm0000578>
- Tran, Y., Craig, A., Craig, R., Chai, R. et Nguyen, H. (2020). The influence of mental fatigue on brain activity: Evidence from a systematic review with meta-analyses. *Psychophysiology*, 57(5). <https://doi.org/10.1111/psyp.13554>

- Tricot, A., Puma, S., Capa, R., Audiffren, M., André, N., Lespiau, F., Roussel, S., Jeunet, C., Massa, E., Bellec, D., Fonteneau, E. et Charras, P. (2020). Working Memory Resource Depletion Effect in Academic Learning: Steps to an Integrated Approach. Dans L. Longo et M. C. Leva (dir.), *Human Mental Workload: Models and Applications* (vol. 1318, p. 13-26). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62302-9_2
- White, G. (2011). Mental load: helping clinical learners. *The Clinical Teacher*, 8(3), 168-171. <https://doi.org/10.1111/j.1743-498X.2011.00458.x>
- Yang, H.-Y. (2016). The Effects of Attention Cueing on Visualizers' Multimedia Learning. *Journal of Educational Technology & Society*, 19(1), 249-262.
- Zienkowski, J. et Lambotte, F. (2023). Agency as an emerging phenomenon in the construction of massive open online courses: a discursive-material approach to the techno-pedagogical edX platform and its forums. *Learning, Media and Technology*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/17439884.2023.2238601>